

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ДВУХ РОБОТОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СБОРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПО КВАДРАТИЧНОМУ КРИТЕРИЮ КАЧЕСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМОВ

Рафиков Г.Ш., Устинова Ю.Н.

Донецкий национальный технический университет, кафедра АТ

Abstract

Rafikov G., Ustinova Yu. Optimum control of two robot system for performing the adjustment technological operations on square-law quality criterion with using the slithering modes. Synthesized law of optimum specified dynamic system management with the variable structure. Realized experimental checking capacity to work of synthesized regulator with using a package of applied programs MATLAB. Received graphs of connecting processes under different states of working under investigation dynamic system. Experimental studies completely have confirmed invariance of slithering under investigation system modes to external influences and to changing the operated system parameters for nominal values.

В течение последних нескольких лет вопросы управления манипуляционными роботами стали областью весьма активных исследований и было выработано несколько подходов к созданию систем управления.

Промышленные роботы применяют для автоматизации различных видов сборочных операций [2]. На операции, после которых изделие поступает на механическую обработку, промышленные роботы выполняют подачу, ориентацию и соединение деталей в один комплект, их взаимное закрепление, установку и снятие комплекта при обслуживании обрабатывающего оборудования.

Уравнения динамики для системы двух манипуляционных роботов в общем виде имеют вид [3]:

$$D_i(\bar{q})\ddot{\bar{q}} + E_i(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) + J(\bar{q})\bar{F} = \bar{\tau} \quad , \quad (1)$$

где

$i = 1, 2$;

\bar{q}_i — вектор переменных степеней подвижности робота i ;

\bar{F} — вектор измеряемых сил и моментов робота i ;

$\bar{\tau}$ — вектор моментов (сил) в степенях подвижности робота;

J — матрица Якоби робота i .

D_i — матрица коэффициентов, устанавливающих связь действующих в сочленениях моментов с ускорениями обобщенных координат.

E_i — матрица коэффициентов, устанавливающих связь действующих в сочленениях сил и моментов со скоростями изменения обобщенных координат.

Для линеаризации системы двух манипуляторов используется нелинейная обратная связь по состоянию и диффеоморфное преобразование, в результате которых новая преобразованная система является линейной в Бруновской канонической форме с развязанным выходом [1]. Такая линеаризованная динамическая система описывается математической моделью вида:

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + B\bar{u}; \tag{2}$$

$$\bar{y} = C\bar{x}, \tag{3}$$

где

\bar{x} — вектор состояния в преобразованной системе координат размерности (12x1);

A — блочно-диагональная матрица размерности (12x12), характеризующая декомпозицию состояний шарниров преобразованной модели;

B — блочно-диагональная матрица размерности (12x6), отражающая декомпозицию управляющих воздействий на шарниры преобразованной модели робота;

C — блочно-диагональная матрица размерности (6x12), определяющая декомпозицию выходных координат шарниров преобразованной модели.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{4}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{5}$$

$$C = \begin{bmatrix} \boxed{1} & \boxed{0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \boxed{1} & \boxed{0} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{1} & \boxed{0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{1} & \boxed{0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{1} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Динамическая система, представленная уравнениями (2), (3) состоит из шести независимых подсистем вида:

$$\dot{\bar{X}}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -98 & -120 \end{bmatrix} \cdot \bar{X}_i + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot U_i, \quad (7)$$

$$Y_i = [1 \ 0] \cdot \bar{X}_i, \quad (8)$$

$i=1..6.$

В результате проведённой линеаризации динамической модели системы двух роботов с помощью нелинейной обратной связи и диффеоморфного преобразования получена линеаризованная математическая модель с декомпозицией состояний по сочленениям и с развязанными выходами манипуляторов. На основе полученной математической модели можно синтезировать алгоритм оптимального управления хорошо разработанными линейными методами.

Исследования показывают [3], что регулятор, основанный на динамике манипулятора и динамике двигателей, даёт меньшие ошибки слежения по сравнению с регулятором, основанным только на динамике манипулятора, кроме того, такой регулятор работоспособен даже при наличии неточностей моделирования динамики манипулятора.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ -100 & -125 & -26 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0 \ 0]$$

Задача оптимизации движения в скользящем режиме состоит в следующем: для системы необходимо выбрать такие уравнения поверхностей разрыва, которые позволяют при движении системы в скользящем режиме минимизировать критерий оптимальности вида:

$$I = \int_0^{\infty} (\bar{x}^T Q \bar{x} + \mu^2 \bar{u}^T R \bar{u}) dt, \quad (9)$$

где Q-неотрицательно определённая симметричная матрица размерности (nхn), R-положительно определённая симметричная матрица размерности (mхm), m<n. При таком движении поверхность разрыва определяется следующим выражением:

$$s = s_0(\bar{x}_1) + \bar{x}_2 = 0, \quad (10)$$

где $s_0(\bar{x}_1)$ - произвольная функция вектора \bar{x}_1 .

Задача синтеза состоит в выборе такой функции $s_0(\bar{x}_1)$, что при движении по многообразию $s=0$ функционал вида (9) достигает минимума.

Тогда уравнение плоскости разрыва определяется в следующем виде:

$$s = [Q_{22}^T (A_{12}^T P + Q_{12}^T), I_{n-m}] M \bar{x} = 6.3247x_1 + 4.7592x_2 + x_3 = 0. \quad (11)$$

После синтеза системы управления переменной структуры получим значение всех коэффициентов в управлении

$$\begin{aligned} u_1 &= -8x_1; \\ U &= -\Psi_1 u_1 - \delta, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{где } \psi_1 = \begin{cases} -20 & \text{при } u_1 s > 0; \\ -5 & \text{при } u_1 s < 0. \end{cases} \quad (13)$$

Для проверки работоспособности оптимальной системы с синтезированными алгоритмами управления использован пакет прикладных программ языка высокого уровня MATLAB 5.0. Исходные математические модели системы управления представляются в виде структурных алгоритмических схем, сформированных из типичных блоков Simulink-модели. Для системы оптимального управления с переменной структурой схема моделирования динамической системы представлена на рисунке 1.

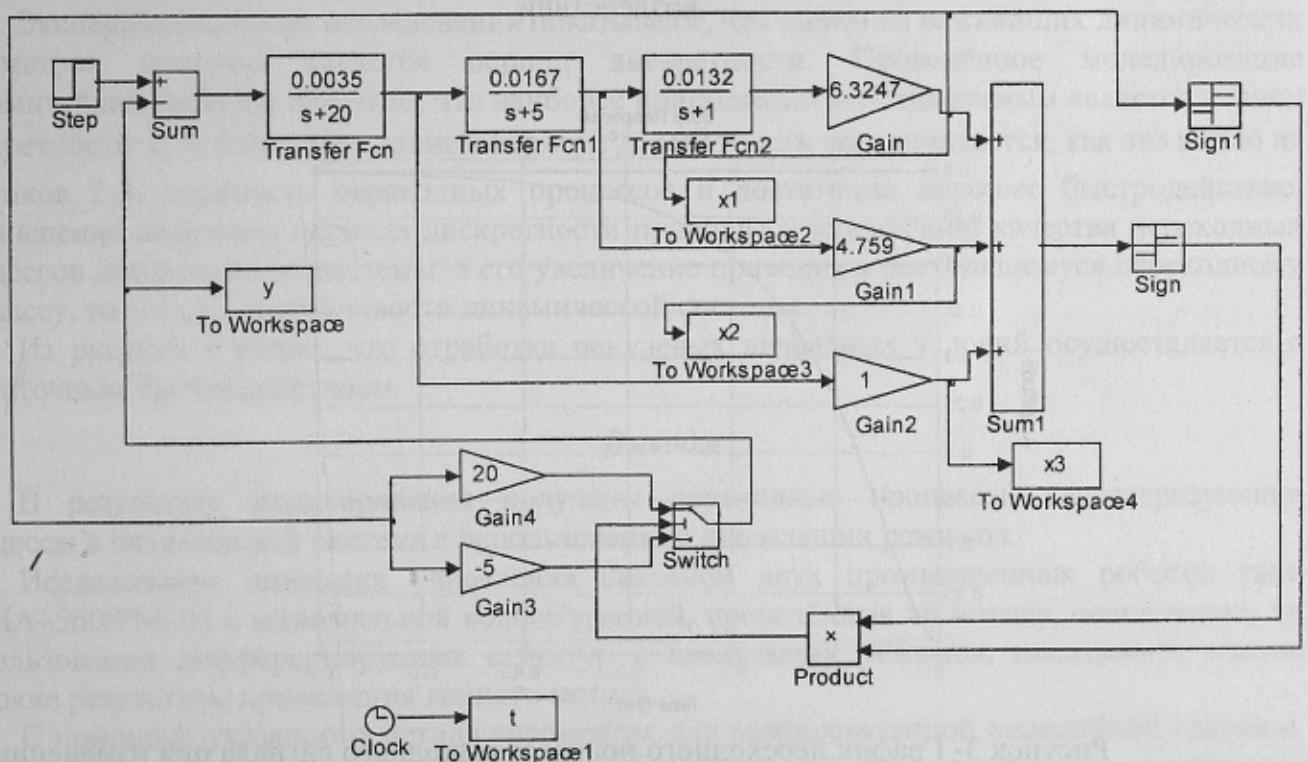


Рисунок 1- Схема моделирования динамической системы

С помощью пакета прикладных программ MATLAB 5.0 получены переходные процессы для выходной величины (рисунок 2). Из анализа полученных переходных процессов видно, что процессы в системе затухают довольно быстро и не имеют запаздывания.

Изменение параметров системы, а это изменение всегда присутствует в реальных условиях эксплуатации, существенно не влияет на качество переходных процессов и на устойчивость системы в целом. На рисунке 3 показано, что переходные процессы изменились, их установившееся значение уменьшилось в два раза по сравнению с заданным воздействием при изменении параметров на 100%.

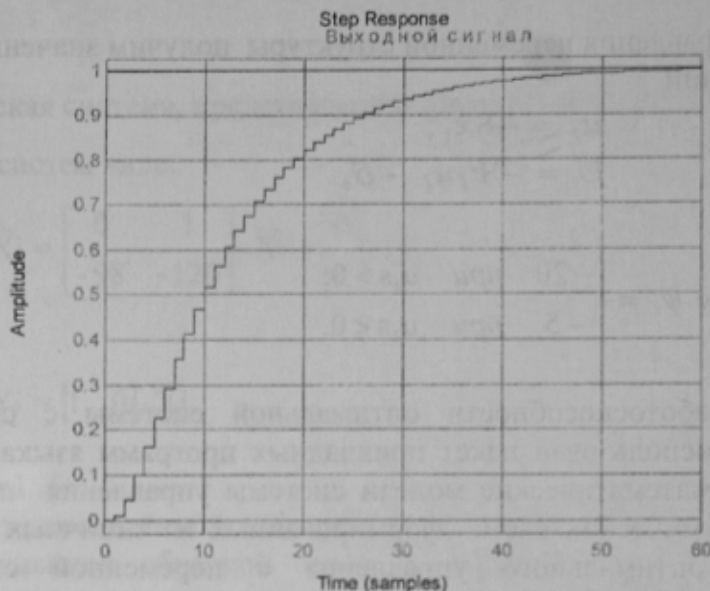


Рисунок 2- График переходного процесса выходного сигнала при ступенчатом воздействии

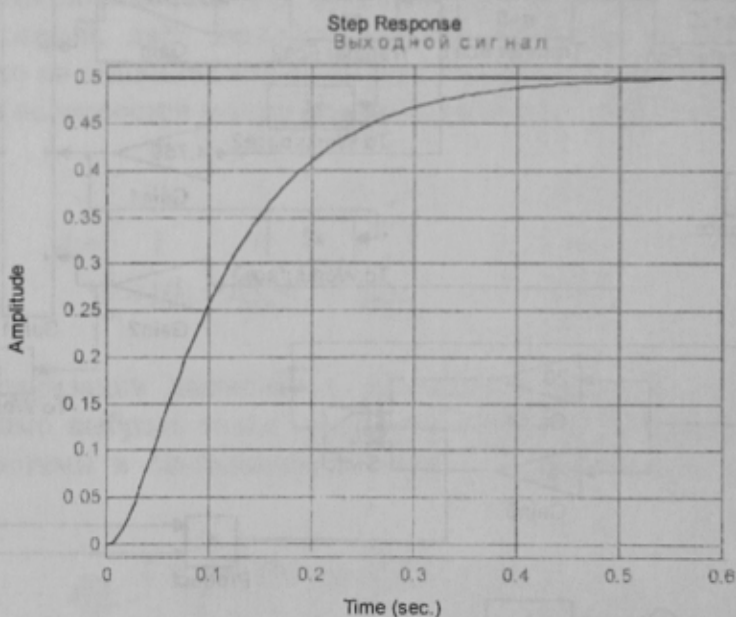


Рисунок 3- График переходного процесса выходного сигнала при изменении параметров на 100%

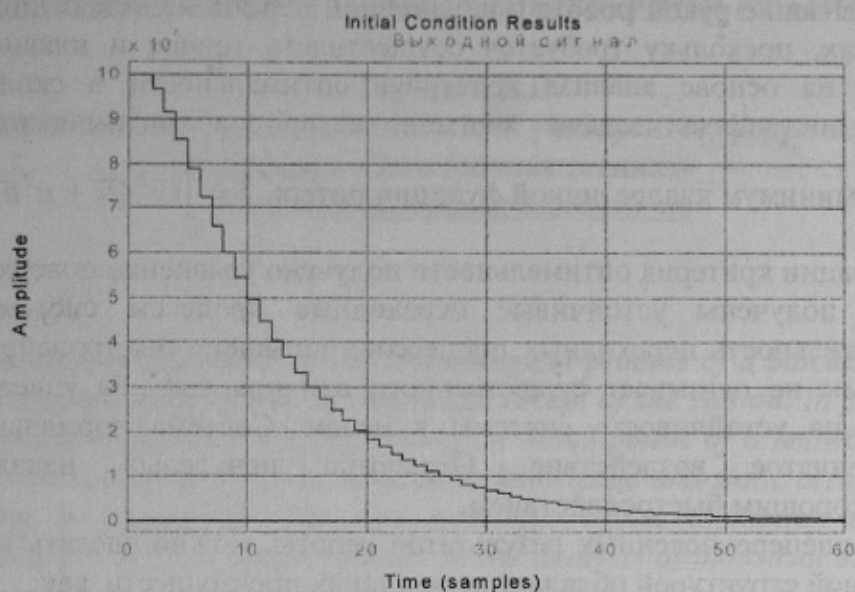


Рисунок 4 – График переходного процесса выходного сигнала при отработке начальных условий

Из анализа рисунка 1 следует, что исследуемая система достаточно уверенно обрабатывает единичное ступенчатое воздействие, при этом переходный процесс заканчивается за 50 шагов дискретности, то есть за 0.5 секунд.

Экспериментальные исследования показывают, что одним из важнейших динамических параметров системы является период дискретности. Проведённое моделирование динамической системы показало, что наиболее приемлемым и оптимальным является период дискретности $T_0 = 0.01c$. При данном периоде дискретности обеспечивается, как это видно из рисунков 2-3, плавность переходных процессов и достаточно хорошее быстродействие. Уменьшение величины периода дискретности приводит к ухудшению качества переходных процессов динамической системы, а его увеличение приводит к расходящемуся переходному процессу, то есть к неустойчивости динамической системы.

Из рисунка 4 видно, что отработка ненулевых начальных условий осуществляется с достаточным быстродействием.

Выводы

В результате моделирования получены переходные процессы, характеризующие процессы в оптимальной системе с использованием скользящих режимов.

Исследование динамики управления системой двух промышленных роботов типа PUMA-560/PM-01 с минимальной конфигурацией, проведённые по методу, основанному на использовании дифференцируемых структур и скользящих режимов, показывают весьма высокие результаты применения данного метода.

С помощью указанного метода управления для взаимосвязанной нелинейной системы, которую представляют собой промышленные роботы, найдены, во-первых, компактные векторно-матричные уравнения динамики в форме Лагранжа-Эйлера; во-вторых, произведена “внешняя линеаризация” уравнений динамики роботов с применением нелинейной обратной связи по состоянию и нелинейного диффеоморфного преобразования,

которые линеаризуют исходную нелинейную динамическую систему и осуществляют её декомпозицию на ряд развязанных линейных подсистем. С учётом влияния динамики двигателей на управление рукой робота с нелинейной обратной связью получены матрицы A, B и C ; в-третьих, поскольку требуется осуществлять точное и плавное перемещение манипулятора, то на основе анализа критериев оптимальности в скользящем режиме сформулирована постановка задачи синтеза алгоритма оптимального управления,

обеспечивающего минимум квадратичной функции потерь
$$I = \int_0^{\infty} (\bar{x}^T Q \bar{x} + \mu^2 \bar{u}^T R \bar{u}) dt .$$

Для минимизации критерия оптимальности получено уравнение поверхностей разрыва.

После чего получены устойчивые переходные процессы системы, значительно уменьшена колебательность переходных процессов, повышено быстродействие. Изменение параметров системы не оказывает существенного влияния как на качество переходных процессов, так и на устойчивость системы в целом. Система нормально обрабатывает единичное ступенчатое воздействие. Отработка ненулевых начальных условий осуществляется с хорошим быстродействием.

На основе вышеперечисленных результатов работы, можно сделать вывод о том, что система с переменной структурой обладает рядом таких преимуществ, как:

- простота реализации;
- нечувствительность к изменению в широких пределах параметров объекта управления;
- повышение быстродействия системы;
- улучшение качества отслеживаемого сигнала.

Таким образом, при управлении системы двух промышленных роботов, наиболее целесообразным является использование алгоритма оптимального управления в системе с переменной структурой с использованием скользящих режимов.

Литература

1. Брокетт Р.У. Алгебры Ли и группы Ли в теории управления. Математические методы в теории систем. М.: Мир, 1979.
2. Охоцимский Д.Е. Роботизация сборочных процессов. М.: Наука, 1985.
3. Семенов В.И. Дифференциально-геометрические методы исследования управляемых динамических систем. М.: Кибернетика и вычислительная техника, 1978, вып. 39.
4. Tarn T.J., Bejczy A. K., A. Isidori, and Y. L. Chen, Nonlinear feedback in robot arm control. in Proc. 23 rd IEEE Conf. Robotics Automat (Las Vegas, NV), 1984.
5. Y. L. Chen, Nonlinear feedback and computer control of robot arm , Ph. D.dissertation, Dept of System Science and Math. , Washington Univ. , St Louis, MO, Dec. , 1984.
6. Уткин В.И Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. М.: Наука, 1981г.-368с