

УДК 681.5:681.3

В.Ф. СИМОНОВ, И.Ю. ДЫБСКАЯ, Т.В. СЕМЕНИШИНА*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

ОПТИМАЛЬНАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ТОЛЩИНЫ ПОЛОСЫ ПРОКАТА

Проведен синтез и анализ системы стабилизации толщины полосы проката. Используется принцип автоматического управления по отклонению. Выбран пропорционально-дифференциальный закон. Повышены быстродействие и запасы устойчивости системы и уменьшена статическая ошибка по возмущающему воздействию. Помимо пропорционально-дифференциального закона управления для системы стабилизации реализованы пропорциональный и пропорционально-интегрирующий законы управления для сравнения полученных результатов. Произведен синтез корректирующего устройства с помощью построения логарифмической амплитудно-частотной характеристики. Выполнено полунатурное моделирование САС, для чего были введены масштабы и рассчитаны коэффициенты модели. Получены статические и переходные характеристики системы. Выполнена оптимизация системы автоматической стабилизации по критерию минимального расхода энергии с использованием сеточного метода решения интегральных уравнений.

Ключевые слова: *полоса проката, цифровой регулятор, быстродействие, стабилизация толщины проката, классические методы синтеза, оптимальное по минимальному расходу энергии управление.*

Введение

В последние годы требования к качеству тонколистового проката резко возросли, поскольку ужесточилась конкурентная борьба на мировом рынке производителей сталей. Причем приоритет исследований по повышению качества направлен на разработку технологий производства проката с высокой плоскостностью и минимальной разнотолщинностью. Для создания конкурентоспособной авиационной продукции необходимым условием является высокий уровень научно-технических разработок для технологического обеспечения авиационного производства [1]. За последние 50 лет использование прогрессивных технологий при управлении толщиной прокатного стана позволило улучшить точность толщины листа на 2 порядка [2]. Но при этом остаются актуальными вопросы минимизации энергетических затрат при стабилизации толщины, что связано с эффективностью производства, в частности, корпусных деталей авиационных двигателей.

Большая часть отходов металла при прокатке на непрерывных станах является следствием разнотолщинности полос. Поэтому основное внимание при автоматизации непрерывных станов уделяется вопросам сокращения разнотолщинности. Система автоматической стабилизации толщины полосы проката непрерывного стана прокатки предназначена для поддержания заданной толщины полосы при

прокате. Кроме того, непрерывный стан холодной прокатки является одним из наиболее сложных технологических агрегатов, управление которым требует высокой квалификации персонала. Системы автоматического управления предназначены для повышения производительности станов, улучшения качества продукции и облегчения труда персонала [3].

В настоящее время для обеспечения необходимой точности, увеличения быстродействия и получения значительной экономии металла разработаны различные системы автоматического регулирования толщины проката. Так для экономии металла в размере 2...3% от общего объема производства всесоюзным научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом металлургического машиностроения (ВНИИметмашем) при участии Уралмашзавода и НИИ автоматизации чёрной металлургии создана система автоматического регулирования толщины и натяжения полосы на станах холодной прокатки, которая позволяет вести прокатку в отрицательном поле допусков [4]. С целью расширения диапазона регулирования и повышения точности разработана двухканальная система регулирования толщины, совмещающая два метода [3]. Для повышения быстродействия и устойчивости системы автоматического регулирования толщины полосы, предложенной А.Я. Лернером [5], предусматриваются воздействия по первой и второй производным от перемещения. Задача повышения точности автоматического регулирования толщины

полосы проката решается в работе [6]. Использование данного способа автоматического регулирования толщины полосы проката позволит уменьшить погрешность автоматического регулирования на 6%, увеличить выпуск проката с минусовым допуском на 0,5 % на 80% длины полосы.

Очевидно, что целесообразно продолжение работ в направлении разработки новых методов стабилизации толщины проката. В связи с наступившим промышленным кризисом требуется применение энергосберегающих технологий, поэтому была проведена оптимизация системы стабилизации по критерию оптимальной энергии, что позволяет значительно снизить энергетические затраты на управление.

Постановка задачи

Система автоматической стабилизации (САС) толщины полосы проката позволяет поддерживать заданную толщину листа при непрерывном прокате. Для решения этой задачи используется принцип автоматического управления по отклонению. Полоса проката подается с определенной скоростью. Скорость подачи измеряется и стабилизируется во внутреннем контуре системы автоматического управления. Толщина проката изменяется с помощью рабочих валков, которые непосредственно воздействуют на металлический лист. Толщина прокатываемой полосы измеряется бесконтактным измерителем толщины. Для выбранной системы автоматического управления был выбран пропорционально-дифференциальный закон управления, который описывается уравнением следующего вида:

$$U_{\text{упр}}(t) = k_{\Pi} \varepsilon(t) + k_{\text{Д}} \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (1)$$

где k_{Π} и $k_{\text{Д}}$ – соответствующие коэффициенты преобразования;

$\varepsilon(t)$ – отклонение;

$U_{\text{упр}}(t)$ – сигнал управления.

С его помощью необходимо повысить быстродействие и запасы устойчивости системы и уменьшить статическую ошибку по возмущающему воздействию.

С целью обеспечения требуемых показателей качества требуется произвести синтез корректирующего устройства с помощью построения логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ). Синтез состоит из трех этапов: 1) построение ЛАЧХ нескорректированной системы – располагаемой ЛАЧХ; 2) построение желаемой ЛАЧХ; 3) определение структуры и параметров последовательного корректирующего устройства.

Систему управления, обеспечивающую наилучшие, в определенном смысле, показатели качест-

ва ее работы при заданных условиях, называют оптимальной [7].

Среди оптимальных систем управления особое значение имеют системы, оптимальные по расходу энергии.

Задача оптимизации управления по расходу энергии заключается в выборе допустимой траектории, при которой изображающая точка переходит из начального состояния в требуемое при минимальных энергетических затратах.

Рассмотрен алгоритм построения оптимальных программных управлений с использованием сеточного метода решения интегральных уравнений. Задача о минимальном расходе энергии сводится к минимизации следующего критерия оптимальности:

$$J(u) = \int_0^T u^2(t) dt \rightarrow \min_u \quad (2)$$

при следующих ограничениях:

$$\begin{aligned} X^0 &= [x_1(0) \quad x_2(0)]^T; \\ X^T &= [x_1(T) \quad x_2(T)]^T. \end{aligned} \quad (3)$$

Ограничения типа неравенств отсутствуют.

Анализ и синтез системы стабилизации толщины полосы проката

Кинематическая схема объекта управления (ОУ) представлена на рис. 1.

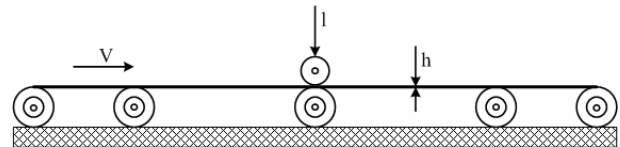


Рис. 1. Кинематическая схема ОУ: l – линейное перемещение рабочих валков, мм; V – скорость движения ленты, м/с; h – толщина проката, мм

Функциональная схема ОУ представлена на рис. 2.

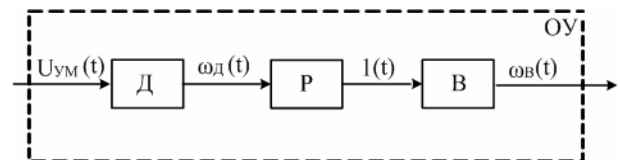


Рис. 2. Функциональная схема ОУ: Д – двигатель; Р – редуктор; В – рабочие валки; $U_{\text{ум}}(t)$ – напряжение усилителя мощности, В; $\omega_{\text{д}}(t)$ – угловая скорость вращения двигателя, рад/с; $l(t)$ – перемещение редуктора, мм; $\omega_{\text{в}}(t)$ – угловая скорость вращения валков, об/с

Двигатель с передаточным механизмом служит для приведения в движение рабочих валков. Совокупность этих элементов представляет собой электропривод, который и является объектом управления.

Объект управления по линейному перемещению находится на границе устойчивости, а по скорости линейного перемещения является устойчивым.

При проектировании системы управления часть системы выбрана. Это объект управления, усилитель мощности, исполнительный механизм, датчики. К системе предъявляются требования в виде набора показателей качества. При синтезе системы управления возможно применять следующие методы:

- синтез систем при помощи корневого годографа;
- синтез систем при помощи ЛАФЧХ;
- синтез систем модального управления;
- синтез систем машинными методами.

Также необходимо определить, какое корректирующее устройство следует ввести в систему для обеспечения выполнения предъявляемых требова-

ний к качеству управления. Для цифровых САС существуют следующие методы коррекции:

- коррекция ЦСАУ с помощью непрерывных корректирующих устройств;
- коррекция ЦСАУ с помощью импульсного фильтра;
- коррекция ЦСАУ с помощью микроконтроллера.

В данной работе рассматривается коррекция цифровой системы управления с помощью микроконтроллера. Для заданной системы управления выбран пропорционально-дифференциальный (ПД) закон управления. С его помощью увеличиваются быстродействие и запасы устойчивости системы.

Функциональная схема системы с корректирующим устройством представлена на рис. 3.

Синтез корректирующего устройства был произведен с использованием логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ).

Переходный процесс скорректированной системы представлен на рис. 4.

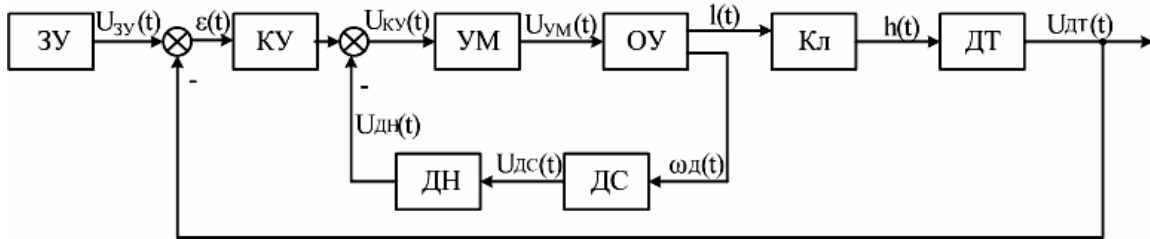


Рис. 3. Функциональная схема системы с корректирующим устройством: ЗУ – задающее устройство; КУ – корректирующее устройство; УМ – усилитель мощности; Кл – клеть проката; ДС – датчик скорости; ДТ – датчик толщины; ДН – делитель напряжения; $U_{ЗУ}(t)$ – напряжение задающего устройства, В; $\varepsilon(t)$ – сигнал рассогласования, В; $U_{КУ}(t)$ – напряжение корректирующего устройства, В; $h(t)$ – действительная толщина, мм; $U_{ДС}(t)$ – напряжение датчика скорости, В; $U_{ДТ}(t)$ – напряжение датчика толщины, В; $U_{ДН}(t)$ – напряжение делителя напряжения, В

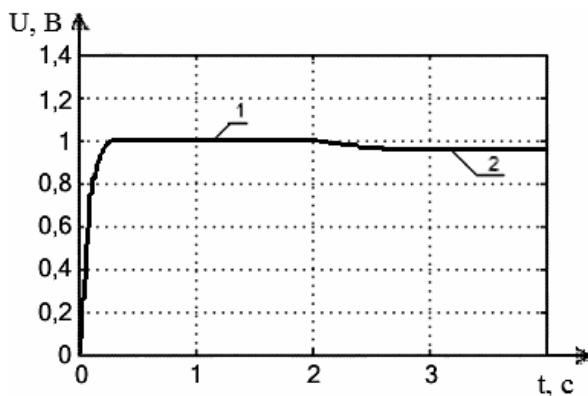


Рис. 4. Переходные процессы скорректированной системы: 1 – переходный процесс по задающему воздействию; 2 – переходный процесс по возмущающему воздействию

Как видно из рис. 4, получены следующие показатели качества: статическая ошибка по возмущающему воздействию 1%; время переходного процесса 0,3 с; перерегулирование 0%.

Частотные характеристики разомкнутой скорректированной системы с цифровым корректирующим устройством представлены на рис. 5, 6.

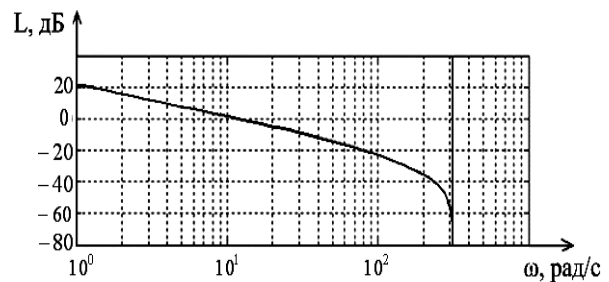


Рис. 5. ЛАЧХ разомкнутой САС

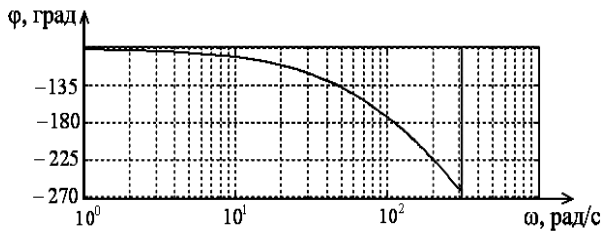


Рис. 6. ЛФЧХ разомкнутой САС

Как видно из рис. 5 и рис. 6, запасы устойчивости равны:

- запас устойчивости по амплитуде $L_3 = 22$ дБ;
- запас устойчивости по фазе $\varphi_3 = 80$ град.

Частотные характеристики замкнутой скорректированной системы с цифровым корректирующим устройством представлены на рис. 7 и рис. 8.

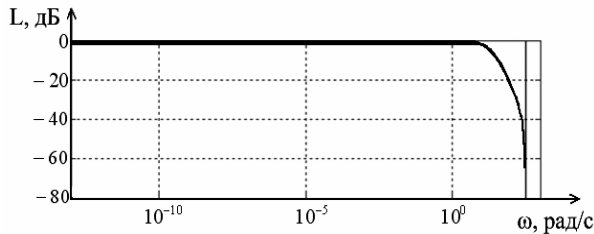


Рис. 7. ЛАЧХ замкнутой САС

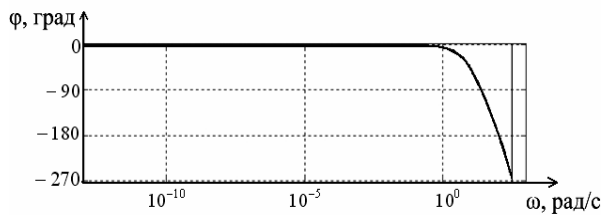


Рис. 8. ЛФЧХ замкнутой САС

Как видно из рис. 7 и 8, были определены следующие показатели качества:

- показатель колебательности $M = 0$;
- полоса пропускания 42,5 рад/с;
- статическая ошибка по задающему воздействию 0.

Для системы управления, помимо ПД-закона управления реализованы пропорциональный (П) и пропорционально-интегральный (ПИ) законы управления. Для реализации пропорционально-интегрирующего закона управления ввели в контур системы интегрирующее звено. Для каждой системы провели синтез корректирующего устройства. Переходные характеристики систем представлены на рис. 9.

Как видно из графиков система с ПД законом управления имеет наилучшие показатели качества.

У системы с П-законом управления установившаяся ошибка больше 1%, и в отличие от пропорционально-дифференциального закона управления имеется перерегулирование – 1%. У системы с ПИ-законом установившаяся ошибка по возмущающему воздействию равна нулю, время переходного процесса составляет 5 секунд и присутствует перерегулирование – 38%. Выбираем пропорционально-дифференциальный закон управления.

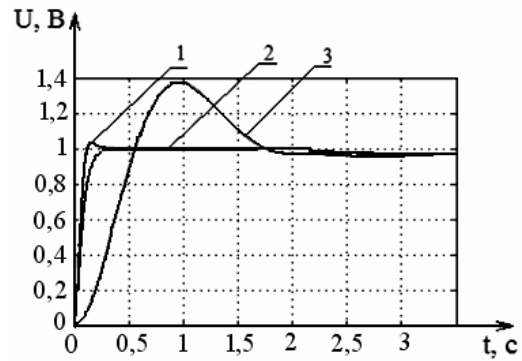


Рис. 9. Переходные характеристики систем: 1 – переходная характеристика с П-законом управления; 2 – переходная характеристика с ПД-законом управления; 3 – переходная характеристика с ПИ-законом управления

Проведено полунатурное моделирование спроектированной САС. Получены статические (рис. 10) и переходные (рис. 11) характеристики.

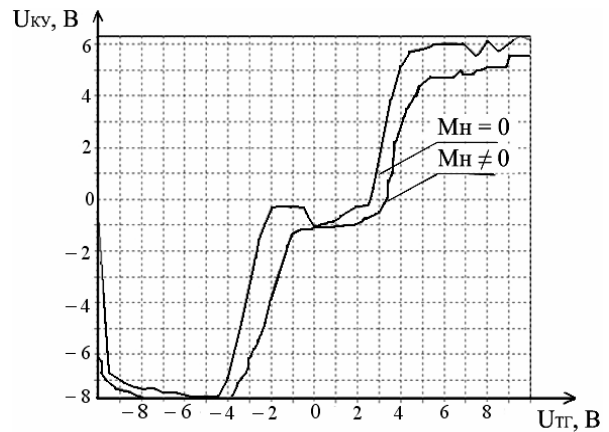


Рис. 10. Регулировочные статические характеристики замкнутой САС: M_n – возмущающее воздействие

Из рис. 11 определены следующие показатели качества:

- статическая ошибка по возмущающему воздействию 0,1 В;
- время переходного процесса 0,3 с;
- перерегулирование 0%.

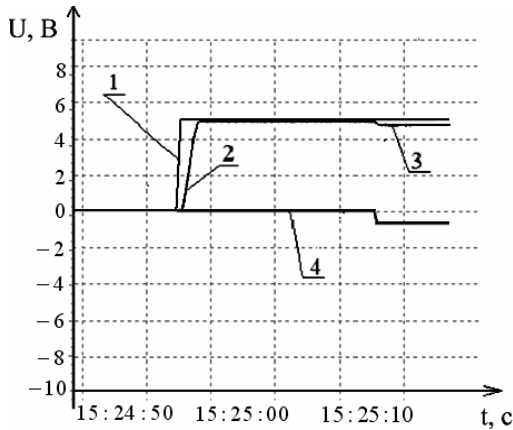


Рис. 11. Переходные характеристики замкнутой САС: 1 – задающее воздействие; 2 – переходная характеристика САС по задающему воздействию; 3 – переходная характеристика САС по возмущающему воздействию; 4 – возмущающее воздействие

Оптимизация системы автоматической стабилизации толщины проката

Рассмотрим алгоритм построения оптимальных программных управлений с использованием сеточного метода решения интегральных уравнений [8].

Передаточная функция управляемого объекта представлена в виде:

$$W(s) = \frac{U_{дТ}(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{75}{0,53s^2 + 1,73s} \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение объекта, соответствующее передаточной функции (4), имеет вид:

$$\frac{d^2 U_{дТ}(t)}{dt^2} + 3,3 \frac{dU_{дТ}(t)}{dt} = 141 \cdot \varepsilon(t) \quad (5)$$

Вводим переменные состояния и получаем систему уравнений в виде:

$$\begin{cases} \dot{U}_{дТ1}(t) = U_{дТ2}(t); \\ \dot{U}_{дТ2}(t) = -3,3 \cdot U_{дТ2}(t) + 141 \cdot \varepsilon(t), \end{cases} \quad (6)$$

которую можно записать в векторной форме:

$$\dot{U}_{дТ}(t) = A \cdot U_{дТ}(t) + B \cdot \varepsilon(t), \quad (7)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -3,3 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 141 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Итак, при заданном уравнении объекта управления (6), отсутствии ограничений на управление $u(t)$ и заданных краевых условиях

$$\begin{aligned} X^0 &= [0 \quad -0,003]^T; \\ X^T &= [0 \quad 0]^T, \end{aligned} \quad (9)$$

времени управления $T = 4$ с находим требуемое

управление $u(t)$ и фазовые траектории $x_1(t), x_2(t)$ (рис. 11), при которых заданный функционал качества

$$J(u) = \int_0^T u^2(t) dt \rightarrow \min_u \quad (10)$$

Для нахождения $u(t), x_1(t), x_2(t)$ перейдем от системы дифференциальных уравнений в форме Коши (6) к векторно-матричному интегральному уравнению Вольтера 2-го рода. Для данной системы имеем [9]:

$$\begin{cases} k_X(t, \tau) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} 1(t); \\ k_U(t, \tau) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} 1(t). \end{cases} \quad (11)$$

Конечномерный эквивалент для объекта управления (6) с использованием сеточно-матричного оператора системы можно записать следующим образом [9]:

$$\hat{X} = A \hat{X} B \hat{U} + A \hat{X} \hat{X}^0 \quad (12)$$

Теперь постановка задачи в терминах математического программирования формулируется следующим образом:

$$J(\hat{U}) = h \sum_{k=1}^N \beta_k (u(t_k))^2 \rightarrow \min_{\hat{U}} \quad (13)$$

$$\beta_k = \begin{cases} 0,5, & k = 1; \\ 1, & k = 2, N-1; \\ 0,5, & k = N \end{cases} \quad (14)$$

при ограничениях типа равенств (11) на начальное состояние объекта управления.

Параметризованный эквивалент конечных условий можно записать следующим образом:

$$X^T = \begin{bmatrix} x_1(t_N) = 0 \\ x_2(t_N) = 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Ограничения на управление и фазовые координаты не накладываются.

При решении конечномерной оптимизационной задачи воспользовались пакетом Optimization Toolbox многофункциональной интегрированной системы автоматизации математических и научно-технических расчетов Matlab 6.5. Поиск экстремума нелинейной функции многих переменных при наличии ограничений в данной системе реализован функцией fmincon. Линейные ограничения типа равенств и типа неравенств при вызове функции fmincon представлены в виде

$$A_{eq} x = B_{eq}, \quad A_{ue} x \leq B_{ue}, \quad (16)$$

где x – вектор оптимизируемых параметров;

$A_{eq}, A_{ue}, B_{eq}, B_{ue}$ – матрицы и векторы линейных

ограничений типа равенств и типа неравенств соответственно.

Результаты построения оптимального про-

граммного управления ($x_1(t) = \Delta l$, $x_2(t) = \omega_D$) с использованием сеточного метода решения интегральных уравнений приведены на рис. 12.

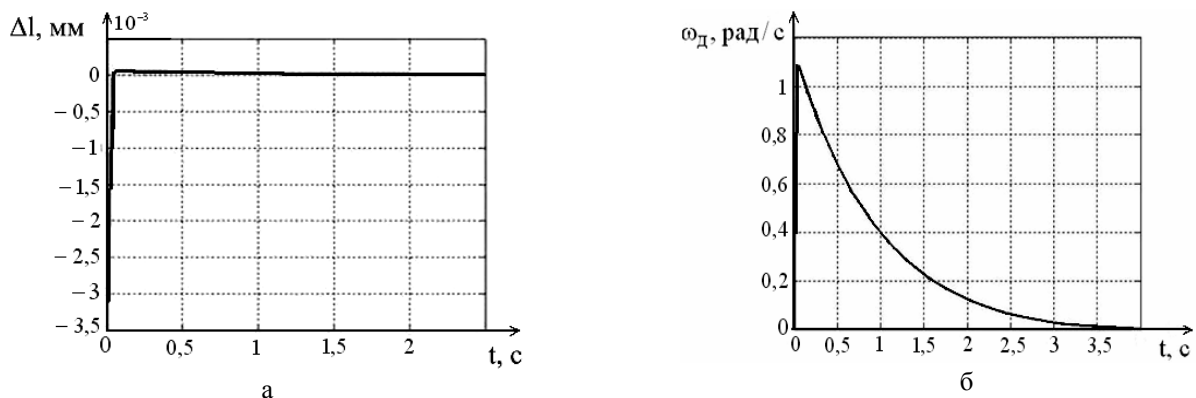


Рис. 12. Графики функций: а – отклонение от заданного значения; б – угловая скорость вращения двигателя

Как видно из рис. 12, а оптимальная система обрабатывает отклонение медленнее, чем система с цифровым ПД-регулятором. Полная компенсация возмущающего воздействия в оптимальной системе происходит за 1,2 с, а в системе с цифровым регулятором за 0,3 с. Но, как видно из рис. 13, оптимальная система по критерию минимального расхода энергии имеет намного меньшие энергетические затраты, чем система с цифровым ПД-регулятором.

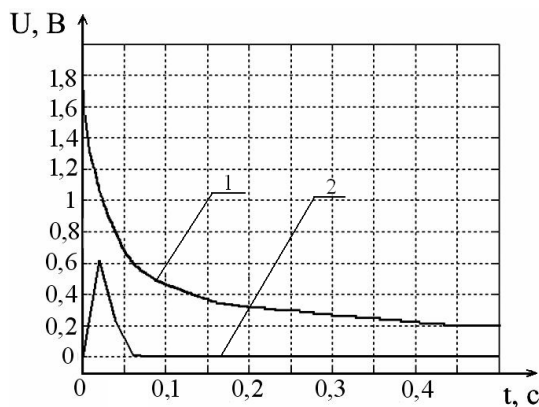


Рис. 13. Результат сравнения системы с цифровым ПД-регулятором (1) и оптимальной системы по критерию минимальной энергии (2)

Заключение

Рассмотрена задача стабилизации толщины полосы проката с целью поддержания заданной толщины. Выбран первичный закон управления, который предусматривает увеличение быстродействия и запасов устойчивости, синтезировано цифровое корректирующее устройство с помощью логарифмической амплитудно-частотной характеристики.

Проведено полунатурное моделирование САС, получены регулировочные статические и переходные характеристики системы. Определены показатели качества: статическая ошибка составляет 1%, время переходного процесса составляет 0,3 с, перерегулирование отсутствует.

Проведена оптимизация системы автоматической стабилизации по критерию минимальной энергии с использованием сеточного метода решения интегральных уравнений. В оптимальной системе существенно сокращается расход энергии на управление (в четыре раза).

Дальнейшие исследования предусматривают проведение анализа системы стабилизации толщины проката с учетом внешних и внутренних (параметрических) возмущений, а также с использованием интегрально-квадратичного критерия качества.

Литература

1. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребен, М.Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2004. – 991 с.
2. Интегрированные технологии – основа создания конкурентоспособных авиационных двигателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.wing.com.ua/content/view/4513/52/>.
3. Тимофеев Б.Б. Системы и средства автоматического управления непрерывными станами горячей прокатки / Б.Б. Тимофеев, И.Н. Богаенко. – К.: Киевский ин-т автоматики, 1981. – 256 с.
4. Лысенко Н.Г. Адаптивная система автоматизации коррекции толщины полосы / Н.Г. Лысенко, Е.В. Леонидов, Н.Г. Ковалев // Разработка и внедрение АСУ прокатными станами: тезисы докладов к конф. и совещ. – М.: Министерство приборостроения, средств автоматизации и систем управления, 1975. – С. 119 – 197.

5. Милич М.Б. Применение вычислительных машин в автоматическом управлении прокатными станами за рубежом / М.Б. Милич, А.А. Фингер. – М.: Отделение ВНИИЭМ по научно-технической информации в электротехнике, 1969. – 278 с.

6. Пат. 710707 СССР, МПК⁷ В 21 В 37/12. Способ автоматического регулирования толщины проката / Давыдов А.А., Шишкинский В.И., Прокошин И.В.; Заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский институт автоматизации черной металлургии – №2560118/22-02; заявл. 27.12.77; опубл. 25.01.80, Бюл. № 3. – 3 с.

7. Соколов Ю.Н. Компьютерный анализ и

проектирование систем управления: ч. 3. Оптимальные системы управления / Ю.Н. Соколов. – Х.: Харьковский авиационный институт, 2006. – 272 с.

8. Матричные методы расчета и проектирования сложных систем автоматического управления для инженеров / К.А. Пупков, Н.Д. Егунов, Ю.Л. Лукашенко, Д.В. Мельников, В.М. Рыбин, А.И. Трофимов. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 661 с.

9. Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления / К.А. Пупков, Н.Д. Егунов. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 744 с.

Поступила в редакцию 24.04.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры автоматики и управления в технических системах А.И. Рогачев, Национальный технический университет „Харьковский политехнический институт”, Харьков.

ОПТИМАЛЬНА СИСТЕМА СТАБІЛІЗАЦІЇ ТОВЩИНИ СМУГИ ПРОКАТУ

В.Ф. Симонов, І.Ю. Дибська, Т.В. Семенішина

Проведений синтез та аналіз системи стабілізації товщини смуги прокату. Використовується принцип автоматичного управління за відхиленням. Вибраний пропорційно-диференціальний закон управління. Підвищені швидкодія і запаси стійкості системи і зменшена статична помилка за збурювальною дією. Крім пропорційно-диференціального закону управління для системи стабілізації реалізовані пропорційний і пропорційно-інтегруючий закони управління для порівняння отриманих результатів. Проведений синтез коректувального пристрою, за допомогою побудови логарифмічної амплітудно-частотної характеристики. Виконано напівнатурне моделювання САС, для чого були введені масштаби і розраховані коефіцієнти моделі. Отримані статичні та перехідні характеристики системи. Виконана оптимізація системи автоматичної стабілізації за критерієм мінімальної витрати енергії з використанням сіткового методу вирішення інтегральних рівнянь.

Ключові слова: смуга прокату, цифровий регулятор, швидкодія, стабілізація товщини прокату, класичні методи синтезу, оптимальне за мінімальною витратою енергії управління.

OPTIMAL STABILIZATION SYSTEM OF THE ROLLING PLATE GAGE

V.F. Symonov, I.Y. Dybska, T.V. Semenishina

Synthesis and analysis of stabilization system of the rolling plate gage is carried out. Principle of automatic control on a deviation is utilized. The proportionally-differential law of control is chosen. The swiftness and stability margins of the system are improved and a steady-state error on disturbing actions is reduced. Besides the proportionally-differential control law for the stabilization system the proportional and proportionally integrating control laws are realized, for comparison of the got results. The synthesis of compensating device is performed, by the plotting of logarithmic gain-frequency characteristic. The seminatural design of ASS is executed, for what scales are entered and model coefficients are calculated. Static and step responses of the system are got. Optimization of the stabilization system of the rolling plate gage on the criterion of minimum energy with the use of net method of integral equations solution is executed.

Key words: rolling plate, digital regulator, swiftness, stabilization of the rolling plate gage, classic methods of synthesis, optimal control based on minimizing energy.

Симонов Владимир Федорович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем управления летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Дыбская Ирина Юрьевна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем управления летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: irinadyb@gmail.com..

Семенішина Татяна Валерьевна – студентка 5-го курса факультета систем управления летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: tatiana_vs_@mail.ru.