

## ИССЛЕДОВАНИЕ РОБАСТНОСТИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПОМ ЗАГРУЗКИ ШИХТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

**Быкова А. М., студ, Жукова Н. В., доц., к.т.н., доц.**

*(ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР)*

Общая постановка проблемы. Исходной информацией для рассматриваемой системы служит величина заданного уровня засыпи и текущие показания зондовых и радиоактивных уровнемеров, на основе которых определяются скорость схода шихты в печь и величина рассогласования действительного и заданного уровней засыпи. Управляющим воздействием является порция шихтовых материалов на горизонтальный конвейер в соответствии с изменением скорости схода шихты в доменную печь. Поскольку объект управления имеет большое транспортное запаздывание  $\tau$  и малую постоянную времени  $T$  такую, что  $\frac{\tau}{T} \gg 1$ , то авторами было предложено применить ПД – регулятор, а компенсацию времени запаздывания обеспечить за счет предиктора Смита [1]. Это позволило на основании прогнозируемой скорости схода шихты определить со значительным предварением требуемую производительность транспортера, и тем самым скомпенсировать большое запаздывание в системе загрузки [1].

При исследовании и моделировании данной системы управления имеет смысл представить процесс изменения скорости схода шихты как полигармонический с наложением широкополосного случайного шума. Такой процесс может быть достаточно точно представлен рядом Фурье:

$$v(t) = A_0 + 2 \sum_{m=1}^n \left[ A_m \cos\left(2\pi \frac{m}{T} t\right) + B_m \sin\left(2\pi \frac{m}{T} t\right) \right], \quad (1)$$

где  $A_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} v_i$ ;  $A_m = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} v_i \cos 2\pi \frac{m}{N} i$ ;  $B_m = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} v_i \sin 2\pi \frac{m}{N} i$ .

Если обозначить  $R_m = 2(A_m^2 + B_m^2)$  и  $R_0 = A_0^2$ , то дисперсия процесса скорости схода шихты  $v(t)$ , учитываемая одной гармоникой, равна  $\sigma_m^2 = \frac{R_m}{2}$ , а дисперсия, учитываемая различными гармониками, складываясь, дает общую дисперсию процесса  $\sigma^2$ . Периодическая функция  $v(t)$  довольно точно аппроксимируется этими гармониками [2], так что (1) может быть использована для прогноза будущих значений скорости схода шихты.

Таким образом, имеет смысл провести исследование динамики разработанной системы с учетом наложения случайных шумов на скорость схода шихты, а также с учетом шумов, действующих в цепи измерения на величину уровня шихты на колошнике. Это позволит оценить робастность спроектированного ПД-регулятора, а также дать рекомендации по величине диапазонов изменения параметров объекта управления.

Методика решения. Информация, поступающая от уровнемеров, в реальных условиях зашумлена. Данный сигнал поступает на ошибку рассогласования с неопределёнными помехами, интенсивность зашумления в основном зависит от мощности помех - дисперсии. Скорость схода шихты, является производной по уровню, она также зашумлена. Мощность шума (дисперсию) в цепи измерения выбирается исходя из погрешности уровнемеров – 0,1, а мощность помех, влияющие на скорость схода шихты – 0,13[2]. Схема моделирования САУ темпа загрузки шихты с учетом шумов (рис.1).

Промоделируем систему при начальных коэффициентах ПД-регулятора ( $K_p=0.83$ ,  $K_d=0.01$ ) (рис.2).

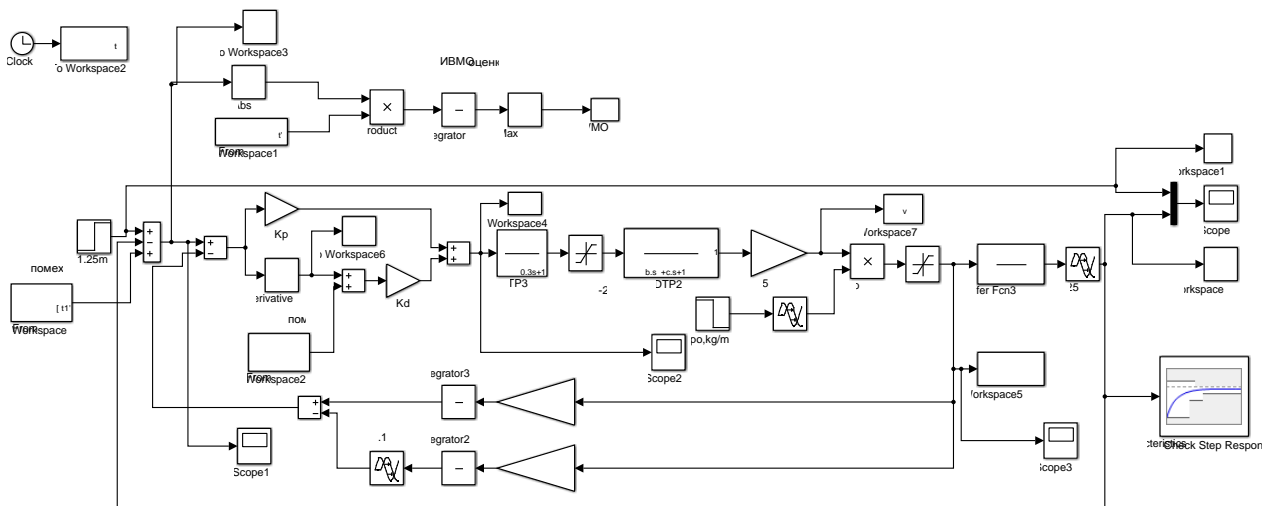


Рисунок 1 – Схема моделирования САУ величиной уровня засыпи на колошнике с предиктором Смита

Из рис. 2 видно, что с учетом шумов при номинальных параметрах объекта  $a=1.25$ ,  $b=0.7$ ,  $c=1.6$  имеет время переходного процесса 35 секунд, при худшем сочетании параметров  $a=1.75$ ,  $b=0.735$ ,  $c=1.68$  - 25секунд. При сочетании параметров  $a=0.75$ ,  $b=0.665$ ,  $c=1.52$  время регулирования составляет 45 сек. Во всех переходных процессах наблюдаются колебания на выходе системы, они превышают 2% критерий. Время регулирования во всех трех переходных процесса не удовлетворяет необходимому времени – желательно получить более затяжной процесс во всех случаях, несмотря на то, что процесс темпа загрузки должен происходить в пределах от 30 до 70 секунд, при разных уровнях засыпи шихты на колошнике. Как видно из рис. 2 при худшем сочетании параметров системы время регулирования выходит за установленные границы и не является робастной.

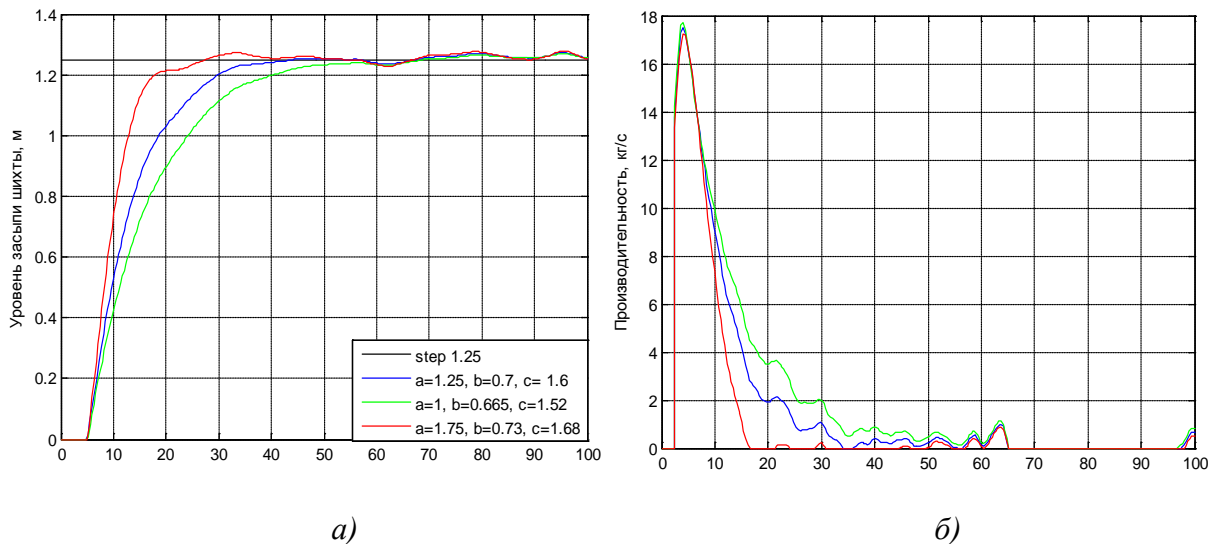


Рисунок 2 – а) переходные характеристики уровня засыпи на колошнике при изменении номинальных параметров объекта с учетом шумов; б) производительность транспортера

Следовательно, для обеспечения робастности и желаемого качества переходных процессов при изменении параметров системы и при влиянии на нее шумов используем инструментальный пакет CheckStepResponseCharacteristics (ранее называемый NCD). В качестве средства для достижения указанной цели принимается оптимизационный подход,

обеспечивающий минимизацию функции штрафа за нарушение динамических ограничений. При помощи данного инструмента можно настраивать параметры нелинейной Simulink-модели, в качестве которых может быть заявлено любое количество переменных, включая скаляры, векторы и матрицы. Особую значимость имеет то обстоятельство, что в процессе настройки могут учитываться неопределенности параметрического типа математической модели, что позволяет синтезировать робастные законы управления [3]. Данный модуль оптимизирует линейные и нелинейные системы управления автоматической подстройкой заданных параметров модели по ее реакции. Автоматическая оптимизация повышает точность и быстродействие систем, сокращает время проектирования систем управления [4].

Данный блок подключается на выход системы. Далее в настройках задаем время нарастания, в данном случае 45 сек., время установления – 70 сек, финальное значение -1.25 и перерегулирование 1%. Все параметры выбираем исходя из переходного процесса при номинальных параметрах системы. Далее нажимаем Response Optimization и задаем коэффициенты регулятора в DesignVars, предварительно заменив их буквенными значениями в PID-контроллере и дав им начальные значения, и переменные варьирования UncVars, также предварительно заменив их буквенными значениями в модели и инициализировав их номинальными параметрами системы. В данном случае, коэффициент  $a$  будет варьироваться в пределах от 1 до 1,75,  $b$  от 0,63 до 0,77,  $c$  от 1,44 до 1,76 (рис.1). При задании таких параметров, к сожалению, NCD не справился с поставленной задачей, поэтому были выбраны параметры, предложенные самим этим блоком: варьирование параметров  $c$  и  $b$  остались неизменными; параметр  $a$  стал варьироваться в пределах от 1,1 до 1,3.

Получены следующие результаты (рис.3): во всех случаях наблюдается более затяжной процесс, время регулирования при номинальных параметрах составило 55 сек., при худших 35 сек., в последнем случае 68 секунд. Колебания наблюдаются при всех сочетаниях параметров, однако они не превышают 2% критерия. Уменьшилась производительность, если раньше она составляла 170 кг/с, то при использовании оптимизатора составляет 111 кг/с. Параметры ПД-регулятора подстроенные блоком CheckStepResponseCharacteristics:  $K_p=0.54$ ,  $K_d=0.01$ . Из рис. 4 видно, при таких параметрах регулятора управляющее воздействие уменьшилось, если при начальных значениях максимальное управляющее воздействие достигало 1,1 В, то при  $K_p=0.54$ ,  $K_d=0.01$  не превышает 0,8 В. Ошибка рассогласования (рис.5) при  $K_p=0.54$ ,  $K_d=0.01$  стала больше.

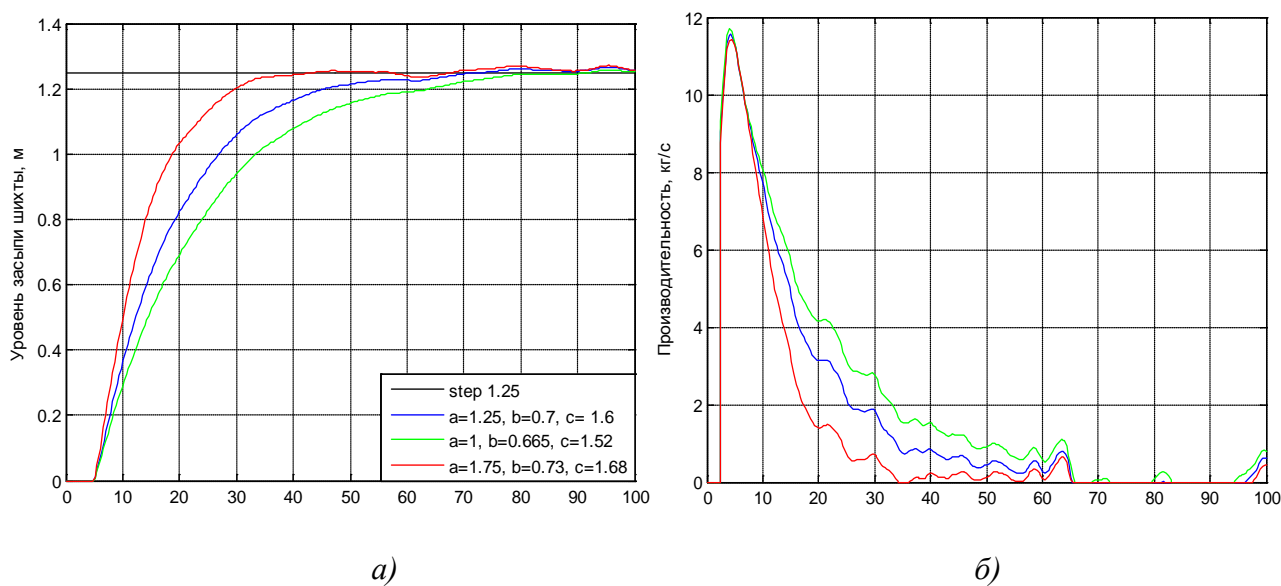


Рисунок 3 – а) переходные характеристики уровня засыпи на колошнике при изменении номинальных параметров объекта с учетом шумов с блоком CheckStep; б) производительность транспортера с блоком CheckStep

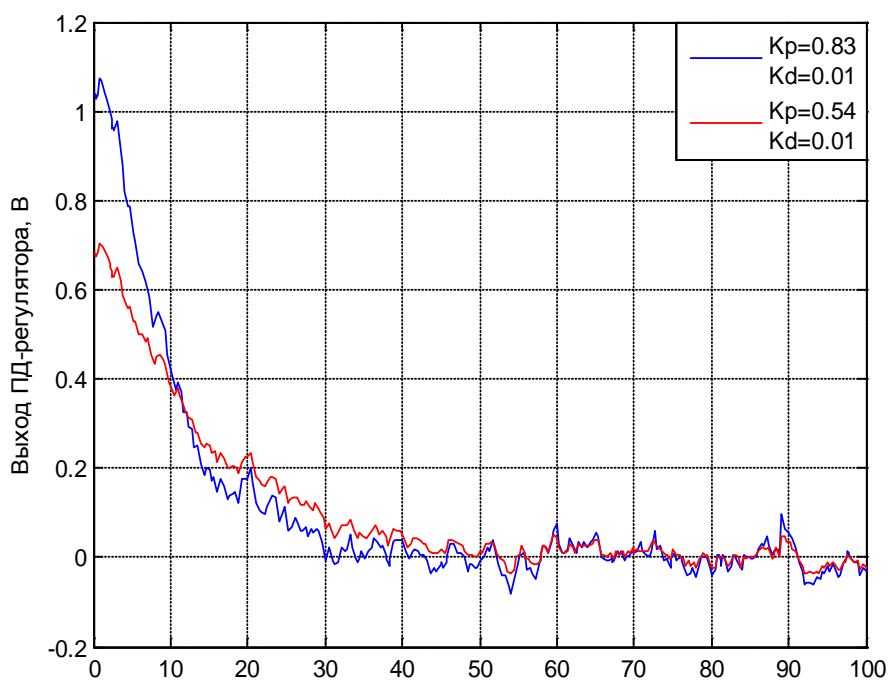


Рисунок 4 – Управляющее воздействие при разных коэффициентах регулятора

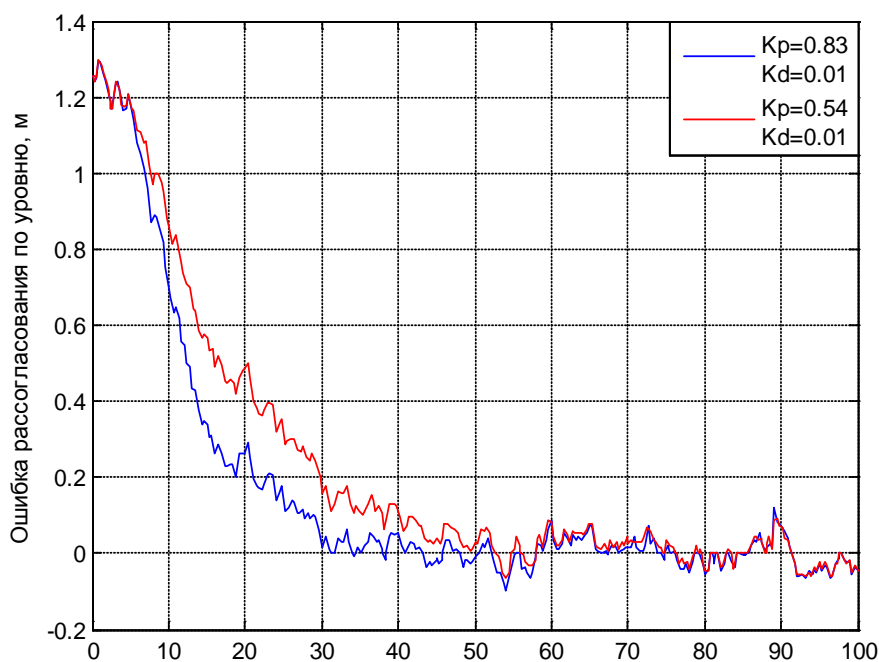


Рисунок 5 – Ошибка рассогласования при разных коэффициентах регулятора

Необходимо отметить, что выбранные коэффициенты ПД-регулятора, обеспечивающие робастность системы,  $K_p=0.54$ ,  $K_d=0.01$  были рассчитаны по критерию ИВМО. Эти коэффициенты минимизируют оценку ИВМО, при которых, система обладает удовлетворительной реакцией на единичное ступенчатое воздействие [5], (рис.5).

$$\text{ИВМО} = \int_0^T t|\varepsilon|dt \quad (2)$$

Исходя из рис. 6 ошибка по критерию ИВМО при коэффициентах ПД-регулятора  $K_p=0.54$ ,  $K_d=0.01$  составляет  $1,93 \cdot 10^{-27}$ .

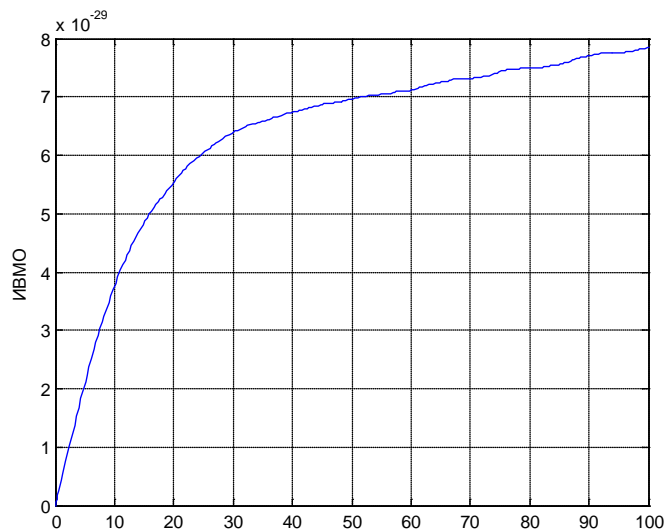


Рисунок 6 – Оценка ИВМО при  $K_p=0.54$ ,  $K_d=0.01$

#### Выводы.

1. Проведено моделирование системы автоматического прогнозного управления темпом загрузки доменной печи. Процесс изменения скорости схода шихты представлен как полигармонический с наложением широкополосного случайного шума с дисперсией равной 0,13. При моделировании также учтена погрешность в цепи измерения от датчиков уровня шихты на колошнике с дисперсией 0,1, а также возможные изменения параметром объекта управления в процессе загрузки. Это позволило эмитировать условия неопределенности для рассматриваемой системы с целью анализа робастности спроектированного регулятора и условий ограничений функционирования последнего.

2. Результаты моделирования показали, что при изменении параметров объекта на 5% и 20% исходная система не обеспечивает требуемые показатели качества регулирования, в частности время регулирования при разных сочетания параметров объекта изменялось от 25 до 45 секунд, а также наблюдалась значительные колебания на выходе системы.

3. Для обеспечения свойств робастности, исходные параметры ПД-регулятора ( $K_p=0.83$  и  $K_d=0.01$ ), рассчитанные по критерию минимума интеграла от взвешенного модуля ошибки, были оптимизированы с использованием пакета прикладных программ CheckStepResponseCharacteristics. При этом время переходного процесса не превысило допустимых границ от 35 до 70с, статическая ошибка на выходе системы при всех сочетаниях параметров не превышала 2 %. При коэффициентах ПД-регулятора  $K_p=0.54$  и  $K_d=0.01$  система является робастной, обеспечивает требуемые показатели качества регулирования.

#### Перечень ссылок

1. Быкова А.М. Исследование динамики системы автоматического управления темпом загрузки шихты доменной печи. / А.М. Быкова, Н.В. Жукова. Завалишинские чтения: молодежная секция. Сб. докл. СПб.: ГУАП, 2016. – 210 с. С.21-23.

2. Глинков Г.М. АСУ Технологическими процессами в агломерационных и сталеплавильных цехах: учебник для вузов / Глинков Г.М. , Маковский В.А. М.: Металлургия , 1981. - 360 с.

3. Веремей Е.И. Пособие "NonlinearControlDesignBlockset" [Электронный ресурс]: Материалы по продуктам MATLAB & Toolboxes./ Веремей Е.И, Погожев С.В. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/nonlinecondes/book1/preface.php>

4. Dr. BobDavidov. Автоматическая оптимизация Simulink моделей и регуляторов [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://portalnp.ru/wpcontent/uploads/2013/10/05.01\\_MATLAB.-Simulink-Response-Optimization\\_Ed\\_2.pdf](http://portalnp.ru/wpcontent/uploads/2013/10/05.01_MATLAB.-Simulink-Response-Optimization_Ed_2.pdf)

5. Дорф Р. Современные системы управления / Дорф Р., Бишоп Р. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. - 832 с.: ил.