

УДК 62-83.621.01

**Е. В. Макаревич,**  
**В. Н. Шамардина,** канд. техн. наук,  
**Ф. Палис,**  
**С. Палис**

## РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ БАШЕННОГО КРАНА

*Аннотация.* Предложена программа оптимального управления рабочими движениями (поворот башни, подъём груза, передвижение тележки) башенного крана с поворотной башней на основе имеющихся в расширении Optimization Toolbox™ пакета Matlab команд для оптимизации нелинейных и линейных систем управления. Реализация программы обеспечивает устранение раскачивания груза с заданным быстродействием.

**К. В. Макаревич,**  
**В. М. Шамардина,** канд. техн. наук,  
**Ф. Палис,** д-р техн. наук,  
**С. Палис**

## РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РУХАМИ БАШТОВОГО КРАНА

*Анотація.* Запропоновано програму оптимального керування робочими рухами (обертання башти, підйом вантажу, пересування візка) баштового крана з поворотною баштою на основі наявних у розширенні Optimization Toolbox™ пакету Matlab команд для оптимізації нелінійних і лінійних систем керування. Реалізація програми забезпечує усунення розгойдування вантажу із заданою швидкістю.

**Ekaterina V. Makarevich,**  
**Shamardina V.M.,** PhD,  
**Frank Palis,** ScD,  
**Stefan Palis**

## DEVELOPMENT OF AN OPTIMAL CONTROL OF MOVEMENTS TOWER CRANE

*Abstract.* We propose a control program of workers' movement for tower crane with rotary tower (the swing mechanism, cargo winches, wagon winch). Namely, a program which is based on the commands to optimize nonlinear and linear systems that is available in Optimization Toolbox™ Matlab.

Разработки в области автоматического управления движениями крана базируются часто на построении линеаризованных моделей механических систем, что позволяет при анализе его работы применять принцип суперпозиции. При перемещении груза в горизонтальном и вертикальном направлении траектория движения груза достаточно проста. При повороте башни крана на груз действует центробежная сила, а при комбинированном движении, т.е. при одновременном поступательном движении тележки и повороте башни проявляется действие силы Кориолиса, что значительно усложняет процесс линеаризации такой системы.

Оптимизация нелинейных систем связана с трудоёмкими вычислениями. Сегодня уровень вычислительной техники достаточен для нахождения численных решений такой оптимизации. К примеру, Optimization Toolbox™ пакета Matlab предлагает типовые алгоритмы оптимизации нелинейных систем.

Нелинейная модель механической части крана описана в [1], создана с использованием расширения SimMechanics™ пакета Matlab. Она позволяет моделировать передвижение тележки, поворот и подъём (опускание) груза, а также отслеживать траекторию движения груза при любом из этих движений. Сигнал управления (задания)  $\mathbf{u}(t)$  – электромагнитная сила  $F(t)$  (момент), развиваемая двигателем.

© Макаревич Е.В., Шамардина В.Н.,  
Палис Ф., Палис С., 2011

Разработана программа оптимального управления SimMechanics™-моделью крана при использовании Optimization Toolbox™ пакета Matlab (рис.1). Она состоит из трёх основных частей:

- 1) задание предшествующих оптимизации начальных условий и построение графиков (положение и скорость тележки и башни, скорость движения груза при подъеме, радиальная и тангенциальная составляющие угла отклонения груза);
- 2) определение функционала качества и оптимизация управляющего воздействия;
- 3) построение графиков переходных процессов при оптимизированном управляющем воздействии.

В первой части программы задаём быстродействие-время регулирования (например, 4 с) и типовую форму управляющего воздействия  $\mathbf{u}(t)$  – одноступенчатое изменение силы со значением  $|+u_{\max}| = |-u_{\max}| = 1$ .

Параметры оптимизации задаём во второй части программы с помощью команды optimset. Оптимизация вектора силы  $\mathbf{u}(t)$  выполнена, исходя из требования: в конце переходного процесса все скорости и угол отклонения груза должны быть равны нулю. Для этого в (1) заданная матрица конечного состояния системы  $y_{end\_soll}(u(t))$  сравнивается с полученной в результате симуляции  $y_{end\_ist}(u(t))$ , и квадрат их разницы минимизируется с заданной точностью.

$$\min_{\mathbf{u}(t)} J(\mathbf{u}(t)) = 10^4 \sum_{t_0}^{t_{end}} \left( y_{end\_soll}(\mathbf{u}(t)) - y_{end\_ist}(\mathbf{u}(t)) \right)^2 \quad (1)$$

```

%% Инициализация
MAKET;
u = [ ones (1,60) , -ones (1,60) ]'; % Вектор силы
tend = 4; dt = tend / ( length(u) - 1); % Время симуляции и временной такт
t = linspace (0, tend, length(u) ); % Вектор времени
simopt = simset ( 'solver', 'ode45', 'FixedStep', dt ); % Параметры моделирования
[tout, xout, yout] = sim ('MAKET', [0 tend], simopt, [t, u] ); % Симуляция модели
figure (1); plot ( tout, yout (:,1) , 'red' ); hold on; grid on; % Построение графиков: положения и скорости тележки
- % и башни, траектории движения груза при подъеме,
- Z- и Y-составляющих углов отклонения груза
figure (6); plot ( tout, yout (:,6) , 'red' ); hold on; grid on;

%% Оптимизация
options = optimset( 'Algorithm', 'active-set', 'Display', 'iter', 'ToIX', 1e-6, 'ToIFun', 1e-6, 'MaxFunEvals', 1e5);
tic
uopt = fminunc ( @gueteMAKET, u, options ); % Программа оптимизации управляющего вектора
toc

%% Моделирование с оптимизированными параметрами
ut = [uopt; zeros (length (uopt), 1) ]; ut = uopt; % Оптимизированный вектор силы
tend = 4; dt = tend / (length (ut) - 1); % Время симуляции и временной такт
t = linspace (0, tend, length (ut) ); % Вектор времени
simopt = simset ('solver','ode1','FixedStep',dt); % Параметры моделирования
[tout, xout, yout] = sim ('MAKET', [0 tend], simopt, [t, ut] ); % Симуляция модели
figure (1); plot ( tout, yout (:,1) , 'black'); hold on; grid on; % Построение графиков: положения и скорости тележки
- % и башни, траектории движения груза при подъеме,
- Z- и Y-составляющих углов отклонения груза
figure (7); plot (tout, ut ); % Оптимизированный вектор силы
    
```

Рис. 1. Программа оптимального управления движениями механизмов крана

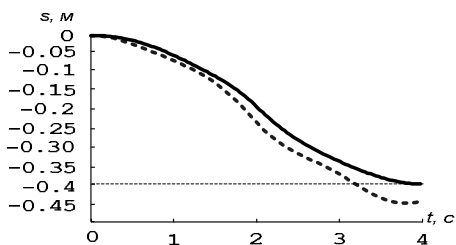


Рис. 2. Положение тележки

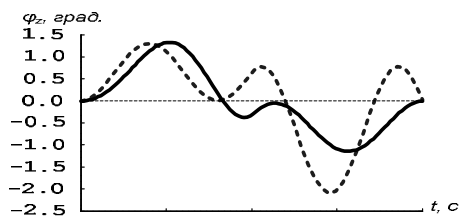


Рис. 3. Угол отклонения груза

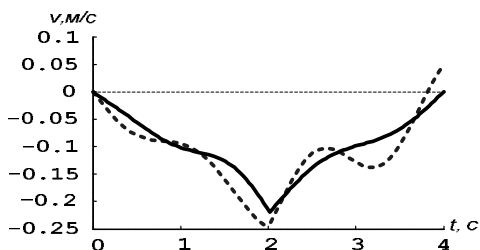


Рис. 4. Скорость тележки

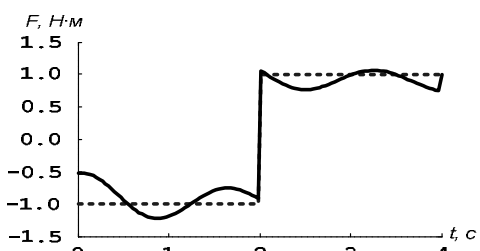


Рис. 5. Управляющее воздействие  $u(t)$

Моделирование выполнено с исходными данными макета поворотного крана: высота башни – 1,6 м, длина стрелы 0,8 м, масса груза – 5 кг, масса стрелы – 6,9 кг, масса противовеса – 3,5 кг, масса башни – 31,9 кг. На рисунках 2-5 приведены графики изменения

скорости и положения тележки, угла отклонения груза,  $u(t)$  (пунктирные кривые – при управлении с одним переключением, сплошные – при оптимизированном  $u(t)$ ). При оптимальном  $u(t)$  тележка начинает движение от края стрелы и за 4 с перемещается на 0.4 м, в конце движения все скорости и угол отклонения груза равны нулю.

Разработанная программа управления может быть использована для оптимизации угла отклонения груза при повороте башни и подъеме груза, а также при комбинированном движении механизмов крана.

Список использованной литературы

1. Макаревич Е.В. Математическая модель поворотного крана с использованием SimMechanics (Matlab) / Е.В.Макаревич, В.Н.Шамардина, Ф.Палис, С.Палис // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Вест. НТУ "ХПИ". – 2010. – Вып. 28. – С. 102-103.
2. Matlab. Help. Optimization Toolbox.

Получено 19.07.2011



Макаревич Екатерина Владимировна,  
 магистр НТУ "ХПИ",  
 г. Харьков, ул. Фрунзе, 21  
 katya\_makarevych@mail.ru



Шамардина Вера Николаевна,  
 канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",  
 тел. (057) 7076974  
 shamardina@kpi.kharkov.ua



Палис Франк,  
 профессор, д-р- инж.  
 Магдебургск. ун-та Отто фон Герике,  
 Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg  
 frank.palis@ovgu.de



Палис Стефан,  
 дипл. инж.  
 Магдебургск. ун-та Отто фон Герике,  
 Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg  
 stefan.palis@ovgu.de