

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 658.4:350.5 (432.28)

А. А. Чертков,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

Д. С. Тормашев,
канд. техн. наук, ст. преподаватель,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет
морского флота имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»;

С. В. Сабуров,
аспирант,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СУДОВОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕРАВЕНСТВ

SHIPPING DYNAMIC SYSTEM ENERGoeffICIENT CONTROL ON THE BASE OF INEQUALITY THEORY

Статья посвящена оптимальному управлению судовой динамической системой по критерию расхода энергии. Вектор управления, обеспечивающий повышение энергоэффективности системы, синтезирован на основе теории неравенств. Приведен пример, количественно подтверждающий энергетическую эффективность оптимального режима.

The article is devoted to ship's dynamic optimal control system used energy consumption goal. Control vector system's energy efficient synthesized by inequality theory is risen. The example energy efficient quantitative acknowledge by optimal control is devoted.

Ключевые слова: теория неравенств, неравенства Гёльдера и Коши–Шварца, энергетическая эффективность, оптимизация, управление расходом энергии.

Key words: inequality theory, Hölder and Cauchy–Schwarz inequalities, energy efficiency, optimization, energy consumption control.

ТРЕБОВАНИЯ, предъявляемые на водном транспорте к повышению энергоэффективности динамических объектов и систем, решение проблемы энергосбережения на качественно новом уровне должны выполняться с использованием методов и средств современной теории оптимизации, математического моделирования и алгоритмизации принятия решений [3]. Оптимизационные процессы являются наукоемкими; их применение для управления сложными технологическими комплексами с нелинейной динамикой связано с известными трудностями аналитической формализации, не единственностью решения и обеспечением устойчивости. Поэтому решения выполняются, как правило, численными методами, с использованием функций математического программирования и их применением в различных вычислительных средах. Однако в отдельных случаях для класса динамических объектов невысокой размерности возможны аналитические решения, вытекающие непосредственно из известных результатов научных исследований, полученных в области теории неравенств. Эффективность таких аналитических решений, ясность и технологическая «прозрачность», определяющие простоту достижения конечного результата, безусловно, представляют интерес для их практических приложений в соответствующей предметной области [2, с. 11–17]. В частности, для класса объектов с подводом

энергии на управление по схеме «включено–выключено» можно получить энергоэффективное управление, оптимизировать параметры системы и выбрать периодичность включений с учетом динамики. К таким объектам можно отнести судовые системы, содержащие в структуре отопительные котлы серии КОАВ; системы электропитания буев и различных устройств судоводной обстановки с автономными источниками электроэнергии; системы световой сигнализации, используемые при расхождении судов на внутренних водных путях, и др.

Предположим, что судовый объект управления описывается нелинейным дифференциальным уравнением:

$$\dot{x}(t) = f(x, u, t) \quad (1)$$

с вектором состояния $x \in R^n$ и входом $u(t) \in R^m$.

Введем критерий качества системы управления:

$$J(t_0) = \Phi(x(T), T) + \int_{t_0}^T L(x(t), u(t), t) dt, \quad (2)$$

где (t_0, T) — временной рабочий интервал. Видно, что весовая функция $\Phi(x(T), T)$ зависит от конечного состояния и времени T . Подынтегральная функция $L(x(t), u(t), t)$, как следует из уравнения (2), изменяется в зависимости от состояния, управления и текущего времени t в промежутке (t_0, T) .

Задача оптимального управления состоит в определении таких значений вектора $u^*(t)$ на временном рабочем интервале, которые переводят объект (1) по траектории $x^*(t)$ из начального в конечное состояние при минимизации критерия качества (2). Для определения вектора оптимального управления нелинейной системой (1) можно применить различные методы оптимизации.

Если используют принцип максимума Л. С. Понтрягина, то учитывают особенности функционирования объекта во всех допустимых технологических режимах, адекватность математического описания реальному процессу, выбирают наиболее подходящий способ управления или комбинацию способов, рассматривают возможности упрощения моделей и понижения их размерностей и др.

Если применяют алгоритм расчета непрерывного во времени оптимального управления системой с фиксированным значением функции в конечном состоянии, то учитывают следующие составляющие: динамику объекта (1), критерий качества (2), значения вектора выхода (состояния) на левой и правой границах.

Согласно алгоритму выполняют также расчет оптимального регулятора. Для оценки параметров регулятора в свою очередь требуется: составить гамильтониан с введением множителей Лагранжа, получить в терминах гамильтониана уравнения состояния и сопряженного состояния (называемого также косостоянием), проверить условия стационарности и определить граничные условия. Этот непростой процесс преобразований для задач высокой размерности часто должен выполняться на компьютерах, с использованием аппарата символьной математики, специальных вычислительных сред (например, MAPLE), существенно сокращающих объем рутинных операций.

Если появляется возможность известные положения теории неравенств применить к решению конкретной технической задачи, то это может значительно упростить процедуру оптимизации как на этапе проектирования, так и технической реализации системы управления [1]. Рассмотрим решение задачи оптимизации динамического объекта с заданной передаточной функцией с помощью неравенств Гёльдера и Коши–Шварца.

Интегральный вариант неравенства Коши–Шварца можно представить следующим образом. Пусть $f(x)$ и $g(x)$ являются функциями аргумента x , определенными на некоторой области R . Для двух неубывающих функций $f(x)$ и $g(x)$ справедливо соотношение

$$\left| \int_a^b f(x)g(x)dx \right| \leq \left[\int_a^b |f(x)|^P dx \right]^{1/P} \left[\int_a^b |g(x)|^{P/(P-1)} dx \right]^{(P-1)/P}, \quad (3)$$

представляющее собой неравенство Гёльдера, где $(1 < P < \infty)$, $[*]$. При $P = \frac{P}{P-1} = 2$ неравенство

Гёльдера преобразуется в неравенство Коши–Шварца следующего вида:

$$\left| \int_a^b f(x)g(x)dx \right| \leq \left[\int_a^b |f(x)|^2 dx \right]^{1/2} \left[\int_a^b |g(x)|^2 dx \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Рассмотрим применение неравенств к решению задачи регулирования температуры в судовых помещениях при условии минимизации энергии, требуемой для ее поддержания. Предположим, что температура внешней среды θ_a на рабочем временном интервале регулирования изменяется несущественно. Управлением $u(t)$ является поток тепла, подводимого к объекту. Уравнение динамики системы:

$$\dot{\theta}(t) = -a(\theta(t) - \theta_a) + bu(t), \quad (5)$$

где a и b — постоянные, зависящие от тепловой изоляции помещений, их размеров и условий вентиляции. Определим состояние системы как разность температур:

$$x(t) = \theta(t) - \theta_a.$$

Тогда можно получить простую модель отопительной судовой системы:

$$\dot{x}(t) = -ax(t) + bu(t). \quad (6)$$

Для управления температурным режимом на фиксированном временном интервале $[0, T]$ с возможно меньшим расходом энергии необходимо воздействовать на систему таким образом, чтобы обеспечивался минимум критерия качества:

$$J(0) = \frac{1}{2} \int_0^T u^2(t) dt. \quad (7)$$

Заметим, что импульсная переходная функция системы (6) представляет собой

$$\frac{dh(t)}{dt} = \exp(-a \cdot t),$$

где $h(t)$ — реакция на единичный скачок. Определим с помощью интеграла свертки конечное значение переменной состояния при воздействии произвольного входа $u(t)$:

$$x(T) = \int_0^T h'(T - \tau)u(\tau)d\tau. \quad (8)$$

Если ввести обозначение $f(x) = h'(T - \tau)$ и $g(x) = u(\tau)$, то неравенство Коши–Шварца (4) преобразуется к виду

$$x(T) = \int_0^T h'(T - \tau)u(\tau)d\tau \leq \left[\int_0^T (h'(T - \tau))^2 d\tau \right]^{1/2} \left[\int_0^T u^2(\tau)d\tau \right]^{1/2}. \quad (9)$$

Заметим, что в выражении (9) интеграл квадрата входного сигнала представляет собой критерий качества (7). Поэтому справедливо неравенство

$$x(T) \leq \left[\int_0^T (h'(T - \tau))^2 d\tau \right]^{1/2} [2J]^{1/2}. \quad (10)$$

Возведем в квадрат левую и правую части (10). Тогда

$$x^2(T) \leq \left[\int_0^T (h'(T - \tau))^2 d\tau \right] 2J. \quad (11)$$

Из (11) следует, что критерием качества J будет наименьшее значение лишь при соблюдении знака равенства. В результате

$$J_{\text{opt}} = \frac{x^2(T)}{2 \int_0^T (h'(T - \tau))^2 d\tau}. \quad (12)$$

Интеграл в знаменателе (12) при подстановке импульсной переходной функции системы равен

$$\int_0^T (h'(T-\tau))^2 d\tau = \int_0^T b^2 \exp(-2a(T-\tau)) d\tau = \frac{b^2}{ae^{aT}} sh(aT),$$

и критерий качества при оптимальном расходе энергии на управление:

$$J_{\text{opt}} = \frac{x^2(T)ae^{aT}}{2b^2 sh(aT)} = \frac{x^2(T)a}{b^2(1-e^{-2aT})}. \quad (13)$$

Нетрудно видеть, что для получения (13) оптимальное управление $u^*(t)$ должно удовлетворять условию

$$u^*(t) = Dh'(T-t), \quad (14)$$

где D — постоянный коэффициент. Определим его значение из соотношения (8). Согласно (9) левая часть неравенства

$$x(T) = \int_0^T D[h'(T-\tau)]^2 d\tau = D \int_0^T b^2 e^{-2a(T-\tau)} d\tau = D \frac{b^2}{2a} (1 - e^{-2aT}).$$

Отсюда следует, что коэффициент D можно представить в терминах параметров системы и ее конечного состояния:

$$D = \frac{2ax(T)}{b^2(1-e^{-2aT})} = \frac{ax(T)e^{aT}}{b^2 sh(aT)}. \quad (15)$$

Оптимальное управление $u^*(t)$ получаем с помощью (14) и (15):

$$u^*(t) = \frac{a \cdot x(T)}{b \cdot sh(aT)} \exp(at). \quad (16)$$

Эффективность оптимального управления можно оценить путем сравнения (16) с любым другим законом управления, также обеспечивающим переход системы из состояния $x(0)$ в состояние $x(T)$ за время T . Предположим, что на вход системы (6) подается сигнал управления, изменяющийся в виде прямоугольного импульса. Амплитуда импульса находится из следующего условия. Если $u_p(t) = U_p = \text{const}$, то при нулевых начальных условиях переходный процесс:

$$x(t) = \frac{b}{a} U_p (1 - e^{-at}), \quad (17)$$

и чтобы в момент $t = T$ вектор состояния был равен $x(T)$, амплитуда U_p должна быть равна

$$U_p = \frac{ax(T)}{b(1-e^{-aT})}. \quad (18)$$

Величину критерия при $U_p = \text{const}$ определим с помощью интеграла:

$$J_{\text{rec}} = \frac{1}{2} \int_0^T U_p^2 dt = \frac{a^2 x(T)^2 T}{2b^2 (1 - \exp(-aT))^2}. \quad (19)$$

Для определенности выберем следующие значения коэффициентов передачи в уравнении (6): $a = 0,005$ и $b = 0,05$. После подстановки значений параметров и $x(T) = 10$ критерии качества (13) и (19) принимают вид:

$$J_{\text{opt}} = \frac{200}{1 - \exp(-2aT)}, \quad (20)$$

$$J_{\text{rec}} = \frac{T}{2(1 - \exp(-aT))^2}. \quad (21)$$

Теперь, располагая уравнениями (20) и (21), мы можем путем вариации T оценить критерии и произвести необходимые графические построения. На рис. 1 приведены графики J_{opt} и J_{rec} как функции заданного времени переходного процесса T .

Нетрудно видеть, что в диапазоне малых T , не превышающих для рассматриваемой динамической системы значений 100 с, эффект оптимизации проявляется слабо, поскольку $J_{\text{opt}} \approx J_{\text{rec}}$. Однако с увеличением T оптимальное управление позволяет получить существенную экономию энергии.

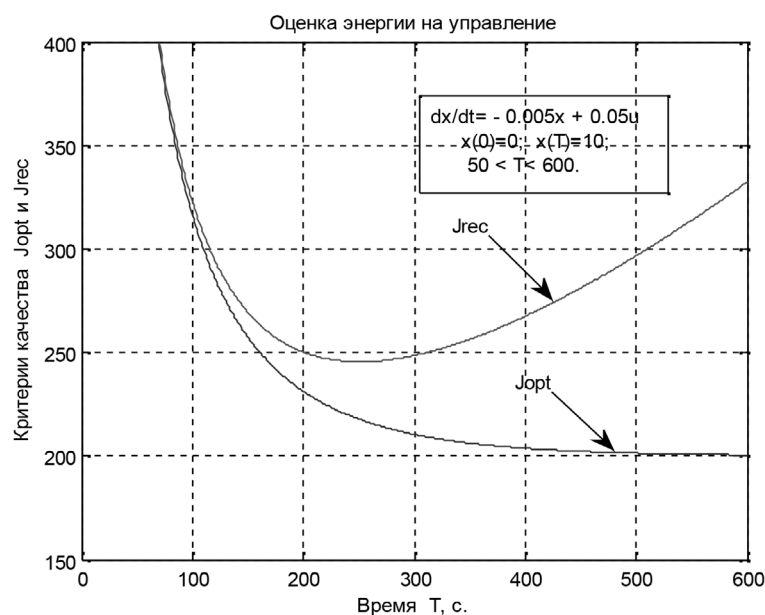


Рис. 1. Энергия на управление при оптимальной и прямоугольной формах входного сигнала

Так, если $T = 500$ с, то критерий при оптимальном управлении по закону (20) составляет $J_{\text{opt}} = 201,3567$, а в случае приложения ко входу ступенчатой функции с амплитудой U_p энергетические потери оцениваются $J_{\text{rec}} = 296,7120$.

В заключение отметим, что при управлении рассматриваемой судовой системой по критерию минимума расхода энергии на управление мы пришли к классическому результату: оптимальным является управление, пропорциональное импульсной переходной функции в инверсном времени.

При наличии ограничений, с увеличением размерности системы и повышением сложности модели теплообменных процессов в теплоемких конструкциях, объектах с распределенными параметрами, техническая реализация процессов экономии топлива и энергии должна базироваться, как правило, на численных методах оптимизации.

Простые модели энергоэффективного управления, базирующиеся на теории неравенств, могут найти применение в предиктивных системах управления подогревом нефти и нефтепродуктов перед началом грузовых операций в нефтеналивных портах. Процесс подогрева обладает большой энергоемкостью, а сам объект — танки с нефтепродуктами — высокими инерционными свойствами. Результаты моделирования показывают, что в сравнении с традиционными методами подогрева применение оптимального управления может дополнительно обеспечить экономию энергии, расходуемой на подогрев, в среднем от 3 до 7 %.

Список литературы

1. Глуценко В. В. Моделирование динамических систем и электрических цепей в среде MATLAB: учеб. пособие / В. В. Глуценко, В. В. Сахаров, Ю. В. Сумеркин. — СПб.: СПГУВК, 1998. — 293 с.
2. Пустошный А. В. Energy efficiency design index — новая реальность от IMO / А. В. Пустошный // Судостроение. — 2012. — № 1.
3. Resolution MERC. 214 (63). 2012 guidelines on survey and certification of the energy efficiency design index (EEDI).