

ОПТИМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОВЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ С КРУПНОГАБАРИТНЫМИ ГРУЗАМИ НА СУДАХ

УДК 681.5

СОЛОВЕЙ Александр Степанович

аспирант, Херсонская государственная морская академия,
начальник отдела организации практики, дипломирования и трудоустройства

БЕНЬ Андрей Павлович

к.т.н., доцент, Херсонская государственная морская академия,
проректор по научно-педагогической работе

РОЖКОВ Сергей Александрович

д.т.н., проф., Херсонская государственная морская академия,
заведующий кафедрой эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики

Введение. Объемы морских перевозок так называемых тяжелых крупногабаритных грузов для потребностей энергетической промышленности, офшорной индустрии, продолжают расти, несмотря на кризисные явления в мировой экономике.

В условиях, когда необходимо обеспечить оптимальную загрузку судна, экономические соображения заставляют вводить в эксплуатацию все более крупные специализированные морские суда (Heavy Lift Carrier), оборудованные собственными кранами грузоподъемностью до 1000 тонн.

Одной из важнейших проблем и задач морского транспорта в различные периоды его развития является обеспечение безопасности проведения грузовых операций. Морские и речные перевозки тяжелых негабаритных грузов на сегодняшний день крайне востребованы ввиду необходимости перевозок специальной, строительной, сельскохозяйственной и прочей техники, больших цистерн, промышленного оборудования для нефтяной и газовой промышленности, ветро- и гидроэнергетики. Для перевозки грузов такого типа активно создаются и используются специализированные суда типа Heavy Lift Carrier, оборудованные собственными кранами. Наиболее ответственными, сложными и ава-

рийноопасными этапами перевозки тяжелых негабаритных грузов являются этапы погрузки и выгрузки их на судно.

Однако при выполнении грузовых операций с крупногабаритными грузами на судах возникают две проблемы: во-первых, стабилизация положения судна, и во-вторых, обеспечение безопасности грузовых операций при минимальных затратах времени на ее проведение. Задача стабилизации судна неразрывно связана с задачей динамического позиционирования в условиях действующих возмущений, в этом случае основной проблемой является недостаток ресурса управления даже при оптимальных алгоритмах управления. При этом задачи обеспечения безопасности грузовыми операциями требует использования современных методов оптимального управления при минимальных затратах времени.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Задача выполнения грузовых операций с крупногабаритными грузами на судах предполагает реализацию такого управления, которое должно обеспечивать заданную точность при минимальных затратах управления (энергии) [1-5]. При этом сложность задачи позиционирования судна и

выполнения грузовых операций требует использования оптимальных законов управления [8, 11, 17, 19]. Однако при синтезе оптимальных регуляторов существуют объективные трудности, которые связаны с ограничениями в условиях задачи управления, вычислительными трудностями и ошибками идентификации модели объекта.

Целью статьи является решение задачи моделирования и разработки стратегий оптимального управления грузовыми операциями с тяжелыми крупногабаритными грузами на морских судах с учетом влияния массы груза, коррекции ошибок идентификации и построения операции вычисления оптимального управления движениями в системе «судно – груз».

Изложение основного материала. Современная практика проектирования систем управления основывается на использовании оптимальных систем управления, которые предполагают наличие целевого функционала. С точки зрения теории управления наибольший интерес представляют оценки качества управления в виде интегральных функционалов

$$J(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}'(t), \mathbf{u}(t), t) = \int_{t_0}^{t_1} F(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}'(t), \mathbf{u}(t), t) dt \quad (1)$$

При этом, для ограничений в виде динамической системы с целевым функционалом (1)

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^*(t), \mathbf{u}^*(t) &\rightarrow \min J(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}'(t), \mathbf{u}(t), t); \\ \dot{\mathbf{x}} &= \Phi(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t). \end{aligned} \quad (2)$$

Для существования оптимума (2) необходимо выполнение условий Лагранжа-Эйлера [7]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} &= \frac{d\lambda}{dt} \\ \frac{\partial H}{\partial \lambda} &= -\frac{d\mathbf{x}}{dt} \\ \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} &= \mathbf{0} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В этом случае, основная трудность использования оптимального управления связана с решением системы дифференциальных уравнений (3) в частных производных, которое в общем случае представляется рядом.

При выборе алгоритма оптимального управления, учет близости производных сужает возможности поиска оптимума, поэтому в случае оптимизации в про-

странстве $C_0[t_0, t_1]$ говорят о сильном оптимуме, а в пространстве $C_1[t_0, t_1]$ достигается слабый оптимум.

Естественно сохраняются свойства локальности и глобальности оптимума, при этом единственность оптимума определяет его глобальность – абсолютный оптимум и придает функционалу выпуклые свойства.

Однако в этом случае важную роль играет стационарность системы. Для стационарной системы идентификация объекта проводится только при пуске системы, в то время как для нестационарной системы идентификация проводится постоянно. Для выпуклых функционалов цели и стационарных систем обычно применяется принцип максимума Понтрягина [9].

Предположим, что в простой вариационной задаче

$$\begin{aligned} x^*(t) &\rightarrow \text{extr}\{J(x, x'(t), t)\} = \text{extr} \int_{t_0}^{t_1} F(x(t), x'(t), t) dt \quad (4) \\ t &\in (t_0, t_1) \\ x(t_0) &= x_0; \quad x(t_1) = x_1 \end{aligned}$$

Если целевой функционал обладает выпуклыми свойствами (квазирегулярен или регулярен – строго выпукл), при условии полной управляемости динамической системы ограничения, которые позволяют считать ограничения выпуклыми, получаем задачу выпуклого программирования.

Достоинство такой постановки задачи в том, что в случае справедливости предположения выпуклости задачи решением задачи (4) мы имеем единственный глобальный минимум. При этом условия выпуклости позволяют использовать теорему Куна-Таккера для Лагранжиана [9, 10]:

$$L(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}, \lambda^*) \leq L(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*) \leq L(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*, \lambda^*) \quad (5)$$

Учитывая идентичность экстремальных свойств функции Лагранжа и функции Гамильтона при $\lambda = \lambda^*$, запишем условие Куна-Таккера [8] в терминах функции Гамильтона:

$$H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}, \lambda^*) \leq H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*) \leq H(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*, \lambda^*)$$

Отсюда формируем прямую и двойственную задачу с разделением переменных состояния и управления:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^* &\rightarrow_{u=u^*} \min H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*) \\ \mathbf{u}^* &\rightarrow_{x=x^*} \max H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*) \end{aligned} \quad (6)$$

Предполагая, что траектория движения оптимальна $x=x^*$, в (6) переходим к двойственной задаче:

$$\mathbf{u}^* \rightarrow_{x=x^*} \max H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*)$$

При этом в канонической форме выполняются необходимые условия оптимума и условие стационарности по управлению

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{d\lambda}{dt}; \quad \frac{\partial H}{\partial \lambda} = -\frac{dx}{dt}; \quad \frac{\partial H}{\partial u} = 0. \quad (7)$$

Собственно (7) это и есть принцип максимума Понтрягина – на оптимальной траектории при оптимальном управлении функция Гамильтона достигает своего максимума.

Однако система уравнений (7) по-прежнему представляет собой систему уравнений в частных производных и, как следствие, решение этой системы, в общем случае, представляет ряд.

Существует ряд задач, где использование принципа максимума дает простое решение. Так как оптимальное управление строится на основе модели, то любая ошибка в определении параметров модели ведет к существенному ухудшению управления.

Для известной задачи оптимального быстродействия [9] для объекта

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = ku,$$

где x – координата, k – постоянная, u – управление, на которое накладывается ограничение по ресурсу

$$|u(t)| \leq 1$$

Ставится задача: перевести объект по оптимальной траектории за минимальное время из начального состояния системы

$$x_0 = x(t_0), \quad \dot{x}(t_0) = 0,$$

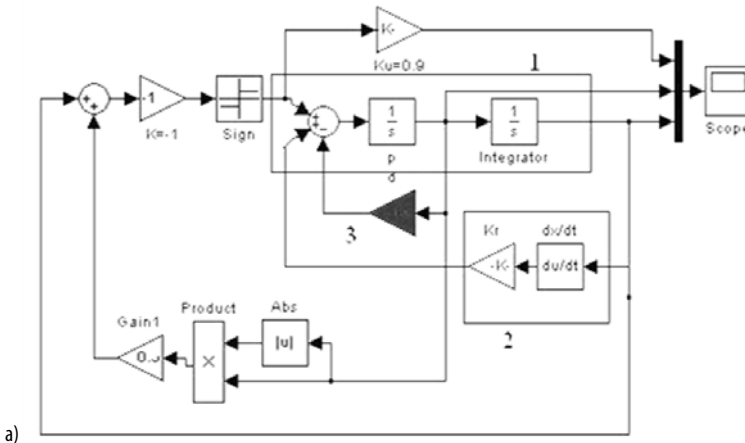
в точку конца траектории

$$x(t_k) = 0, \quad \dot{x}(t_k) = 0.$$

Получаем оптимальное управление по Понтрягину [6] для ресурса управления k_u

$$u^* = k_u \text{sign}(-0.5\dot{x}|x|)$$

Однако в данном случае для оптимального управления критичны ошибки идентификации системы. На рис. 1 приведена модель оптимального управления линейным объектом [18, 20].



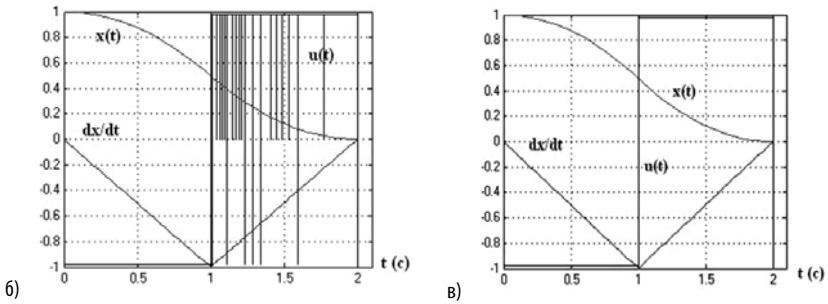


Рис. 1. Схема моделирования и переходные процессы в системе с оптимальным управлением:
 а) схема моделирования; б) переходные процессы при наличии ошибки идентификации;
 в) переходные процессы после введения Д-составляющей в тракт управления

Модель объекта, (рис. 1, а, поз. 1) имеет цепь 3, описывающую ошибку идентификации. Эта ошибка имеет вес 10-8, что достаточно мало влияет на свойства объекта. Однако при оптимальном управлении возникают колебания в управлении (рис. 1, б), что на реальном объекте вызывают значительные ошибки. Устранение ошибки, вызванной неточной идентификацией, возможно введением цепи Д-регулятора (рис. 1, а, поз. 2). Переходный процесс при оптимальном управлении и коррекции ошибки идентификации за счет введения Д-составляющей в канал управления приведен на рис. 1, в.

Таким образом (рис.1), существует реальный выигрыш от совмещения оптимального алгоритма управления и традиционных компонент ПИД-регулятора [13 – 16].

Для систем регулирования, в частности систем стабилизации, важным условием, является соотношение между ошибкой и мощностью, затрачиваемой на устранение этой ошибки. При этом мощность управления P_u , затрачиваемая на устранение ошибки Δx за время Δt_r при ресурсе управления u_m определяется соотношением

$$P_u = \frac{|u_m|^2}{\Delta t_r}.$$

При оптимальном регулировании уменьшение ошибки требует значительных затрат управления, а полное устранение ошибки – бесконечного ресурса

управления. На рис. 2 приведена зависимость оценки мгновенной мощности управления от оценки ошибки, для модели (рис.1).

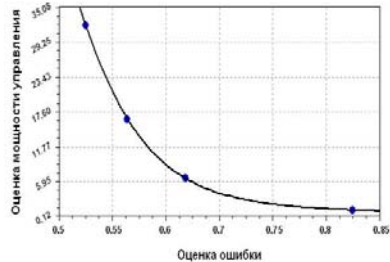


Рис. 2. Влияние ресурса управления на время переходного процесса

Необходимо учитывать, что принцип максимума Понтрягина является только необходимым условием, и является достаточным условием в случае выпуклой задачи. Недостатком принципа максимума Понтрягина является невозможность его применения в случае отсутствия выпуклых свойств в задаче.

При построении оптимального управления операциями с крупногабаритными грузами необходимо учитывать ограничения, которые связанные с требованием возможно меньших перегрузок в системе «кран – груз». Рассмотрим ускорения, воздействующие на груз (табл.1).

Таблиця 1

Ускорення груза

Линейное ускорение	$\mathbf{a} = \ddot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{d^2 x}{dt^2} \\ \frac{d^2 y}{dt^2} \\ \frac{d^2 z}{dt^2} \end{bmatrix}$
Тангенциальное ускорение	$\dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{x}_\theta = \begin{bmatrix} +i \left(\frac{d^2 \psi}{dt^2} z_\theta - \frac{d^2 \chi^2}{dt^2} y_\theta \right) \\ -j \left(\frac{d^2 \varphi}{dt^2} z_\theta - \frac{d^2 \chi^2}{dt^2} x_\theta \right) \\ +k \left(\frac{d^2 \varphi}{dt^2} y_\theta - \frac{d^2 \psi}{dt^2} x_\theta \right) \end{bmatrix}$
Центростремительное уравнения	$\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x}_\theta) = \begin{bmatrix} -\frac{d\psi}{dt} \left(\frac{d^2 \varphi}{dt^2} y_\theta - \frac{d^2 \psi}{dt^2} x_\theta \right) + \frac{d\chi}{dt} \left(\frac{d^2 \varphi}{dt^2} z_\theta - \frac{d^2 \chi^2}{dt^2} x_\theta \right) \\ -\frac{d\varphi}{dt} \left(\frac{d^2 \varphi}{dt^2} y_\theta - \frac{d^2 \psi}{dt^2} x_\theta \right) + \frac{d\chi}{dt} \left(\frac{d^2 \psi}{dt^2} z_\theta - \frac{d^2 \chi^2}{dt^2} y_\theta \right) \\ -\frac{d\varphi}{dt} \left(\frac{d^2 \varphi}{dt^2} z_\theta - \frac{d^2 \chi^2}{dt^2} x_\theta \right) - \frac{d\psi}{dt} \left(\frac{d^2 \psi}{dt^2} z_\theta - \frac{d^2 \chi^2}{dt^2} y_\theta \right) \end{bmatrix}$
Кориолисово ускорение	$2\boldsymbol{\omega} \times \frac{d' \mathbf{x}_\theta}{dt} = 2 \begin{bmatrix} +i \left(\frac{d\psi}{dt} \frac{d' z_\theta}{dt} - \frac{d\chi}{dt} \frac{d' y_\theta}{dt} \right) \\ -j \left(\frac{d\varphi}{dt} \frac{d' z_\theta}{dt} - \frac{d\chi}{dt} \frac{d' x_\theta}{dt} \right) \\ +k \left(\frac{d\varphi}{dt} \frac{d' y_\theta}{dt} - \frac{d\psi}{dt} \frac{d' x_\theta}{dt} \right) \end{bmatrix}.$

Определим условие, при котором воздействующие на груз ускорения минимально возможны.

Из анализа табл.1 можно сделать вывод, что траектория должна состоять из простых движений. Действительно, при линейном движении груз испытывает только линейные ускорения:

$$\left. \begin{matrix} \mathbf{v} \neq \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\omega} = \mathbf{0} \end{matrix} \right\} \rightarrow \begin{cases} \mathbf{a} \neq \mathbf{0} \\ 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} = \mathbf{0} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{x}_\theta = \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x}_\theta) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (8)$$

А при повороте крана

$$\left. \begin{matrix} \mathbf{v} = \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\omega} \neq \mathbf{0} \end{matrix} \right\} \rightarrow \begin{cases} \mathbf{a} = \mathbf{0} \\ 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} = \mathbf{0} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{x}_\theta \neq \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x}_\theta) \neq \mathbf{0} \end{cases} \quad (9)$$

Таким образом, из анализа выражений (8) и (9) можно сделать вывод, что существует возможность получить уменьшение нагрузок в системе «судно – кран – груз» простым выбором траектории движения груза (рис.3).

Выбор кусочных траекторий (рис. 3) позволяет по умолчанию снизить нагрузки на судовые краны. Если при операциях с относительно малыми грузами (по весу) целесообразно использовать гладкую траекторию [8-10], то при операциях со сверхтяжелыми крупногабаритными грузами гладкая траектория движения груза заведомо ведет к появлению дополнительных напряжений в системе подвеса груза, а это может привести к аварии или катастрофе [1, 5].

С одной стороны, определенность траекторий сужает возможности оптимизации задачи, а с другой – целевым функционалом задачи является время T , затраченное на

операции погрузки – разгрузки. Таким образом, оптимальное управление процессом погрузки – разгрузки приводит к оптимизационной задаче вида (10)

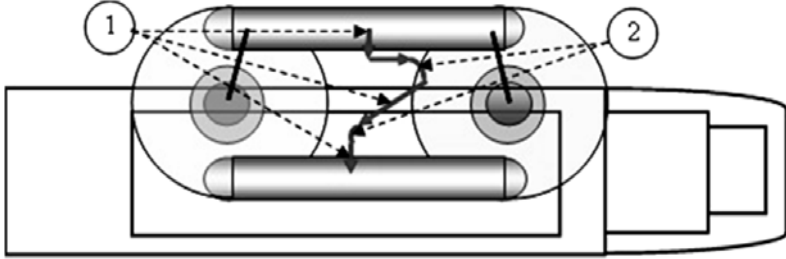


Рис. 3. Траектория движения крупногабаритного груза: 1 – поступательное движение, 2 – вращение

Задача (10) содержит функционал цели J , закрепления и динамические модели груза с координатами \mathbf{g} и судна с координатами \mathbf{x} . В этой постановке задачи можно рассматривать два случая: судно пришвартовано, $\mathbf{x} = \text{const}$, и компенсируются все возмущения, и случай, когда груз неподвижен, $\mathbf{g} = \text{const}$, а судно производит эволюции. При этом, в случае, когда координаты груза постоянны, $\mathbf{g} = \text{const}$, задача упрощается.

Обозначив $A^{-1}B=A$, $A^{-1}D=B$ и выделив в правой части управления \mathbf{u} и возмущения \mathbf{Q} , получаем (11)

$$\left. \begin{aligned} J &= \int_0^T dt = T \\ \mathbf{g}(0) &= \mathbf{g}_0; \quad \mathbf{g}(T) = \mathbf{g}_0 \\ \mathbf{x}, \mathbf{g} \in X_d, G_d; \quad \mathbf{x}(0) &= \mathbf{x}_0; \quad \mathbf{x}(T) = \mathbf{x}_T \\ \dot{\mathbf{x}}(0) &= \mathbf{0}; \quad \dot{\mathbf{x}}(T) = \mathbf{0} \\ \ddot{\mathbf{g}} + A^{-1}B\dot{\mathbf{g}} + A^{-1}D\mathbf{g} &= \mathbf{F} \\ \ddot{\mathbf{x}} + A_k^{-1}B_k\dot{\mathbf{x}} + A_k^{-1}D_k\mathbf{x} &= \mathbf{F}_k \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} J &= \int_0^T dt = T \\ \mathbf{g}(t) &= \text{const} \\ \mathbf{x} \in X_d; \quad \mathbf{x}(0) &= \mathbf{x}_0; \quad \mathbf{x}(T) = \mathbf{x}_T \\ \dot{\mathbf{x}}(0) &= \mathbf{0}; \quad \dot{\mathbf{x}}(T) = \mathbf{0} \\ \ddot{\mathbf{x}} + A\dot{\mathbf{x}} + B\mathbf{x} &= \mathbf{u} + \mathbf{Q} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

В задаче (11) интегрант функционала цели вырожден $f = 1$. Преобразовав ограничения к виду равенства, получим мгновенное выражение для функции Лагранжа [– 14]

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \lambda_0 + \langle \lambda, (\mathbf{u} - \ddot{\mathbf{x}} - A\dot{\mathbf{x}} - B\mathbf{x}) \rangle. \quad (12)$$

Включив λ_0 в (12) как компонент вектора λ , переходя в обозначениях от функции Лагранжа к функции Гамильтона, можем записать в виде

$$\begin{aligned} H(\mathbf{x}, \mathbf{u}) &= \langle \lambda_0 + \lambda, (\ddot{\mathbf{x}} + A\dot{\mathbf{x}} + B\mathbf{x} - \mathbf{u}) \rangle = \\ &+ \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i (\ddot{x}_i + a_{i1}\dot{x}_i + \dots + a_{in}\dot{x}_n + b_{i1}x_1 + \dots + b_{in}x_n - u_i). \end{aligned} \quad (13)$$

На оптимальной траектории для (13) определим функционал Лагранжа, или в принятых терминах, функционал Гамильтона

$$\tilde{H} = \int_0^T H(\mathbf{x}, \mathbf{u}) dt = \int_0^T (\lambda_0 + \langle \lambda, (\ddot{\mathbf{x}} + A\dot{\mathbf{x}} + B\mathbf{x} - \mathbf{u}) \rangle) dt. \quad (14)$$

Учитывая зависимость от времени, запишем условие оптимальности на траектории $x = x(t)$

$$(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, t) \rightarrow \delta \tilde{H}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, t) = 0; \quad t \in [0, T].$$

Для независимых переменных \mathbf{x} , \mathbf{u} , λ условие Эйлера дает

$$\delta \tilde{H}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, t) = 0 \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} - \frac{d}{dt} \frac{\partial H}{\partial \dot{\mathbf{x}}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial H}{\partial \ddot{\mathbf{x}}} = \mathbf{0} \\ \frac{\partial H}{\partial \lambda} = \mathbf{0} \\ \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0} \end{cases}; \quad t \in [0, T] \quad (15)$$

Решая (15) следует учитывать, что возмущения в системе низкочастотные, и существуют три независимы переменных \mathbf{x} , \mathbf{u} , λ . Получим систему уравнений (16)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} = A \frac{d\lambda}{dt} - \frac{d^2 \lambda}{dt^2} \\ \frac{\partial H}{\partial \lambda} = \ddot{\mathbf{x}} + A\dot{\mathbf{x}} + B\mathbf{x} - \mathbf{u} \\ \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0} \end{aligned} \right\} \rightarrow \left. \begin{aligned} \frac{d^2 \lambda}{dt^2} - A \frac{d\lambda}{dt} + B\lambda = \mathbf{0} \\ \frac{\partial H}{\partial \lambda} = \ddot{\mathbf{x}} + A\dot{\mathbf{x}} + B\mathbf{x} - \mathbf{u} \\ \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0} \end{aligned} \right\}; \quad (16)$$

Используя принцип максимума Понтрягина

$$\mathbf{u}^*_{x=x^*} \rightarrow \max H.$$

Формируем условия оптимальности из двух условий канонической системы (16) и связи принципа максимума

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \lambda}{dt^2} - A \frac{d\lambda}{dt} + B\lambda = \mathbf{0} \\ \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0} \\ \mathbf{u}^*_{\substack{x=x^* \\ \lambda=\lambda^*}} \rightarrow \max H \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Из первого уравнения условий оптимальности (17) находим оптимальное значение для $\lambda = \lambda^*$, как решение дифференциального уравнения. Второе условие, при ненулевом λ , не выполняется. Однако, учитывая линей-

ность функции Гамильтона, получаем условие, ограничивающее выбор оптимальности управления

$$\mathbf{u}^* \in \{+\mathbf{u}_{\max}, -\mathbf{u}_{\max}, \mathbf{0}\}$$

Исходя из принципа максимума получаем условия выбора управления (18)

$$\mathbf{u}^* \rightarrow \max \langle \lambda^*, (\ddot{\mathbf{x}} + A\dot{\mathbf{x}} + B\mathbf{x} - \mathbf{u}) \rangle. \quad (18)$$

Исходя из правила n интервалов для (18) получаем два интервала знакопостоянства управления и возможность оценить связь критерия оптимальности и используемого ресурса управления

$$\tilde{T} \approx \frac{2}{\alpha_{\max}} \frac{|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0|^*}{|\mathbf{u}^*|}.$$

Следовательно, оптимальность управления определяется на каждом участке траектории как два знакопостоянных отрезка управления.

Учет граничных условий требует, чтобы выполнялись следующие равенства

$$\begin{aligned} x(0) &= 0; & \dot{x}(0) &= 0; \\ x(T) &= x_T; & \dot{x}(T) &= 0. \end{aligned}$$

Условия в начале траектории не вызывают трудностей, а условия в конце траектории позволяют определить момент снятия управления. При нахождении решения дифференциального уравнения необходимо решить задачу Коши [6-7].

Отнесем неопределенную переменную C_λ к первому уравнению системы (17). В этом случае переключения управления происходят в моменты изменения знака λ – конец первого интервала знакопостоянства и снятие управления при $dx/dt = 0$. Выбор постоян-

ной C_λ проводим градиентной процедурой по критерию отсутствия перегулирования. Схема моделирования определения оптимального управления приведена на рис. 4. Решение дифференциального уравнения определяет блок 1 (рис. 4).

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \lambda}{dt^2} - A \frac{d\lambda}{dt} + B\lambda &= 0; \\ \lambda_0 &= x_T. \end{aligned} \quad (19)$$

Выражение (19) дает решение уравнения системы в «обратном времени». При этом неопределенная константа определяется простой градиентной процедурой по критерию минимума перегулирования переходного процесса δ

$$\lambda_{0i+1} = \lambda_{0i} + \frac{\text{grad } \delta}{|\text{grad } \delta|}$$

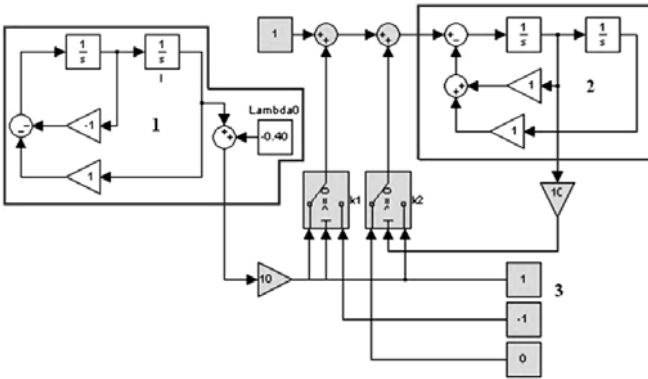


Рис. 4. Схема моделирования оптимального управления

Критерий снятия управления формируется блоком 2 модели процесса (рис.4) по условию равенства скорости нулю

$$\ddot{x} + A\dot{x} + Bx = u$$

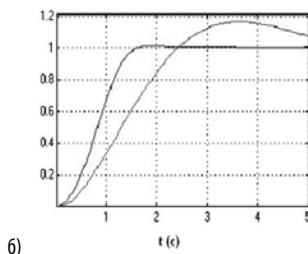
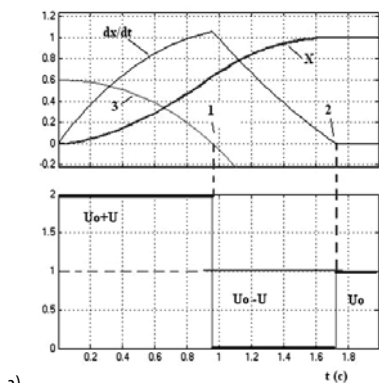
Условия переключения управления могут быть определены автоматически

$$u = \begin{cases} +u_m & \text{if } \dot{\lambda}^* > 0 \\ -u_m & \text{if } \dot{\lambda}^* < 0 \\ 0 & \text{if } \dot{x} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

Результаты моделирования системы оптимального управления приведены на рис. 5. Таким образом, при построении оптимального управления грузовыми операциями на судах необходимо решать задачу опре-

деления точек переключения, используя метод моделирования обратного (попятного) движения совместно

с градиентной процедурой определения постоянной в обратном решении.



а)

б)

Рис. 5. Результаты моделирования системы оптимального управления:

а) переходные процессы и управление в системе; б) сравнение переходных процессов в оптимальной системе и системе при постоянном управлении

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены особенности задачи управления грузовыми операциями и использование классических алгоритмов оптимального управления применительно к динамике операций с тяжелыми крупногабаритными грузами. Предложен и обоснован метод построения управления, оптимального по Понтрягину, с использованием моделирования обратного (попятного) движения, как процесса свободного движения λ модели из конечной точки траектории с градиентной процедурой определения постоянной интегрирования.

Системы управления линейными объектами, оптимальные по быстрдействию, чувствительны к ошибкам идентификации, что требует коррекции моделей, например, с использованием корректирующих регуля-

торов. При этом возможности оптимального регулятора определяются ресурсом управления.

При работе с тяжелыми крупногабаритными грузами необходимо разделять траектории на простые движения, что снижает перегрузки в системе управления. Использование операции управления, оптимального по времени, ведет к противоречию между требованием минимальности ускорений движения груза и требованием минимального времени перемещения тяжелого крупногабаритного груза.

В работе показана целесообразность совместного использования в регуляторе оптимальных и неоптимальных компонент, где предложенная процедура обеспечивает минимальное время переходного процесса при отсутствии перерегулирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Ben' A.P. Puti povysheniya bezopasnosti gruzovyh operacij s tjazhelymi i negabaritnymi gruzami na specializirovannyh sudah / A.P. Ben', S.S. Solovej // Naukovij visnik Hersons'koj derzhavnoi mors'koj akademii № 2 (09), 2013. –S.244-248.
2. Ben' A.P. Usovsherenstvovanie metodov kontrolja pod#mnogo ugla (hoisting angle) vo vremja provedeniya gruzovyh operacij s tjazhelymi i negabaritnymi gruzami na specializirovannyh sudah / A.P. Ben', S.S. Solovej // Naukovij visnik Hersons'koj derzhavnoi mors'koj akademii № 1 (10), 2014. –S.262-267.
3. Solovej A.S. Kontrol' parametrov ostojchivosti specializirovannyh sudov pri vypolnenii gruzovyh operacij s tjazhelymi i negabaritnymi gruzami // Sudovozhdenie: Sb. nauchn. trudov./ ONMA, Vyp. 25. – Odessa: IzdatInform, 2015. –S. 162-167.

4. Solovej O.S. Vibir zakonu reguljuvannja v zadachi pozicionuvannja specializovanih vantaznih mors'kih suden / O.S. Solovej, A.P. Ben', S.O. Rozhkov // Visnik Hersov'nogo nacional'nogo tehnicnogo universitetu №3(62), 2017. –Т.1. –S.221-227.
5. Ershov A. A. Kontrol' ostoichivosti i posadki sudna pri pogruzke i vygruzke /A. A. Ershov. – SPb : GMA im. adm. S. O. Makarova, 2002. –60 s.
6. Moiseev N.N. Chislennye metody v teorii optimal'nyh sistem / N.N. Moiseev. – M.: Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury izd-va «Nauka», 1971. – 424 s.
7. Griffiths F. Vneshnie differencial'nye sistemy i variacionnoe ischislenie /F. Griffiths. –M.: Mir, 1980. –360 s.
8. Petrov Ju.P. Optimal'nye reguljatory sudovyh silovyh ustanovok (teoreticheskie osnovy) –L.: Sudostroenie, 1966. –121 s.
9. Ivanov V.A. Teorija optimal'nyh sistem avtomaticheskogo upravlenija / V.A.Ivanov, N.V. Faldin. – M.: Nauka, 1981. –336 s.
10. Rej U. Metody upravlenija tehnologicheskimi processami / U Rej; per. s angl. – Mir, 1983.– 386 s.
11. Rozhkov S.O. Optimal'ne keruvannja tehnologichnimi kompleksami / S.O. Rozhkov //Adaptivni sistemi avtomatichnogo upravlinnja. Mizh-vidomchij naukoivo-tehnicnij zbirnik. – Kiiiv: Nacional'nij tehnicnij universitet Ukraini "Kiiiv's'kij politehnicnij institut". – 2015. –№2(27). – S.10–19.
12. Tung, F. Linear Control Theory Applied to Interplanetary Guidance, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC–9, No. 1, 1964. 82–89 pp. DOI: 10.1109/TAC.1964.1105626.
13. Kalman R.E. Fundamental Study of Adaptive Control Systems. Technical report, No.ASD-TR-61-27, Vol.1, 1962. – 282 p. <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/282873.pdf>.
14. Sage, A. P. Optimum Systems Control, Chapter 15, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1968.
15. Gunckel, T.L., Franklin, G.F. A General Solution for Linear, Sampled-Data Control, Transactions of the ASME, Series D, Vol. 85, pp. 197–203, 1963.
16. Lee, R. C. K., Optimal Estimation, Identification, and Control, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1964.
17. Asgeir J. Sorensen. Marine Control Systems Propulsion and Motion Control of Ships and Ocean Structures. Lecture Notes. Department of Marine Technology Norwegian University of Science and Technology. Report UK-13-76.
18. BBC Guideline. Safe solutions for project cargo operations. Version 1.0. — Leer: BBC Chartering and Logistic GmbH&Co.KG, 2009. — 76 p. www.bbc-chartering.com
19. Syvertsen Pål G. Modeling and Control of Crane on Offshore Vessel // Norwegian University of Science and Technology. Masters thesis, 2011. – 106 p.
20. Loading Computer System seacoast MACS3 Version NET 1.1 Crane Operation Module Manual / INTERSCHALT maritime systems AG – Wilhelmstrasse 7-9 – 24937 Flensburg

Рецензент: д.т.н., проф. Рудакова А.В.,
Херсонский национальный технический университет.