

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КРАНА ПО КРИТЕРИЯМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ОТСУТСТВИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА

При эксплуатации грузоподъемных механизмов возникает проблема раскачивания груза, поскольку крановые механизмы работают в повторно-кратковременном режиме, следовательно, относительно длительные переходные процессы ухудшают производительность и энергоэффективность разгрузочно-погрузочных работ.

Решение проблемы демпфирования колебаний груза дает возможность эффективнее эксплуатировать крановое оборудование. Последние исследования, посвященные решению данной проблемы, основываются на использовании теории оптимального управления, например, принципа максимума Понтрягина [1]. В работе [2] управляющая сила, приложенная к тележке, имеет релейный характер. Данные способы управления приводят к дополнительным динамическим нагрузкам на кран. Плавное изменение динамических характеристик с одновременным демпфированием колебаний с помощью использования вариационного исчисления представлены в работе [3].

Наряду с этим появляется возможность оптимизации электромеханических систем по критерию минимума затрат электрической энергии. Проблемам экономии энергозатрат посвящено немало работ, что свидетельствует об актуальности данной проблемы. В отношении электроприводов кранового оборудования доказано, что незначительное улучшение производительности, если такое допускается требованиями технологического процесса, приводит к значительному снижению затрат электроэнергии.

Система дифференциальных уравнений в форме Коши, которая описывает движение тележки с подвешенным на канате грузом имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = \omega_{\varphi} \\ \dot{\omega}_{\varphi} = \frac{F_X}{L} - \varphi \frac{g}{L} \cdot \frac{m+M}{M} \\ \dot{x} = V_X \\ \dot{V}_X = F_X - \varphi \frac{m}{M} \end{cases}$$

где F_X – сила, которой действуют на разгон и торможение (управляющие воздействие);

φ – угол отклонения груза;

ω_{φ} – скорость изменения угла отклонения;

m – масса груза;

M – масса тележки, $M \gg m$;

V_X – скорость тележки;

x – перемещение тележки;

L – длина каната.

Критерий оптимальности в пространстве состояний, обеспечивающий минимум затрат энергии по всем компонентам в общем случае имеет вид:

$$J = \min_{U \in \Omega_U} \int_0^T (x^T P x + u^T Q u) dt$$

Поставленная задача решается минимизируя квадратичный функционал:

$$J = \int_{t_0}^{t_k} \frac{1}{2} (\varphi^2 + \omega_{\varphi}^2 + F_X^2) dt \rightarrow \min$$

где t_0 – начальное значение времени разгона;

t_k – конечное значение времени разгона.

Оптимальным является управление, в котором на заданном интервале времени уравнение Гамильтониана достигает максимума. Если бы ресурс управления не был бы ограничен, то для определения оптимального управления можно было бы воспользоваться необходимыми и достаточными условиями экстремума. В реальной ситуации для отыскания оптимального управления необходимо анализировать величину Гамильтониана при предельном значении уровня воздействия.

Функция Понтрягина-Гамильтониана имеет вид:

$$H = \sum_{i=1}^3 \Psi_i f_i = \Psi_1 \dot{\varphi} + \Psi_2 \left(-\frac{g}{L} \varphi - \frac{F_X}{L} \right) + \Psi_3 F_X - \frac{(\varphi^2 + \dot{\varphi}^2 + F_X^2)}{2}$$

где ψ_1, ψ_2, ψ_3 – дополнительные функции,

Составим канонические уравнения Гамильтониана:

$$\frac{d\Psi_i}{dt} = -\frac{dH}{dy_i}$$

Система уравнений с учетом дополнительных функций Гамильтониана имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\varphi} = \omega_{\varphi} \\ \dot{\omega}_{\varphi} = -\frac{g}{L}\varphi + \frac{1}{L^2}\Psi_2 - \frac{1}{L}\Psi_3 \\ \dot{V}_X = -\frac{1}{L}\Psi_2 + \Psi_3 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \dot{\Psi}_1 = \frac{g}{L}\Psi_2 + \varphi \\ \dot{\Psi}_2 = -\Psi_1 + \Psi_2 \\ \dot{\Psi}_3 = 0 \end{array} \right.$$

Решение системы дифференциальных уравнений имеют вид:

$$\begin{aligned} \varphi &= C_1 e^{at} \left((-b - g \frac{d}{L}) \sin(bt) + (a - g \frac{c}{L}) \cos(bt) \right) + C_2 e^{at} \left((a - g \frac{c}{L}) \sin(bt) + (b + g \frac{d}{L}) \cos(bt) \right) + \\ &+ C_3 e^{-at} \left((-b - g \frac{d}{L}) \sin(bt) + (-a + g \frac{c}{L}) \cos(bt) \right) + C_4 e^{-at} \left((-a + g \frac{c}{L}) \sin(bt) + (b + g \frac{d}{L}) \cos(bt) \right) - \frac{(C_5 g)}{L} \\ \omega_{\varphi} &= C_1 e^{at} (-\beta \sin(bt) + \alpha \cos(bt)) + C_2 e^{at} (\alpha \sin(bt) + \beta \cos(bt)) + C_3 e^{-at} (\beta \sin(bt) + \alpha \cos(bt)) + \\ &+ C_4 e^{-at} (\alpha \sin(bt) - \beta \cos(bt)) \\ F_X &= -C_1 e^{at} \left((c\delta + d\gamma) \frac{\sin(bt)}{L} + (c\gamma - d\delta) \frac{\cos(bt)}{L} \right) - C_2 e^{at} \left((-d\delta + c\gamma) \frac{\sin(bt)}{L} + (-d\gamma - c\delta) \frac{\cos(bt)}{L} \right) - \\ &- C_3 e^{-at} \left((-c\delta - d\gamma) \frac{\sin(bt)}{L} + (c\gamma - d\delta) \frac{\cos(bt)}{L} \right) - C_4 e^{-at} \left((-d\delta + c\gamma) \frac{\sin(bt)}{L} + (d\gamma + c\delta) \frac{\cos(bt)}{L} \right) + \frac{(C_5 g^2 t)}{L} + C_6 \end{aligned}$$

где
$$a = \sqrt{\frac{\sqrt{1+g^2}}{L}} \cdot \sin \left(0.5 \cdot a \tan \left(\frac{\sqrt{4 \cdot L^2 + 4 \cdot g \cdot L - 1}}{2 \cdot g \cdot L - 1} \right) \right)$$

$$b = \sqrt{\frac{\sqrt{1+g^2}}{L}} \cdot \cos \left(0.5 \cdot a \tan \left(\frac{\sqrt{4 \cdot L^2 + 4 \cdot g \cdot L - 1}}{2 \cdot g \cdot L - 1} \right) \right)$$

$$\alpha = \left(a^2 - b^2 + \frac{g}{L} \right) \cdot \frac{L}{g+L}; \quad \beta = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot L}{g+L}$$

$$\gamma = \frac{a}{a^2 + b^2}, \quad \delta = \frac{b}{a^2 + b^2}, \quad \gamma = \frac{a}{a^2 + b^2}$$

$C_1 - C_6$ постоянные интегрирования.

На рисунке 1 показано семейство управляющих сигналов, при разных значениях времени переходных процессов T_0 , равное периоду колебаний груза.

На рисунке 2 показано сравнение графиков переходных процессов предложенного алгоритма управления и оптимального по быстродействию. Из графиков видно, что в предложенном способе быстродействие меньше на 15%, однако энергоэффективность намного выше.

На рисунке 3 изображена зависимость быстродействия от энергоэффективности. Потери энергии при пуске оценивались интегральным показателем:

$$\Delta A = \int_0^{t_k} F(t) \cdot (V_k - V(t)) dt$$

Из графика видно что предложенный способ разгона тележки позволяет улучшить энергоэффективность в 2,5 раза по сравнению со способом оптимальным по быстродействию, основанным на принципе максимума Понтрягина, при этом время разгона увеличивается на 15%.

По сравнению с известным методом, основанным на принципе максимума Понтрягина [1] предложенный способ воздействия при отсутствии колебаний груза имеет ряд преимуществ:

- возможность задания времени переходного процесса (разгон, торможение);
- возможность задания скорости;
- плавность протекания переходных процессов, что способствует снижению динамических нагрузок;
- отсутствие этапа реверса, что ведет к уменьшению энергозатрат.

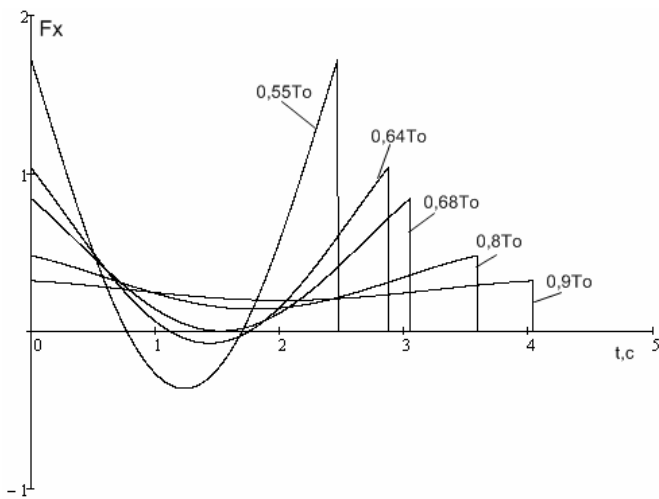


Рис.1 – Графики переходного процесса управляющего сигнала $F(t)$

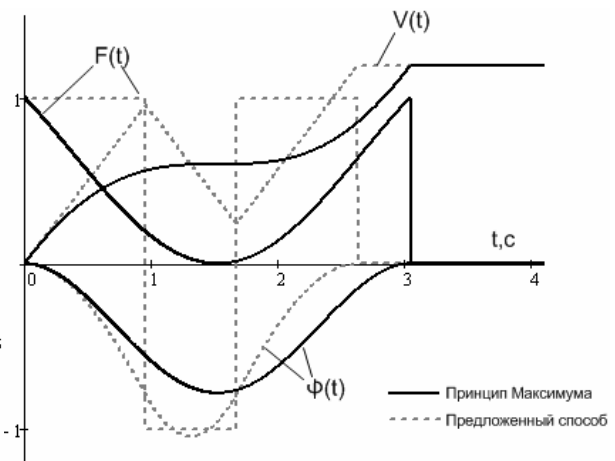


Рис.2 – Сравнение графиков переходных процессов пуска

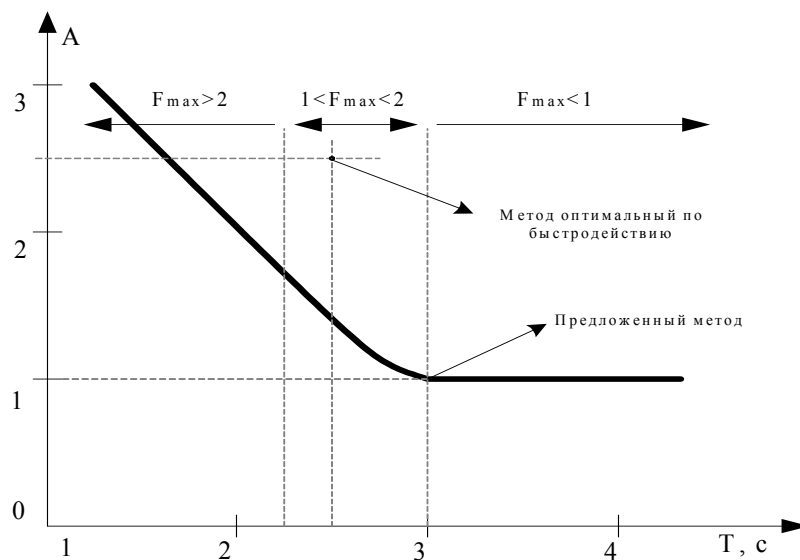


Рис.3 – Зависимость быстродействия от энергоэффективности

Вывод: предложенный способ позволяет:

- осуществлять разгон тележки с подвешенным грузом без колебаний;
- увеличить энергоэффективность в 2,5 раза при незначительном снижении быстродействия (15%);
- снизить динамические нагрузки;
- осуществлять разгон и торможение без этапа реверсирования;
- увеличить быстродействие на 10% за счет увеличения максимального момента разгона на 50% .

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимьяк Р.П., Мельникова Л.В. Оптимальное управление крановым механизмом передвижения. // Автоматика. Автоматизация. Электротехн. Комплексы и системы. – 1999 - №1. – С. 87 – 94.
2. Григоров О. В., Петренко Н. О. Вантажопідійомні машини: Навч. посібник. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2006.–304 с.
3. Ловейкін В. С., Ярошенко В. Ф., Ромасевич Ю. О. Оптимізація перехідних режимів руху механізму пересування візка вантажопідіймних машин // Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства імені Петра Василенка. – 2007. – Випуск №59. Том 2. – С. 452-460.