

ISSN 2306-1561

**Automation and Control in Technical Systems (ACTS)**

2015, No 2, pp. 83-97.

DOI: 10.12731/2306-1561-2015-2-8

---



## Frequency Method of Synthesis of Control Systems for Mobile Machines

### Andrey Petrovich Prokopev

Russian Federation, Ph. D., Associate Professor, Department of «Engineering systems of buildings and constructions».

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia. Tel.: +79233777817, tel. dep.: 8(391)2062734, <http://www.sfu-kras.ru>. prok1@yandex.ru.

### Vladimir Ivanovich Ivanchura

Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of «System of control, automated management and design».

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia. Tel. dep.: 8(391)2062734, <http://www.sfu-kras.ru>. ivan43ura@yandex.ru.

### Rurik Timofeevich Emelyanov

Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of «Engineering systems of buildings and constructions».

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia. Tel.: dep. 8(391)2062734, <http://www.sfu-kras.ru>. macgasa@yandex.ru.

### Alexander Andreevich Torokhov

Russian Federation, Undergraduate Student, Department of «Applied mathematics».

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia. Tel.: +79535972868, <http://www.sfu-kras.ru>. Gorn\_07@mail.ru.

**Abstract.** The paper explored the method of synthesis of the PID control system with the nonlinearity of the «saturation». As a theoretical basis for the methodology we used the frequency method for linear systems. The effect of nonlinearity on the factors was specified by controller simulation modeling in MATLAB+Simulink. The working capacity of the research methodology was performed on a specific example of electro-hydraulic control system of road roller velocity.

**Keywords:** automated control system, frequency method, non-linear system, synthesis of PID control.

---

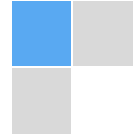
ISSN 2306-1561

**Автоматизация и управление в технических системах (АУТС)**

2015. – № 2. – С. 83-97.

DOI: 10.12731/2306-1561-2015-2-8

---



УДК 681.5

## **Частотный метод синтеза регулятора системы управления для мобильных машин**

**Прокопьев Андрей Петрович**

Российская Федерация, канд. техн. наук, доцент кафедры «Инженерные системы зданий и сооружений».

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (СФУ), 660041, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. Тел. моб.: +79233777817, тел. кафедры 8(391)2062734, <http://www.sfu-kras.ru>, [prok1@yandex.ru](mailto:prok1@yandex.ru).

**Иванчура Владимир Иванович**

Российская Федерация, д-р техн. наук, проф. кафедры «Системы автоматизации, автоматизированное управление и проектирование».

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (СФУ), 660041, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. Тел. кафедры: 8(391)2062734, <http://www.sfu-kras.ru>, [ivan43ura@yandex.ru](mailto:ivan43ura@yandex.ru).

**Емельянов Рюрик Тимофеевич**

Российская Федерация, д-р техн. наук, проф. кафедры «Инженерные системы зданий и сооружений».

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (СФУ), 660041, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. Тел. кафедры: 8(391)2062734, <http://www.sfu-kras.ru>, [masgasa@yandex.ru](mailto:masgasa@yandex.ru).

**Тороков Александр Андреевич**

Российская Федерация, магистрант кафедры «Прикладная математика».

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (СФУ), 660041, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, тел. моб. +79535972868, <http://www.sfu-kras.ru>, [Gorn\\_07@mail.ru](mailto:Gorn_07@mail.ru).

**Аннотация.** Рассмотрена методика синтеза ПИД-регулятора системы управления с нелинейностью типа «насыщение». В качестве теоретической основы методики использован частотный метод для линейных систем. Влияние нелинейности на коэффициенты регулятора уточняется имитационным моделированием в среде MATLAB&Simulink. Исследование работоспособности методики выполнено на

конкретном примере электрогидравлической системы управления скоростью движения дорожного катка.

**Ключевые слова:** система автоматического управления; синтез ПИД-регулятора; нелинейная система; частотный метод.

## 1. Введение

В автоматизированных системах управления технологическими процессами значительное распространение получили пропорционально-интегрально-дифференцирующие (ПИД) регуляторы. Проблема синтеза регуляторов систем управления – одна из основных предметных задач теории автоматического управления.

Синтез ПИД-регуляторов линейных систем управления достаточно хорошо изучены. В реальных системах автоматического управления (САУ) мобильными машинами – строительно-дорожными, сельскохозяйственными и др., в качестве исполнительных механизмов часто используются гидравлические приводы (ГП) имеющие признаки нелинейности. Примером нелинейности может служить ограничение энергетических возможностей насосной установки гидравлического привода – давления рабочей жидкости и производительности насоса, которое приводит к нелинейности типа «насыщение» или «ограничение» выходных сигналов гидропривода.

Из многочисленных источников научной и технической литературы можно выделить следующие методы синтеза ПИД-регуляторов [1]:

- эмпирическая настройка;
- методы Зиглера – Никольса [2] и производные методы [3] ;
- алгебраические методы;
- методы модального синтеза;
- методы синтеза в частотной области;
- методы оптимального синтеза;
- метод оптимальной ПФ замкнутой системы (технический и симметричный оптимумы).

Тенденция развития методов синтеза ПИ- и ПИД-регуляторов:

- 1) 443 метода синтеза ПИД-регуляторов собрано в книге Aidan O'Dwyer, 2006 [4];
- 2) 1731 методов синтеза ПИД-регуляторов собрано в следующем издании Aidan O'Dwyer, 2009 [5].

В статье рассматривается нелинейная система управления линейным объектом.

**Цель исследования:** разработка методики синтеза ПИД-регулятора нелинейной системы управления.

## 2. Постановка задачи

Объект исследования: система управления динамическим объектом с обратной связью.

С целью повышения качества переходного процесса путем обеспечения близкого к апериодическому характера изменения переходной характеристики требуется разработать метод синтеза ПИД-регулятора нелинейной системы управления динамическими объектами на основе частотных характеристик линейной части системы. Задача синтеза регулятора решается в прикладной области систем управления гидравлическими приводами строительных и дорожных машин. Объекты управления имеют преимущественно гидравлические приводы ходовой части, рабочего органа и т. д.

Рассмотрим вначале процедуру синтеза параметров ПИД-регулятора с передаточной функцией  $W_y(s)$  в линейной системе

$$W_y(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s = \frac{K_d \cdot s^2 + K_p \cdot s + K_i}{s}. \quad (1)$$

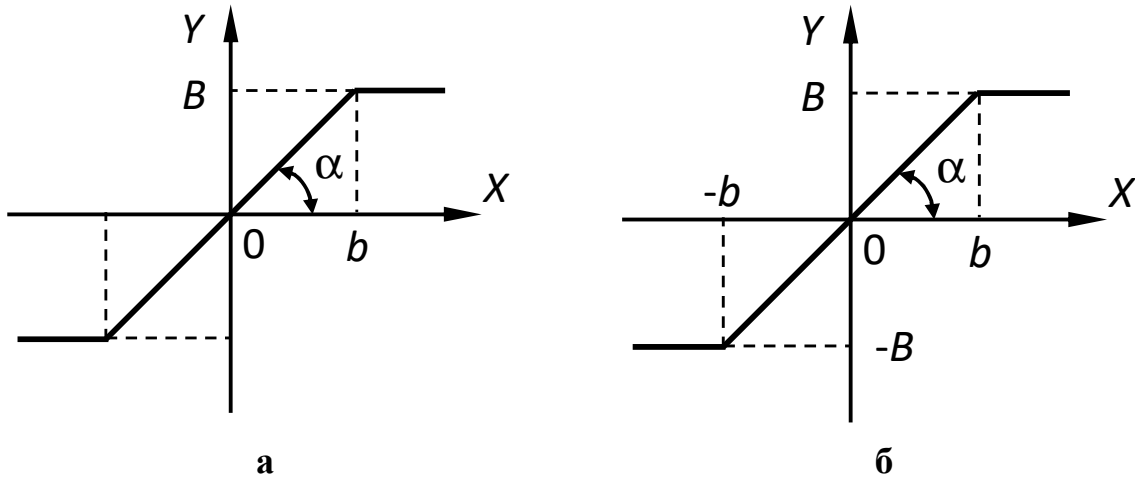
В настоящей работе рассматриваются системы управления гидравлическим приводом, который относится к группе естественных нелинейных элементов присутствующих в автоматических СУ.

Наиболее эффективным инженерным методом построения нелинейной динамической структуры является дополнение линейной модели ГП теми или иными нелинейными звеньями, обусловленными существенными нелинейностями.

В этом случае нелинейную динамическую структуру можно разделить на две части: линейную (линейную динамическую модель) и нелинейную, которая формируется на основе учитываемой нелинейности. Такой подход позволяет применить метод гармонической линеаризации и исследовать устойчивость следящей системы с помощью логарифмических частотных характеристик [6].

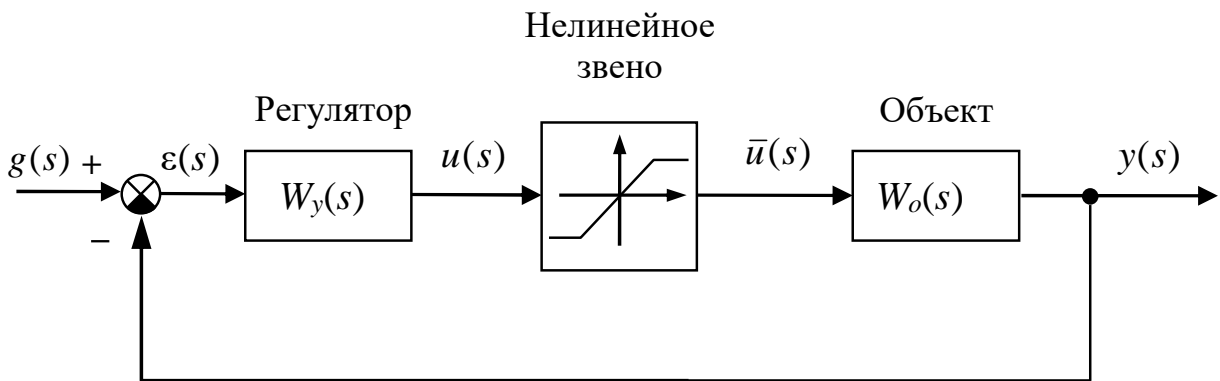
Ограничение энергетических возможностей насосной установки – давления рабочей жидкости и производительности насоса – приводит к нелинейности типа «насыщение» или «ограничение». При увеличении амплитуды колебаний золотника выше некоторого значения рост амплитуды первых гармоник выходных сигналов начинает замедляться [7].

В системе MATLAB&Simulink имеется возможность ввода нелинейностей различного вида, которые позволяют описать процессы, не поддающиеся линеаризации. В модели насоса используются нелинейности, которые ограничивают выходную величину. Блок Saturation (звено с ограничением или насыщением) представляет собой нелинейное устройство, сигнал, на выходе которого равен входному сигналу до тех пор, пока не достигает порогов ограничения: верхнего Upper limit или нижнего Lower limit, после этого сигнал перестает изменяться. Статическая характеристика этого блока приведена на рисунке 1, а – для примера не реверсивного ГП, на рисунке 1, б – реверсивного ГП.



**Рисунок 1 – Статическая характеристика блока с ограничением Saturation**

Структурная схема системы управления с нелинейным звеном типа «ограничение» приведена на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Структурная схема нелинейной системы управления**

Здесь  $W_o(s)$  – передаточная функция объекта регулирования;  $W_y(s)$  – передаточная функция регулятора;  $g(s)$  – задающее воздействие;  $\epsilon(s)$  – ошибка регулирования;  $u(s)$  – управляющее воздействие;  $\bar{u}(s)$  – управляющее воздействие с учетом влияния нелинейного звена;  $y(s)$  – выходная регулируемая величина.

Объект регулирования имеет передаточную функцию  $W_o(s)$  второго порядка

$$W_o(s) = \frac{b_0}{a_0 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_2}. \quad (2)$$

Передаточная функция разомкнутого контура линейной системы с ПИД-регулятором имеет вид:

$$W(s) = W_y(s) \cdot W_o(s) = \frac{K_d \cdot b_0 \cdot s^2 + K_p \cdot b_0 \cdot s + K_i \cdot b_0}{a_0 \cdot s^3 + a_1 \cdot s^2 + a_2 \cdot s}. \quad (3)$$

Величины насыщения и вид используемой нелинейной характеристики обусловлены особенностями конструкции применяемого гидравлического насоса (регулируемого, нерегулируемого). Управление осуществляется изменением сигнала управления давлением насоса.

При нулевых начальных условиях диапазон изменения сигнала задающего воздействия на систему определяется ограничением выходной переменной нелинейного элемента единичным отрицательным, либо положительным значениями. Поэтому заданное значение выходной регулируемой переменной (в нашем случае скорости вращения гидромотора) также ограничено значениями коэффициента передачи объекта управления  $W_o(0)$ . Это не противоречит практике. Поэтому

$$|g(t)| \leq W_o(0). \quad (4)$$

При ненулевых начальных условиях диапазон изменения сигнала выходной переменной системы также ограничен похожим на (4) выражением

$$|\Delta y(t)| \leq W_o(0), \quad (5)$$

что накладывает ограничение ненулевых начальных условий  $y(0)$  на возможное задание и приводит к изменению неравенства (4). Так при положительных значениях  $g(t) > 0$  и положительных значениях  $y(0) > 0$  выражение (4) в соответствии с (5) будет иметь вид

$$g(t) \leq W_o(0) + y(0). \quad (6)$$

Это выражение сохранится и при отрицательных значениях  $y(0) < 0$ . Откуда следует, что при отрицательных значениях нулевого условия и  $g(t) > 0$  справедливо:  $|y(0)| < W_o(0)$ .

Подобные выражения могут быть получены и при отрицательных значениях  $g(t) < 0$ . Так, если при этом  $y(0) < 0$ , то (4) с учетом (5) будет

$$g(t) \geq -W_o(0) + y(0). \quad (7)$$

Это выражение сохранится и при положительных значениях  $y(0) > 0$ . Откуда следует, что при положительных значениях нулевого условия и  $g(t) < 0$  также справедливо:  $|y(0)| < W_o(0)$ .

### 3. Определение параметров ПИД-регулятора в частотной области

С целью применения современного программного обеспечения и численных методов исследования определим параметры ПИД-регулятора в частотной области по методике аналитического синтеза [8] для передаточной функции объекта управления полученной в работе [12]

$$W_o(s) = \frac{115,05}{2,473 \cdot s^2 + 10,5 \cdot s + 26,98}. \quad (8)$$

Принимаем:

запас устойчивости по фазе скорректированной системы  $\gamma_1 = 60$  градусов, что в

радianaх составит  $\gamma_1 = \frac{60}{180} \cdot \pi = 1,047$  рад ;

частоту среза скорректированной разомкнутой системы  $\omega_{1cp} = 5,1 \text{ c}^{-1}$ .

Определяем ожидаемое время переходного процесса  $t_p$  :

$$t_p = \frac{8}{\omega_{1cp} \cdot \tan(\gamma_1)} = \frac{8}{5,1 \cdot 1,047} = 0,906 \text{ c}.$$

При необходимости можно задаваться временем переходного процесса в скорректированной системе, а затем определять частоту среза.

Определяем модуль корректируемой системы на частоте среза и ее аргумент

$$m_1 = |W_p(\omega_{1cp})| = 1,762, \arg(W_p(\omega_{1cp})) = -2,18.$$

Определяем аргумент корректирующего устройства на частоте среза

$$\theta = \gamma_1 - \pi - \arg(W_p(\omega_{1cp})) = 0,085.$$

Определяем коэффициент передачи  $K_{1p}$  пропорциональной части корректирующего устройства

$$K_{1p} = m_1 \cdot \cos(\theta) = 1,756.$$

Определяем коэффициент передачи  $K_{1i}$  интегральной части корректирующего устройства по методике синтеза ПИД-регулятора

$$K_{1i} = 0,1 \cdot \omega_{1cp} \cdot K_{1p} = 0,895.$$

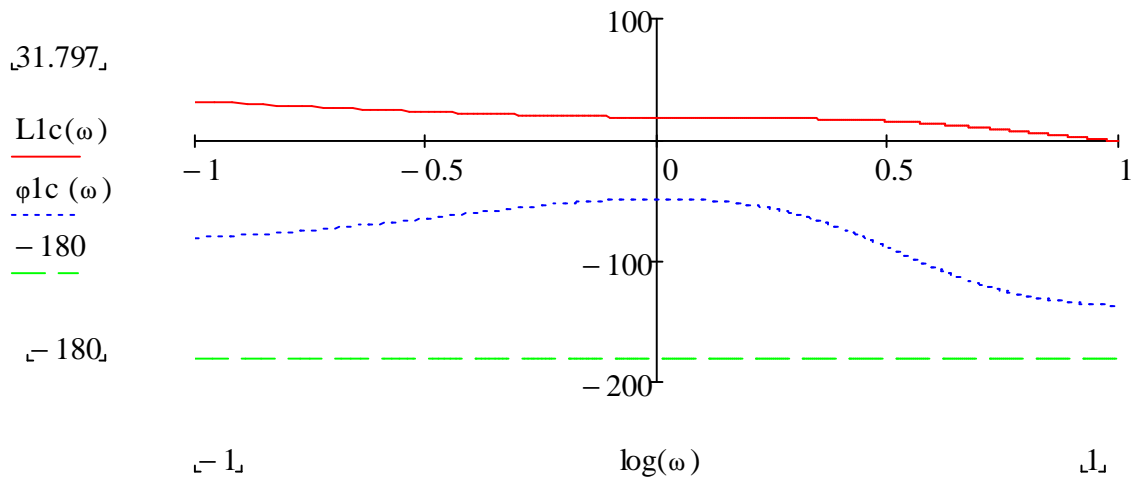
Определяем коэффициент передачи  $K_{1d}$  дифференциальной части корректирующего устройства

$$K_{1d} = \frac{K_{1i}}{\omega_{1cp}^2} + \frac{m_1}{\omega_{1cp}} \sin(\theta) = 0,064.$$

Проверяем результаты синтеза по частотным характеристикам линейной разомкнутой скорректированной системы.

Частотная передаточная функция разомкнутой скорректированной системы.

Логарифмические частотные характеристики разомкнутой скорректированной системы (диаграмма Бode), рисунок 3:



**Рисунок 3 – Диаграмма Бode скорректированной системы с ПИД-регулятором**

$$L_{1c}(\omega) = 20 \cdot \log(|W_{1c}(\omega)|);$$

$$\varphi_{1c}(\omega) = \arg(W_{1c}(\omega)) \cdot \frac{180}{\pi}.$$

Получены запасы устойчивости по фазе



$$\gamma_{1c}(\omega) = 180 + \varphi_{1c}(\omega_{1cp}); \gamma_{1c}(\omega_{1cp}) = 60 \text{ град.}$$

Переходные характеристики линейной и нелинейной замкнутых систем (рисунок 4, рисунок 6) получены имитационным моделированием в среде MATLAB&Simulink, рисунок 5, рисунок 7 соответственно.

Параметры ПИД-регулятора:  $K_p = 1,756$ ;  $K_i = 0,895$ ;  $K_d = 0,064$ ; перерегулирование  $\sigma\% = 18\%$ , время регулирования  $t_p = 0,9 \text{ с}$ .

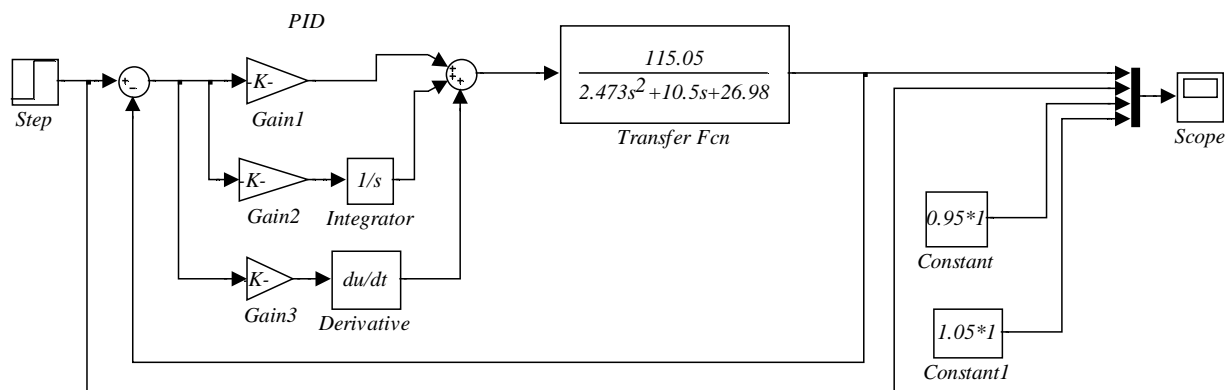


Рисунок 4 – Имитационная модель системы с ПИД-регулятором на языке Simulink

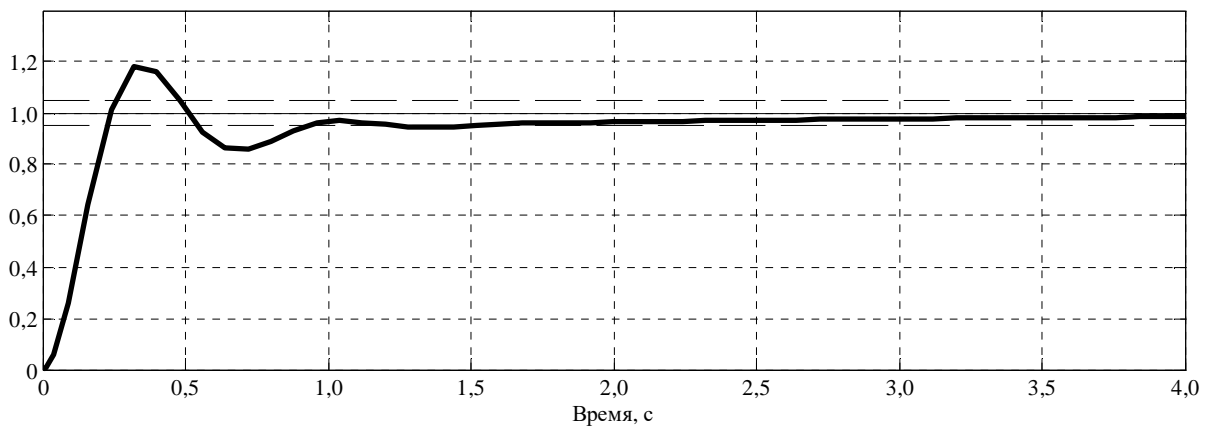
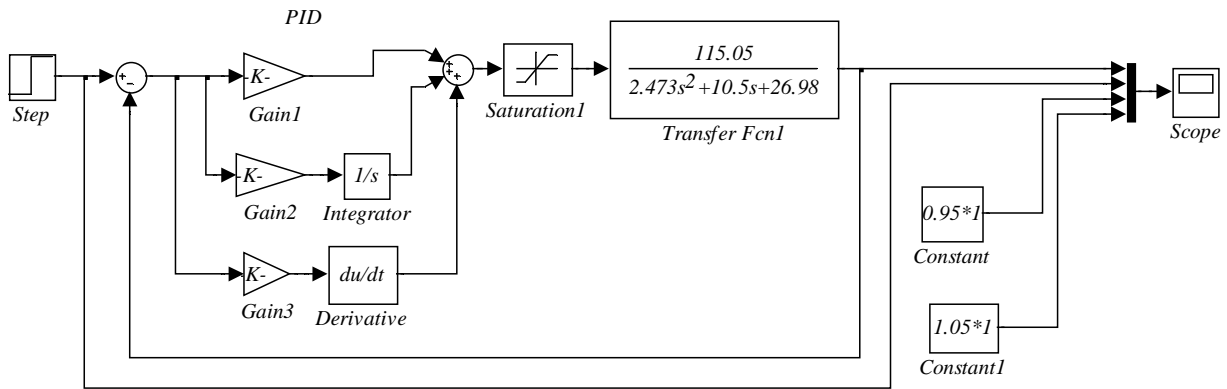
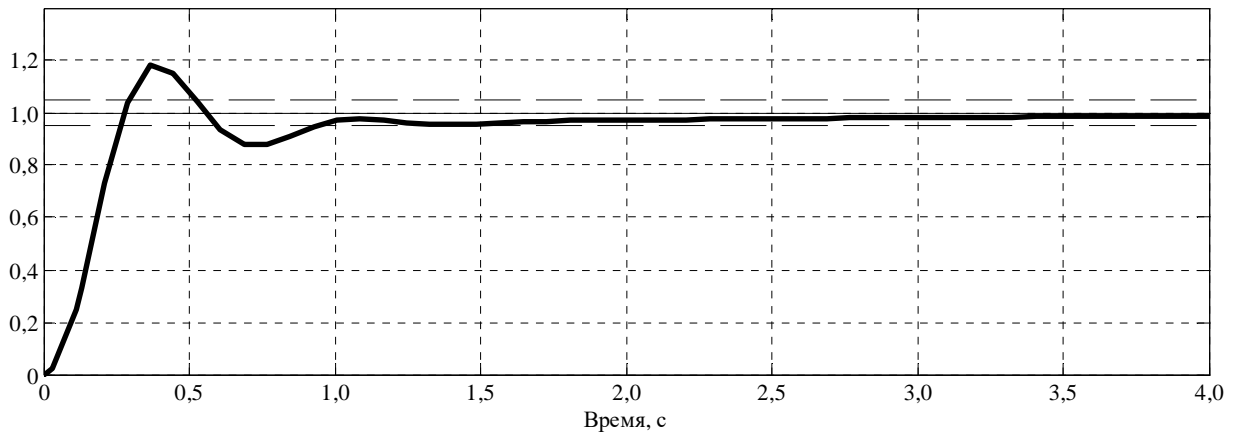


Рисунок 5 – Переходная характеристика линейной замкнутой системы (параметры ПИД-регулятора:  $K_p = 1,756$ ;  $K_i = 0,895$ ;  $K_d = 0,064$ ; перерегулирование  $\sigma = 18\%$ , время регулирования  $t_p = 0,92 \text{ с}$ )



**Рисунок 6 – Имитационная модель нелинейной системы с ПИД-регулятором на языке Simulink**



**Рисунок 7 – Переходная характеристика нелинейной замкнутой системы (параметры ПИД-регулятора:  $K_p = 1,756$ ;  $K_i = 0,895$ ;  $K_d = 0,064$ ; перерегулирование  $\sigma\% = 18\%$ , время регулирования  $t_p = 0,93\text{с}$ )**

Сравнивая полученные переходные характеристики, приходим к выводу, что нелинейность типа «ограничение» при синтезированных параметрах ПИД-регулятора не оказывает существенного влияния на вид переходной характеристики.

Рассмотренная методика синтеза приводит к получению переходных характеристик с перерегулированием, что не всегда желательно, например, для гидравлических приводов из-за возможных гидравлических ударов. Снижение величины перерегулирования достигается изменением полученных параметров регулятора.

В качестве критерия оценки параметров рассмотрим квадратичную интегральную оценку качества переходного процесса  $J_{20}$  [9, 10, 11 и др.], значения которой определяют по параметрам в изображении Лапласа для свободной составляющей ошибки регулирования  $E(s)$ . В нашем случае  $E(s)$  выражается через параметры передаточных функций объекта управления и регулятора:

$$E(s) = \frac{a_0 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_2}{a_0 \cdot s^3 + (a_1 + K_{1d} \cdot b_0) \cdot s^2 + (a_2 + K_{1p} \cdot b_0) \cdot s + K_{1i} \cdot b_0}. \quad (9)$$

Тогда соответствующая квадратичная интегральная оценка качества J20 имеет вид:

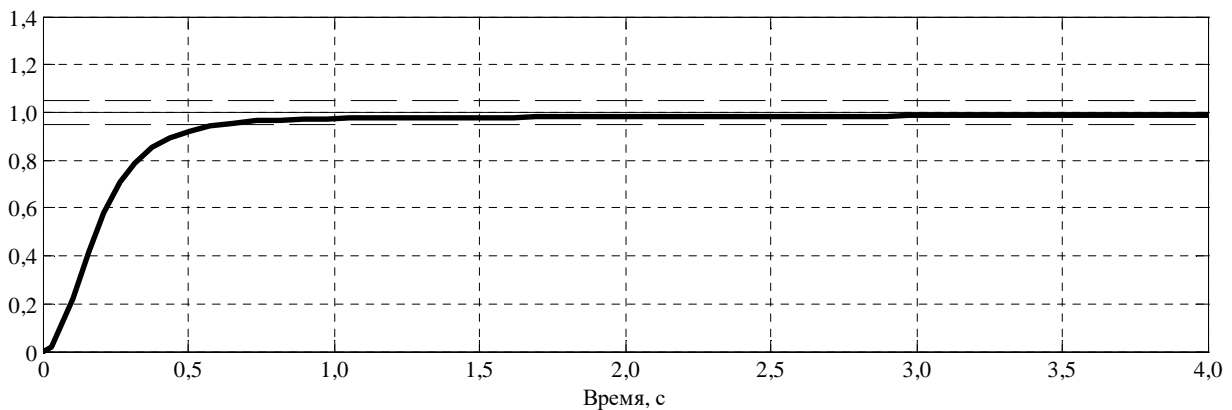
$$J_{20}(d_1, d_2, d_3) = \frac{c_0^2 \cdot d_3 \cdot d_2 + (c_1^2 - 2 \cdot c_0 \cdot c_2) \cdot d_3 \cdot d_0 + c_2^2 \cdot d_1 \cdot d_0}{2 \cdot d_0 \cdot d_3 (d_1 \cdot d_2 - d_0 \cdot d_3)}, \quad (10)$$

где

$$c_0 = a_0, \quad c_1 = a_1, \quad c_2 = a_2,$$

$$d_0 = a_0, \quad d_1 = a_1 + K_{1d} \cdot b_0, \quad d_2 = a_2 + K_{1p} \cdot b_0, \quad d_3 = K_{1i} \cdot b_0.$$

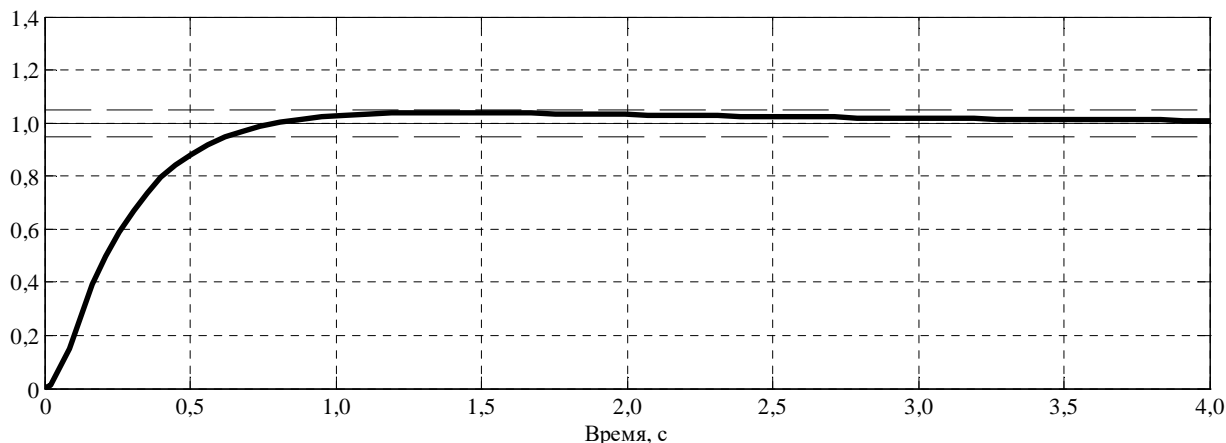
Переходная характеристика рассматриваемой нелинейной замкнутой системы (рисунок 8) с нелинейностью типа «ограничение» представлена на рисунке 8. Параметры ПИД-регулятора:  $K_p = 2,634$ ;  $K_i = 0,722$ ;  $K_d = 0,41$ ;  $J_{20} = 0,035$ . Время переходного процесса  $t_p = 0,65 \text{ с}$ .



**Рисунок 8 –** Переходная характеристика нелинейной замкнутой системы с нелинейностью типа «ограничение» (параметры ПИД-регулятора:  $K_p = 2,634$ ;  $K_i = 0,722$ ;  $K_d = 0,41$ ;  $J_{20} = 0,035$ . Время переходного процесса  $t_p = 0,65 \text{ с}$ )

Из полученной переходной характеристики можно сделать главный вывод необходимый для дальнейшего исследования – важно, что характер процесса апериодический, перерегулирование отсутствует. Это обеспечивает и апериодическое изменение ошибки регулирования, ошибка регулирования не меняет знака. Это обстоятельство не изменяет характер передачи информации при переходе от линейной системы к нелинейной.

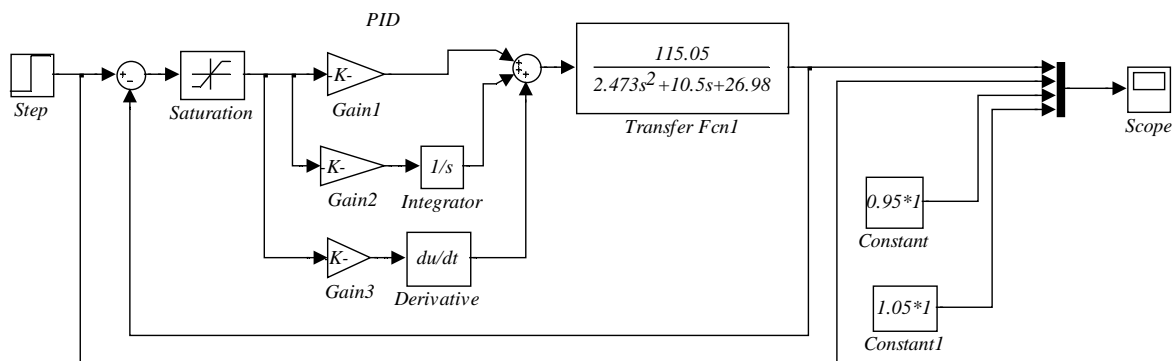
Переходная характеристика линейной замкнутой системы (рис. 4) представлена на рисунок 9. Параметры ПИД-регулятора:  $K_p = 2,634$ ;  $K_i = 1,445$ ;  $K_d = 0,615$ ;  $J_{20} = 0,022$ . Время переходного процесса  $t_p = 0,65$  с.



**Рисунок 9 –** Переходная характеристика линейной замкнутой системы (параметры ПИД-регулятора:  $K_p = 2,634$ ;  $K_i = 1,445$ ;  $K_d = 0,615$ ;  $J_{20} = 0,022$ ;  $t_p = 0,65$  с)

Вывод: в линейной системе получено небольшое перерегулирование.

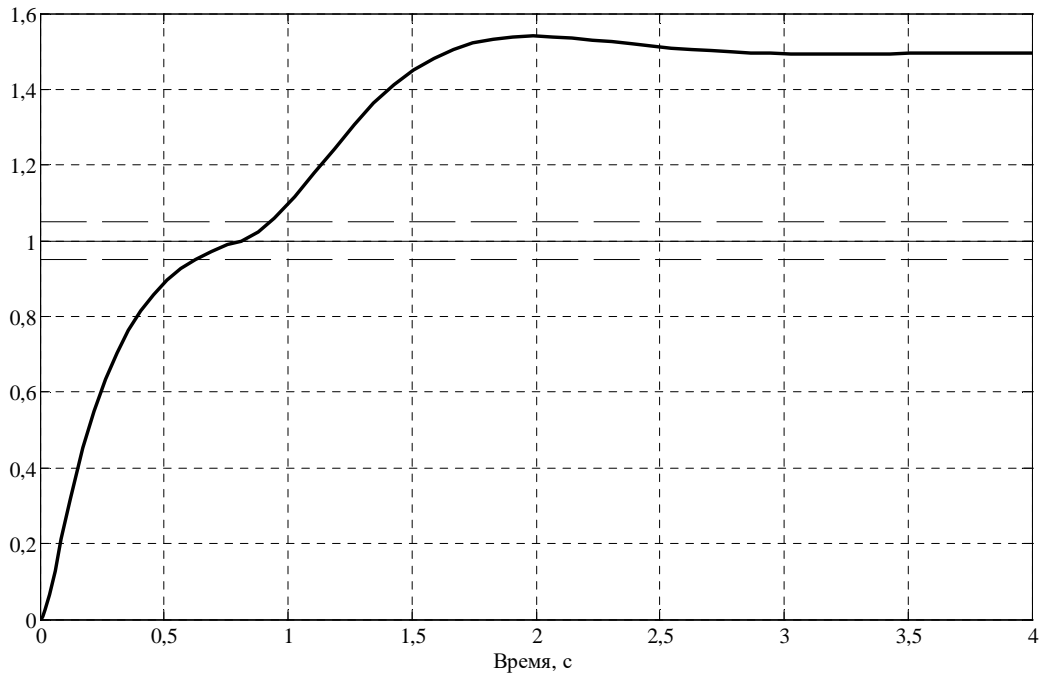
Для исследования связи перерегулирования и управляемости разных систем рассмотрен вариант имитационной модели с расположением нелинейного элемента типа «ограничение» перед ПИД-регулятором, рисунок 10.



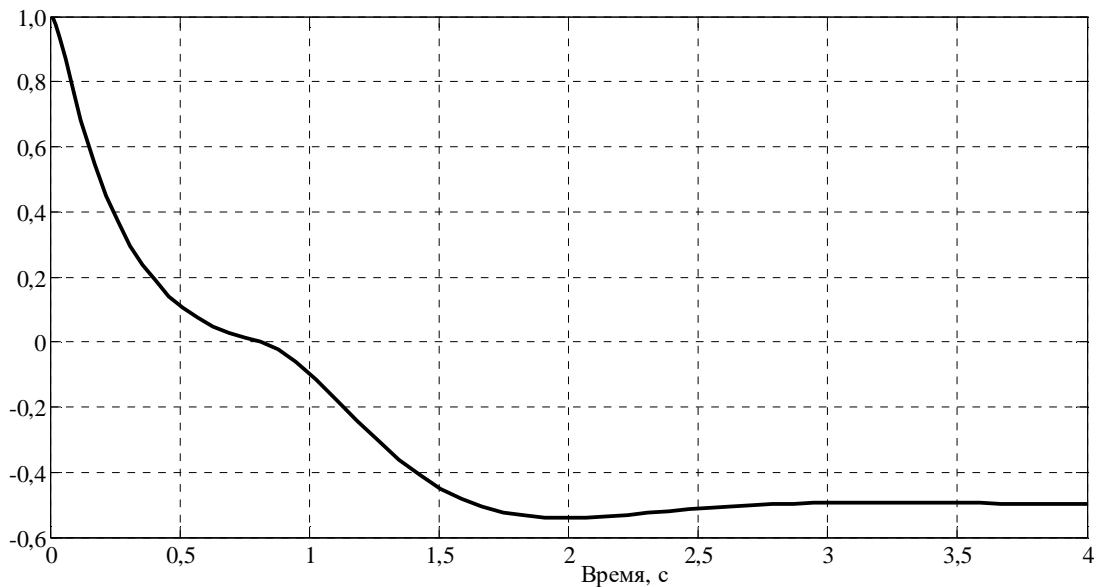
**Рисунок 10 –** Имитационная модель исследуемой системы с ПИД-регулятором на языке Simulink

Переходная характеристика и график ошибки регулирования исследуемой замкнутой системы управления представлены на рисунках 11 и 12 соответственно. Параметры ПИД-регулятора:  $K_p = 2,634$ ;  $K_i = 1,445$ ;  $K_d = 0,615$ ;  $J_{20} = 0,022$ . Время переходного процесса  $t_p = 0,65$  с.

Из рисунков 11 и 12 видно, что данное управление не стабилизирует систему в нужном положении.

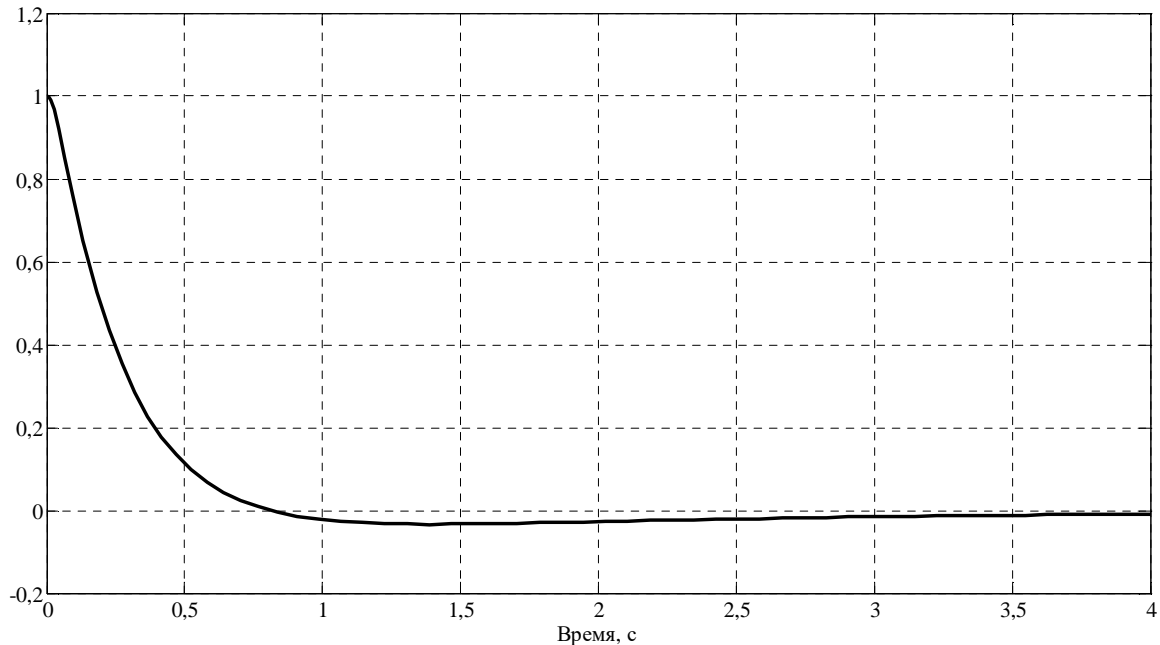


**Рисунок 11 – Переходная характеристика исследуемой замкнутой системы с нелинейностью типа «ограничение» (параметры ПИД-регулятора:  $K_p=2.634$ ;  $K_i=1.445$ ;  $K_d=0.615$ ;  $J_{20}=0.022$ )**



**Рисунок 12 – Ошибка регулирования в исследуемой замкнутой системе с нелинейностью типа ограничение (параметры ПИД-регулятора:  $K_p=2.634$ ;  $K_i=1.445$ ;  $K_d=0.615$ ;  $J_{20}=0.022$ )**

В линейном варианте, рисунок 9 и 13, она управляема и с лучшим качеством переходного процесса, величина перерегулирования меньше 5%. Но ошибка регулирования, см. рисунок 13, становится отрицательной. Замкнутая система остается устойчивой с новым положением равновесия.



**Рисунок 13. Ошибка регулирования в линейной замкнутой системе (параметры ПИД регулятора:  $K_p=2,634$ ;  $K_i=1,445$ ;  $K_d=0,615$ ;  $J_{20}=0,022$ )**

По результатам имитационного моделирования можно отметить, что даже незначительное перерегулирование в соответствующей линейной системе приводит к потере управляемости в нелинейной системе со звеном типа «ограничение», что рассмотрено выше.

Важно также отметить, что апериодический характер процесса наиболее благоприятен для гидравлических приводов. За счет этого обеспечивается уменьшение гидравлических ударов.

Звено типа «ограничение» характерно для моделей реальных нелинейных систем управления – гидравлических приводов.

Таким образом, для исследуемого варианта модели системы управления с нелинейным элементом типа «ограничение» перед ПИД-регулятором, см. рис. 10, параметры регулятора должны выбираться так, чтобы в соответствующей линейной системе отсутствовало перерегуливание.

#### **4. Заключение**

Новизна метода синтеза ПИД-регулятора нелинейной системы управления заключается в предложении «критерия характера динамического процесса» при перерегулировании  $\sigma\%$  близком к 0%, что возможно при значениях действительных

частей корней характеристического уравнения по модулю много больше их мнимых частей  $|\operatorname{Re}(S_k)| \gg |\operatorname{Im}(S_k)|$ . Задача исследователя при синтезе ПИД-регулятора системы управления с нелинейным элементом заключается в обеспечении близкого к апериодическому характеру изменения переходной характеристики.

### Список информационных источников

- [1] Александров А.Г., Паленов М.В. Самонастраивающийся ПИД-И регулятор [Электронный ресурс] // Семинар лаборатории 7 ИПУ РАН, Москва 14 декабря 2010 г. 27 с. URL: [https://sites.google.com/site/lab7seminar/archive/2010-2/2010\\_12\\_14-M\\_V\\_Palenov .pdf?attredirects=0](https://sites.google.com/site/lab7seminar/archive/2010-2/2010_12_14-M_V_Palenov.pdf?attredirects=0).
- [2] Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers, Trans. ASME 64 (1942). P. 759–768.
- [3] Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID Control. Research Triangle Park, NC 27709: ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. 354 p.
- [4] O'Dwyer A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules; 2nd ed. London: Imperial College Press; 2006. 564 p.
- [5] O'Dwyer A. Handbook of PI and PID controller tuning rules, 3rd ed. Imperial College Press, 2009. 623 p.
- [6] Гамынин Н.С. Гидравлический привод систем управления. М.: Машиностроение, 1972. 376 с.
- [7] Циммерман В.В. Нелинейные свойства электрогидравлического вибрационного источника сейсмических колебаний // Проблемы нелинейной сейсмологии. ИФЗ АН СССР. М.: Наука, 1987. С. 273 – 279. [http://www.seisel.com/docs/i\\_nelsv.pdf](http://www.seisel.com/docs/i_nelsv.pdf).
- [8] Филипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. 616 с.
- [9] Теория автоматического управления. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / Под ред. А.А. Воронова. М.: Высш. шк., 1986.
- [10] Воронов А.А. Основы теории автоматического управления: Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем. М.: Энергия, 1980.
- [11] Лукас В.А. Теория автоматического управления. М.: Недра, 1990. 416 с.
- [12] Прокопьев А.П., Иванчура В.И., Емельянов Р.Т. Модель процесса управления скоростью движения катка // Решетневские чтения: материалы XVI междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М.Ф. Решетнева (7 – 9 ноября 2012, г. Красноярск): в 2 ч. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2012. Ч. 1, 458 с. (С. 268 – 269).