

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫМИ НАЖИМНЫМИ ВАЛКАМИ УНИВЕРСАЛЬНОГО РЕЛЬСОБАЛОЧНОГО ПРОКАТНОГО СТАНА ПО КВАДРАТИЧНОМУ КРИТЕРИЮ КАЧЕСТВА

Рафиков Г. Ш., Тимонов А. В.

Донецкий национальный технический университет, кафедра АТ

Abstract

Rafikov G., Timonov A. Optimum control of universal rail-beam rolling mill interconnected stands on square-law quality criterion. The complete mathematical model of multiconnected and multivariable control object, which is a rail-beam rolling mill stand, is developed. The linear square-law criterion of qualities, which allow to minimize variations in the output beam thickness on both axes and to minimize energy expenses is chosen. For control the stand drives the synthesis of a regulator, which consists of the linear square-law regulator and the Kalman estimator, is made.

Особенностью современного развития прокатного производства является переход к непрерывным процессам прокатки. Это позволяет существенно увеличить производительность прокатных станов и качество их продукции. Обеспечение непрерывной схемы прокатки требует существенного повышения уровня автоматизации технологических процессов и обеспечения оптимальности управления.

Актуальность проблемы управления состоит в том, что применяемые в настоящее время промышленные регуляторы в большинстве случаев не обеспечивают оптимальных режимов работы прокатных станов.

На станах с реверсивной прокаткой полный расчет режимов обжатий в универсальных клетях по моделям в темпе с процессом прокатки как правило не производится ввиду сложности математических моделей трехмерной деформации металла, не позволяющих реализовать управление в реальном масштабе времени. Поэтому наиболее широкое применение получило управление режимами обжатий по заранее рассчитанным технологами жестким программам режимам прокатки.

Исследования режимов обжатий в клетях универсального балочного стана при реверсивной прокатке двутавров показали в ряде случаев [1] необходимость оперативного учета факторов, связанных с изменяющимися пластическими свойствами металла, износом валков и т.д., которые не могут быть учтены при жестком программном управлении. При этом за счет вносимых в программы обжатий коррекций [2] можно осуществить выпуск проката в суженном поле допусков, увеличить стабильность получаемых геометрических размеров двутавров, увеличить выход мерных длин, сократить простои оборудования и расход валков.

Методы и приемы оптимизации управления в реальном масштабе времени трудно реализуемы, поэтому системы управления оптимизируются, как правило, на этапе синтеза. Процедура оптимального синтеза системы автоматического управления в общем случае направлена на разработку структуры и алгоритмов, наилучшим образом отвечающих требованиям к точности, колебательности и быстродействию переходных процессов, экономичности управления. Эти требования формализуются в виде задачи минимизации интегральных квадратичных функционалов качества [3]. Такая задача может быть решена с помощью принципа максимума Понтрягина, методов классического вариационного исчисления, динамического программирования и других.

Прокатный стан предназначен для формирования профилей прямоугольного

сечения из нагретых металлических заготовок – блюмов. Желаемый профиль обеспечивается с помощью прокатных валков, как показано на рис.1:

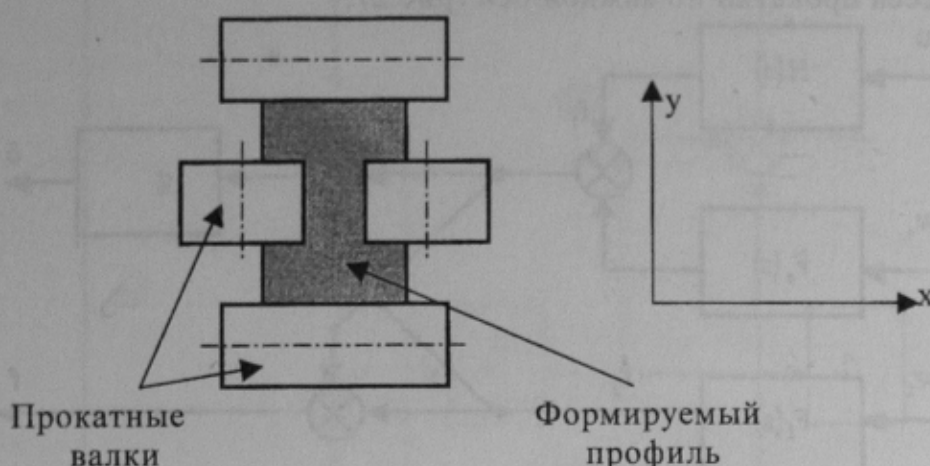


Рисунок 1 – Формирование профиля прямоугольного сечения

Желаемая форма выдавливается из заготовки двумя парами цилиндрических валков (по одной на каждую из геометрических осей), которые перемещаются с помощью гидравлических приводов.

Цель управления – обеспечить постоянство толщины проката по осям x и y в пределах заданных допусков. Отклонения в толщине профиля могут быть вызваны двумя причинами: вариацией толщины и твердости заготовки и наличием эксцентриситета прокатных валков.

Для того чтобы уменьшить влияние этих возмущений, необходимо регулировать величину зазора за счет введения контура обратной связи. Поскольку зазор между валками измерить сложно, то вместо измерения толщины профиля измеряется сила нажатия валков.

Отклонение толщины заготовки от номинального моделируется возмущением в виде “белого” шума w_i , пропущенного через фильтр низких частот с передаточной функцией [4]

$$F_i(s) = \frac{K_{Fi}}{T_{Fi}s + 1}, \quad (1)$$

где K_{Fi} – коэффициент усиления;

T_{Fi} – постоянная времени.

Возмущение, связанное с эксцентриситетом валков, – это функция, близкая к периодической, с частотой, равной частоте вращения валков. Приемлемая модель – возмущенный “белым” шумом w_e сигнал на выходе полосового фильтра второго порядка с передаточной функцией

$$F_e(s) = \frac{K_{Fe}s}{T_{Fe}^2 s^2 + 2\xi_{Fe} T_{Fe} s + 1}, \quad (2)$$

где K_{Fe} – коэффициент усиления;

T_{Fe} – постоянная времени;

ξ_{Fe} – коэффициент затухания.

На основе этих допущений можно построить следующую структурную схему для модели процесса прокатки по каждой оси (рис.2).

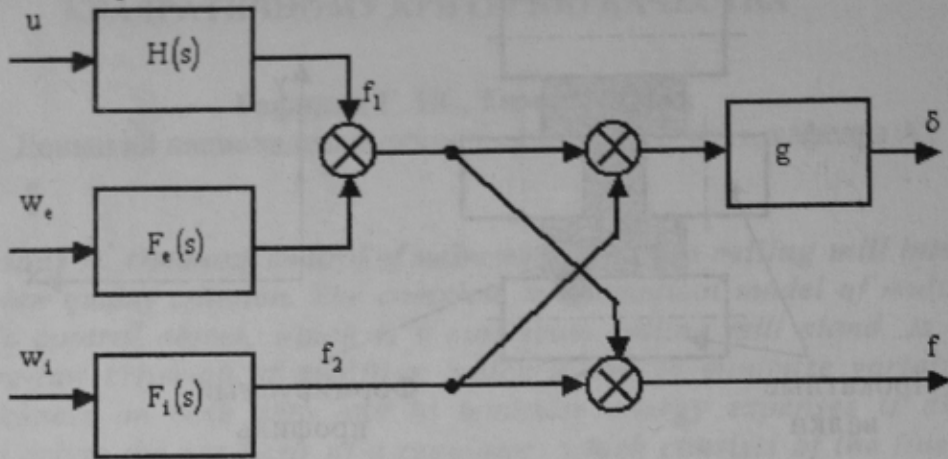


Рисунок 2 – Структурная схема процесса прокатки по одной координатной оси

Здесь u – управление, δ – отклонение величины зазора от номинального (мм), f – отклонение силы нажатия валков от номинальной, g – коэффициент передачи, w_e , w_i – “белые” шумы, имитирующие возмущения, $H(s)$ – передаточная функция гидропривода:

$$H(s) = \frac{K_u}{T_u^2 s^2 + 2\xi_u T_u s + 1}, \quad (3)$$

где K_u – коэффициент усиления;

T_u – постоянная времени;

ξ_u – коэффициент затухания.

При формировании управляющих воздействий необходимо учитывать взаимосвязь процессов прокатки по двум осям x и y . Эта взаимосвязь объясняется тем, что увеличение силы, развиваемой гидроприводом вдоль оси x при сжатии материала, вызывает дополнительную силу сопротивления на гидропривод по оси y . В результате уменьшается сила нажатия валков и увеличивается размер профиля проката по оси y . Взаимовлияние процессов по осям x и y поясняется структурной схемой, приведенной на рис. 3.

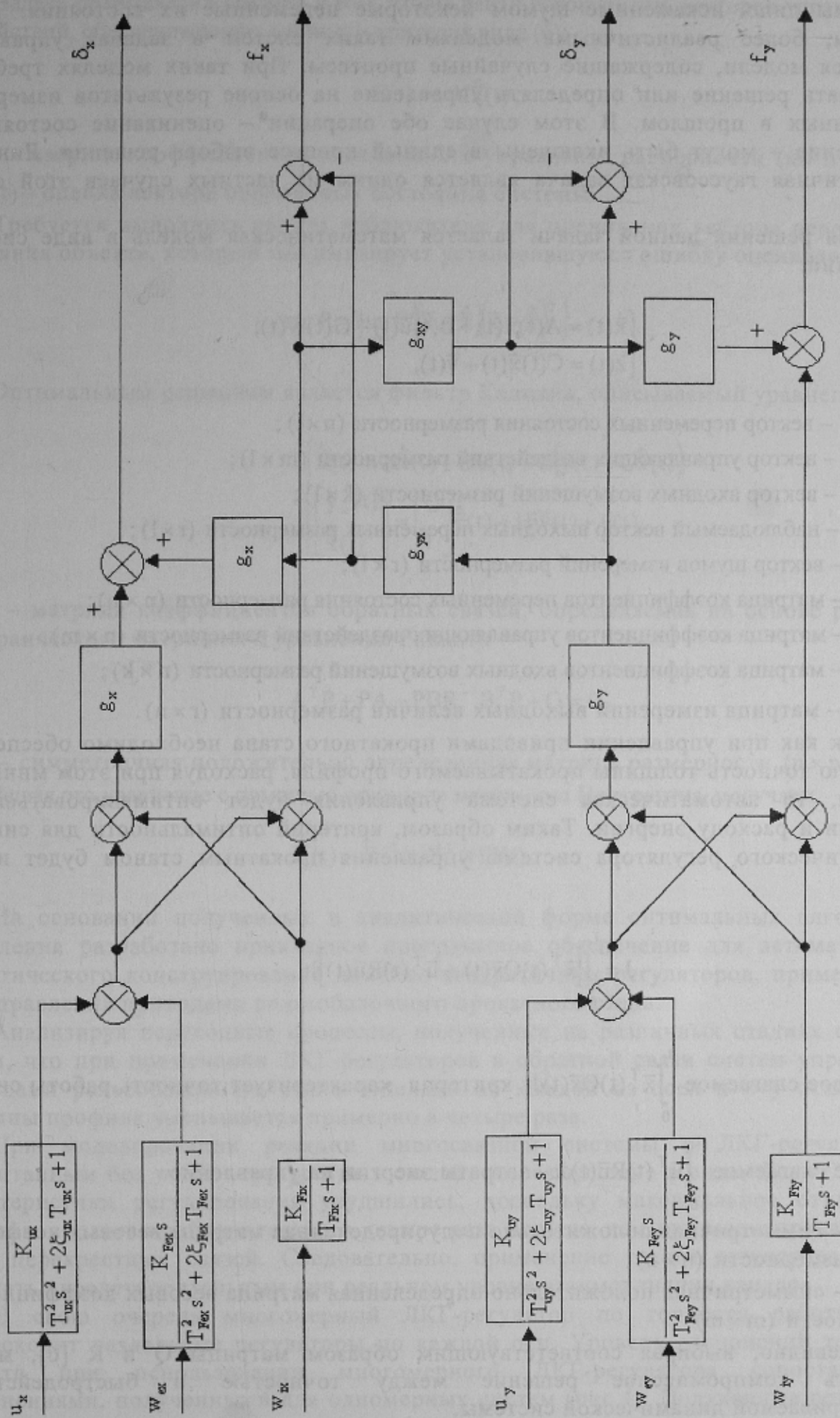
Структурной схеме (рис. 3) соответствует следующая система уравнений:

$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ f_x \\ f_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & g_{yx}g_x \\ 0 & 1 & g_{xy}g_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -g_{yx} \\ 0 & 0 & -g_{xy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\delta}_x \\ \bar{\delta}_y \\ \bar{f}_x \\ \bar{f}_y \end{bmatrix}, \quad (4)$$

матрица перекрестных связей

где $\bar{\delta}_x$, $\bar{\delta}_y$, \bar{f}_x , \bar{f}_y – зазоры и отклонения силы нажатия валков в каналах x и y без учета перекрестных связей.

Как правило, физические системы, над которыми должно осуществляться управление, трудно рассматривать как детерминированные, поскольку наблюдениям



доступны лишь искаженные шумом некоторые переменные их состояния. Таким образом, более реалистичными моделями таких систем в задачах управления являются модели, содержащие случайные процессы. При таких моделях требуется принимать решение или определять управление на основе результатов измерений, полученных в прошлом. В этом случае обе операции – оценивание состояния и управление – могут быть включены в единый процесс выбора решения. Линейно-квадратичная гауссовская задача является одним из частных случаев этой общей задачи.

Для решения данной задачи задается математическая модель в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = A(t)\bar{x}(t) + B(t)\bar{u}(t) + G(t)\bar{w}(t); \\ \bar{z}(t) = C(t)\bar{x}(t) + \bar{v}(t), \end{cases} \quad (5)$$

где $\bar{x}(t)$ – вектор переменных состояния размерности $(n \times 1)$;

$\bar{u}(t)$ – вектор управляющих воздействий размерности $(m \times 1)$;

$\bar{w}(t)$ – вектор входных возмущений размерности $(k \times 1)$;

$\bar{z}(t)$ – наблюдаемый вектор выходных переменных размерности $(r \times 1)$;

$\bar{v}(t)$ – вектор шумов измерений размерности $(r \times 1)$;

$A(t)$ – матрица коэффициентов переменных состояния размерности $(n \times n)$;

$B(t)$ – матрица коэффициентов управляющих воздействий размерности $(n \times m)$;

$G(t)$ – матрица коэффициентов входных возмущений размерности $(n \times k)$;

$C(t)$ – матрица измерений выходных величин размерности $(r \times n)$.

Так как при управлении приводами прокатного стана необходимо обеспечить заданную точность толщины прокатываемого профиля, расходуя при этом минимум энергии, то автоматическая система управления будет оптимизироваться по точности и расходу энергии. Таким образом, критерий оптимальности для синтеза автоматического регулятора системы управления прокатным станом будет иметь вид [5]:

$$J = \int_0^{t_f} [\bar{x}^T(t)Q\bar{x}(t) + \bar{u}^T(t)R\bar{u}(t)] dt. \quad (6)$$

где первое слагаемое $\int_0^{t_f} \bar{x}^T(t)Q\bar{x}(t)dt$ критерия характеризует точность работы системы,

а второе слагаемое $\int_0^{t_f} \bar{u}^T(t)R\bar{u}(t)dt$ – затраты энергии на управление.

Q – симметричная положительно полуопределенная матрица весовых коэффициентов размерности $(n \times n)$;

R – симметричная положительно определенная матрица весовых коэффициентов размерности $(m \times m)$.

Очевидно, выбирая соответствующим образом матрицы Q и R [6], можно получить компромиссное решение между точностью и быстродействием рассматриваемой динамической системы.

Задача оптимизации состоит в том, чтобы найти совокупность векторов управляющих воздействий, обеспечивающих минимум критерия вида (6):

$$\bar{u}(t) = -K\hat{x}(t), \quad (7)$$

где K – матрица коэффициентов оптимального управления размерности $(m \times n)$;

$\hat{x}(t)$ – оценка вектора переменных состояния системы.

Требуется выполнить синтез наблюдателя для оценивания вектора переменных состояния объекта, который минимизирует установившуюся ошибку оценивания

$$P = \lim_{t \rightarrow \infty} E \left\{ (\bar{x} - \hat{x})(\bar{x} - \hat{x})^T \right\}, \quad (8)$$

Оптимальным решением является фильтр Калмана, описываемый уравнениями

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + B\bar{u}(t) + L(\bar{y}(t) - C\hat{x}(t)) \\ \begin{bmatrix} \bar{y}_v(t) \\ \hat{\hat{x}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ I \end{bmatrix} \hat{x}(t) + H\bar{w}(t) + \bar{v}(t), \end{cases} \quad (9)$$

где L – матрица коэффициентов обратных связей, определяемая на основе решения алгебраического матричного уравнения Риккати

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0, \quad (10)$$

где P – симметричная положительно определенная матрица размерности $(n \times n)$.

Решая это уравнение с помощью принципа максимума Понтрягина, получаем

$$K(t) = R^{-1}(t)B^T(t)P(t). \quad (11)$$

На основании полученных в аналитической форме оптимальных алгоритмов управления разработано прикладное программное обеспечение для автоматизации аналитического конструирования линейно-квадратичных регуляторов, применяемых при управлении приводами рельсобалочного прокатного стана.

Анализируя переходные процессы, полученные на различных стадиях синтеза, видим, что при применении ЛКГ-регуляторов в обратной связи систем управления приводами рельсобалочного стана отдельно по каждой из осей x и y отклонение толщины профиля уменьшается примерно в четыре раза.

При моделировании реакции многосвязной системы с ЛКГ-регулятором, рассчитанным без учета перекрестных связей, на возмущение в виде “белых” шумов характеристики регулирования ухудшились, поскольку максимальное отклонение толщины проката приблизительно в четыре раза больше, чем при моделировании без учета перекрестных связей. Следовательно, применение такого регулятора нельзя признать удовлетворительным при реальном уровне взаимовлияния каналов.

В свою очередь многомерный ЛКГ-регулятор по точности работы явно превосходит отдельные регуляторы по каждой оси. Уровень отклонений толщины проката при использовании многомерного ЛКГ-регулятора сопоставим с отклонениями, полученными для одномерных систем (рис.4). Полученные результаты

підтверджують правильність отриманих алгоритмів синтезу лінійно-квадратичних регуляторів і ілюструють значительні переваги прямого синтезу багатовимірних регуляторів.

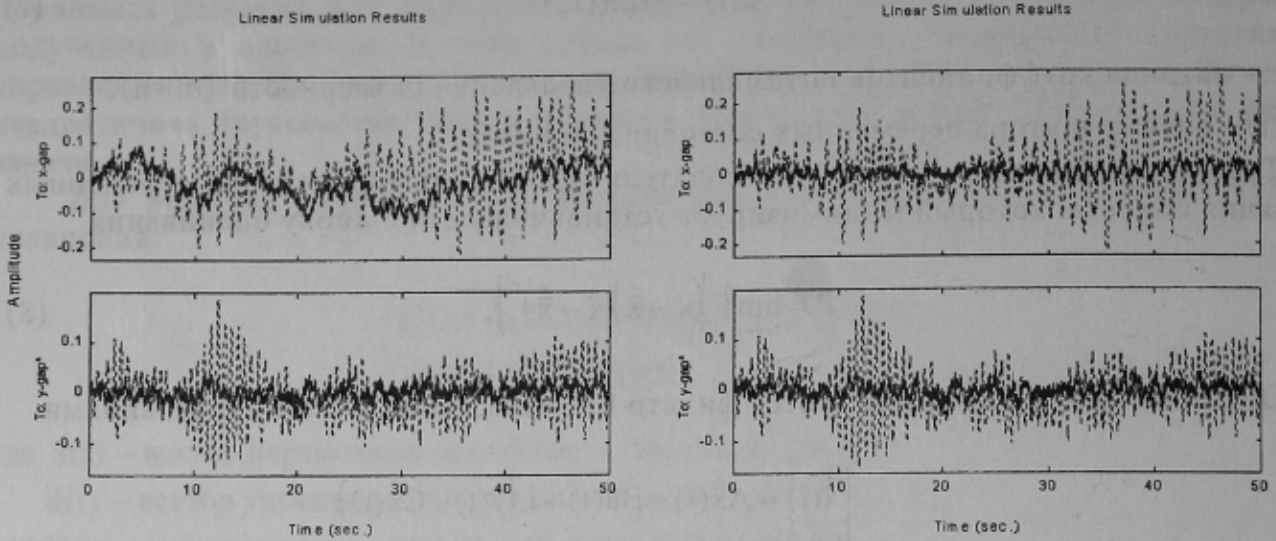


Рисунок 4 – Реакція на возмущення розомкнутого і замкнутого контурів з регулятором, розрахованим без урахування перехресних зв'язей, і з багатовимірним регулятором

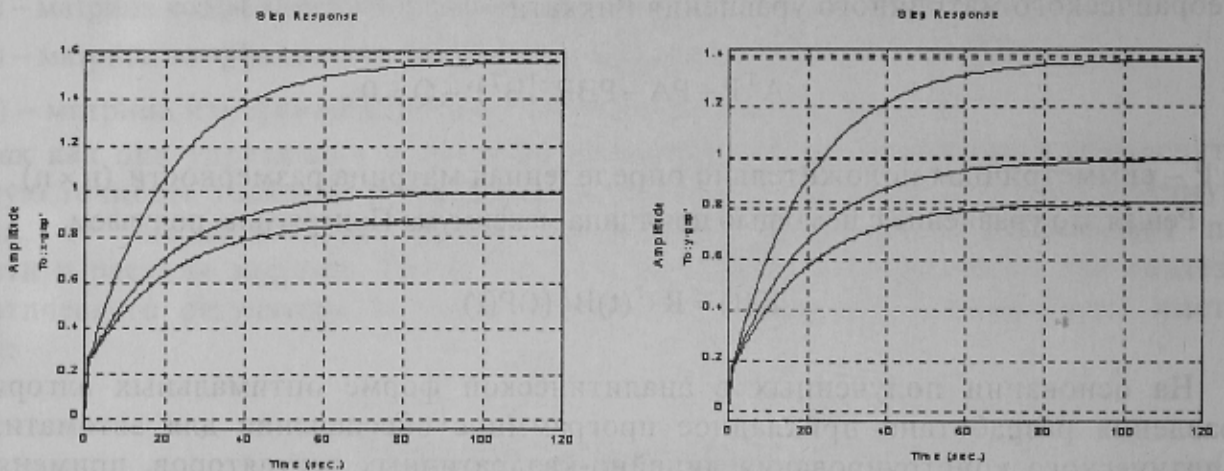


Рисунок 5 – Графіки перехідних процесів при відхиленні значень коефіцієнтів посилення K_{ux} і K_{uy} на -20% і +20% від номінальних

Литература

1. АСУ ТП современных балочных прокатных станов / Под ред. Б.Б. Тимофеева и В.И. Попельнуха. – М.:Металлургия,1984.
2. Файнберг Ю.М. Автоматизация непрерывных станов горячей прокатки – М.: Металлургия, 1963.
3. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования – М.: Машиностроение, 1985.
4. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Control System Toolbox. Matlab 5 для студентов / Под ред. В.Г. Потемкина – М.: Диалог-МИФИ, 1999.
5. Сейдж Э.П., Уайт Ч.С. Оптимальное управление системами: Пер. с англ./ Под ред. Б.Р. Левина.– М.: Радио и связь, 1982.