

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 621.396

**В. В. Сахаров,
А. А. Чертков,
С. В. Сабуров**

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ И СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

*Современные средства математического программирования и исследования операций являются мощным механизмом совершенствования систем управления судовыми динамическими объектами и системами, определения способов их алгоритмизации и синтеза на качественно новом уровне. Оптимальные системы могут приниматься в качестве эталона, к которому следует стремиться при создании реальных систем. Вместе с тем, несмотря на широкий круг научных публикаций в данной предметной области, по-прежнему остаются не в полной мере решенными вопросы создания алгоритмов и программных средств эффективного применения численных методов оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта с должным научным обоснованием. Важный класс систем управления составляют судовые системы, обеспечивающие максимальное быстродействие, что позволяет сократить время переходных процессов и, следовательно, повысить производительность работы судовых динамических объектов и систем различного назначения. В работе приводятся алгоритмы синтеза оптимальных по быстродействию систем управления с использованием функций линейного программирования и нелинейных функций — решателей *fmincon*, что позволяет, в отличие от существующих методов синтеза быстродействующих систем, получить численный алгоритм оптимизации с использованием ленточной структуры дискретных динамических ограничений. Корректность предлагаемых технических решений демонстрируется на примерах расчета оптимальных траекторий динамических объектов.*

Ключевые слова: алгоритмы, синтез, судовые динамические объекты, дискретные системы, управление по быстродействию, математическое программирование, функции-решатели, ленточные структуры матриц, ограничения-неравенства, критерии качества.

Вводная часть. Методы математического программирования, созданные для решения вариационных задач по численным алгоритмам, можно отнести к основному механизму получения научно обоснованных решений для управления технологическими процессами и производствами на объектах водного транспорта. Согласно исследованиям авторов работ [1] – [6], все большее применение методы математического программирования находят на судах, где требуется получать в оперативной обстановке эффективные решения по вопросам бизнеса, оптимизации маршрутов движения, безопасности плавания при изменении погодных условий, выбирать экономичные режимы движения судов в рейсе с учетом ситуации на линии и в портах назначения. Методы исследования операций используются для принятия обоснованных решений в судоремонте, для диагностики технического состояния судовых энергетических комплексов, текущего контроля (в режиме *on line*) корпуса судна и его элементов в рейсе в условиях движения на волнении, а также для решения комплекса задач по выполнению грузовых операций и составлению карго-планов [7].

Численные методы и алгоритмы оптимизации, базирующиеся на фундаментальных положениях математического программирования, являются эффективным механизмом поиска оптимальных решений, поскольку позволяют использовать вычислительные средства для исследования динамических моделей с расщепленными граничными условиями. В работах [8] – [10] отмечается, что способы численной оптимизации могут успешно применяться для управления нелинейными системами, относящимися к классу плохо формализуемых технологических задач, как правило,

не поддающихся аналитическому решению. Особый класс составляют хаотические системы управления с аттракторами сложной формы, для синхронизации которых, наряду с принципами декомпозиции и градиентными процедурами анализа, требуются новые, научно обоснованные методы решения. Использование методов геометрического программирования для решения задач с полиномиальными функциями требует проведения структурного анализа и выполнения условий ортогональности с обеспечением устойчивости и требуемой скорости сходимости итерационных процессов вычислений.

Важным механизмом повышения эксплуатационных показателей с позиций системности является комплекс эффективных научно обоснованных решений в данной предметной области, получаемых методами моделирования и алгоритмизации с применением инструментария вычислительных сред и компьютерных технологий.

Из накопленного опыта решения задач оптимизации известно, что нелинейные системы позволяют существенно расширить арсенал методов и средств принятия решений, синтеза, можно добиться существенного повышения эффективности и качества функционирования сложных технологических процессов и производств. Исследования в перечисленных направлениях позволяют решать задачи синтеза законов оптимального управления с помощью нелинейных регуляторов, применять модели и алгоритмы для реализации энергоэффективных технологий, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к замкнутым системам.

Создание моделей и алгоритмов автоматизации судовых динамических объектов требует разработки компьютерных моделей на базе обобщенных уравнений динамики объектов. Алгоритмизация и программная поддержка моделирования технологических режимов производится с использованием численных методов [11] решения дифференциальных уравнений, объектов LTI в среде MATLAB [12]. Среда содержит систему функций для преобразования моделей в форме передаточных функций к виду пространства состояний и наоборот, перехода от непрерывных систем к дискретным системам, получения решения в частотной области, исследования траекторий корней характеристических уравнений и др. В результате с помощью встроенных функций созданы алгоритмы и произведен синтез систем управления судовыми динамическими объектами с использованием средств математического программирования и параметрической оценки моделей систем по эксперименту. Внимание уделено алгоритмам оценки параметров модели судна по измерениям, произведенным на эволюционном периоде траектории.

Таким образом, актуальным направлением совершенствования систем управления судовыми динамическими объектами и системами является определение способов их алгоритмизации и синтеза на качественно новом уровне с применением арсенала математического инструментария мощных вычислительных сред, позволяющих без существенных материальных затрат повышать эксплуатационные показатели и качество судовых систем и объектов. Поскольку задачи оптимизации судовых систем, в общем случае, являются многомерными, то по этой причине усложняется поиск оптимальных решений, основанных, как правило, на принятии некоторых компромиссных оценок, которые, вообще говоря, могут не отвечать оптимуму ни по одному из критериев. Актуальность решения задач данной проблематики подтверждается усилением требований к эффективности применения алгоритмов и моделей оптимизации таких эксплуатационных показателей как быстродействие судовых систем.

Преодоление сложностей в решении комплекса задач синтеза оптимальной по быстродействию системы управления судовым объектом, по мнению авторов, возможно на основе эффективного применения численных методов оптимизации с использованием линейного и нелинейного программирования, а также методов дискретной комбинаторной оптимизации, адекватных реальным процессам.

Основная часть. Для удобства структурного анализа судовой динамической системы ее модель представим уравнениями в конечных разностях. С этой целью выберем интервал дискретности, отражающий специфику поведения объекта по завершении каждого шага:

$$x(k+1) = A_d \cdot x(k) + B_d \cdot u(k), k = 0, 1, \dots, N-1; \quad (1)$$

$$y(k) = C_d \cdot x(k) + D_d \cdot u(k), \quad (2)$$

где A_d — матрица состояния размерности $[n \times n]$; B_d — матрица управления размерности $[n \times m]$; C_d — матрица измерений вектора переменных состояния размерности $[p \times n]$; D_d — матрица «управление-выход» размерности $[p \times m]$; $x(k) = [x_1(k) \ x_2(k) \ \dots \ x_n(k)]^T$ — вектор переменных состояния; $u = [u_1(k) \ u_2(k) \ \dots \ u_m(k)]$ — вектор управления; $y(t) = [y_1(k) \ \dots \ y_p(k)]^T$ — вектор выхода. Граничные условия: $y(0)$ и $y(N)$.

На управление $u(k)$ наложено ограничение следующего вида:

$$|u(k)| \in U_m.$$

Необходимо получить такие $u(k)$, чтобы в конечную точку траектории система была переведена за минимальное время $T_{\min}$.

Алгоритм и процедуру синтеза дискретной системы (1) – (2) можно реализовать путем выполнения следующих операций.

1. *Определение параметров модели непрерывной динамической системы, формулировка критерия качества* Динамическая система представляется в среде MATLAB в LTI-формате. Формулируется критерий оптимальности — функция цели (максимальное быстродействие).

2. *Преобразование непрерывной модели с матрицами A, B, C и D в объект пространства состояний (ss-форму) с помощью оператора ss:*

$$V = ss(A, B, C, D).$$

3. *Переход от непрерывной модели к дискретной.* Операция выполняется с помощью функции *c2d*, что позволяет использовать LTI-модель V .

4. *Задание граничных условий и назначение максимального числа шагов N.*

5. *Процедура формирования ленточных матриц.*

6. *Переход к разреженным матрицам.* Осуществляется с помощью оператора *sparse*.

7. *Решение задачи оптимизации методом нелинейного программирования и графические построения.*

Функционирование алгоритма рассмотрим на конкретном примере. С этой целью выберем непрерывную во времени систему со следующими численными значениями элементов матриц (п. 1 алгоритма):

$$A = [0 \ 1; \ 0 \ -1]; \ B = [0 \ 1]'; \ C = [1 \ 0; \ 0 \ 1]; \ D = [0 \ 0]'$$

В соответствии с п. 2 вычислительного алгоритма, динамическую систему представим в LTI-формате, т. е.

$$V = ss(A, B, C, D).$$

Полученные численные значения блока LTI имеют вид:

$$V.a = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}; \ V.b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \ V.c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \ V.d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Для перехода от непрерывной модели к дискретной (п. 3 алгоритма) с шагом τ воспользуемся матричным экспоненциалом:

$$\exp m(A) = \begin{bmatrix} 1 & 1 - \exp(-\tau) \\ 0 & \exp(-\tau) \end{bmatrix}.$$

Применение матричного экспоненциала позволяет получить уравнения динамики в общем виде. При шаге $\tau = 0.1$ с уравнения (1) и (2) для рассматриваемой модели в дискретной форме принимают вид:

$$y_1(k+1) = y_1(k) + (1 - \exp(-\tau)) \cdot y_2(k) + (\exp(-\tau) + \tau - 1) \cdot u(k); \quad (3)$$

$$y_2(k+1) = \exp(-\tau) \cdot y_2(k) + (1 - \exp(-\tau)) \cdot u(k); \quad (4)$$

$$|u(k)| \leq 1, k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (5)$$

Используя в уравнениях (3) – (5) численные значения элементов матриц $V.a$, $V.b$, $V.c$ и $V.d$, получим модель дискретной системы для LTI-объекта V :

$$Vd = c2d(V, 0.1, 'zoh').$$

В результате будем иметь следующие матрицы, входящие в объект Vd :

$$Vd.a = \begin{bmatrix} 1 & 0,095163 \\ 0 & 0,90484 \end{bmatrix}; Vd.b = \begin{bmatrix} 0,0048374 \\ 0,095163 \end{bmatrix}; Vd.c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; Vd.d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Видно, что согласно синтаксису функции, кроме введения в структуру $c2d$ объекта V при шаге дискретности $\tau = 0.1$, требуется также указать способ дискретизации (восстановления) сигнала управления посредством оператора $'zoh'$ (ZOH — Zero Order Hold — восстановление сигнала полиномом нулевого порядка). Матрицы объекта Vd по сути представляют собой составляющие уравнений динамики (1) – (2) для конкретного объекта, поскольку

$$Ad = Vd.a, Bd = Vd.b, Cd = Vd.c \text{ и } Dd = Vd.d.$$

Зададим $N = 104$ и введем ограничения на максимально допустимый (по модулю) сигнал управления $U_m = 1.0$. Тогда на всех режимах (п. 4 алгоритма) должно соблюдаться условие

$$|u(k)| \in U_m.$$

В ряде случаев оценку элементов матриц уравнений динамики системы (1) можно выполнить по эксперименту на судне: измерениям векторов $x(k)$ и $u(k)$ в дискретные моменты времени на основе рекурсивных методов. Оценка производится на базе квадратичных критериев оптимизации, что гарантирует минимизацию погрешности вычислений.

Формирование ленточных матриц, предусмотренных п. 5 вычислительного алгоритма, составляет наиболее емкую часть синтеза оптимальной по быстродействию системы управления судовым объектом. Для выполнения этой операции в программе, составленной в кодах MATLAB, предусмотрен цикл, в котором рассчитываются составляющие ленточной матрицы SA . Далее приводится фрагмент ленточной матрицы SA размерности (68×104) . Матрица составлена из блоков S по правилу, определенному структурой SA .

$$SA = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \\ -1 & -0.0952 & -0.0048 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & -0.9048 & -0.0952 & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -0.0952 & -0.0048 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.9048 & -0.0952 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}.$$

Блок S состоит из следующих элементов:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & -0.0952 & -0.0048 \\ 0 & -0.9048 & -0.0952 \end{bmatrix}.$$

Поскольку SA является разреженной матрицей, для повышения эффективности вычислений в алгоритме (п. 6) применен оператор *sparse*, позволяющий сохранять SA в компактной форме путем выделения только ненулевых элементов с установлением индексации их строк и столбцов по определенному в среде MATLAB правилу. Приведенный фрагмент разреженной матрицы SA позволяет получить представление о правиле сохранения данных.

$SA =$

(1,1) 1.0000
(3,1) -1.0000
*** ***
(49,33) 1.0000

с установлением

(47,34) -0.9048
*** ***

(69,103) 1.0000
(70,104) 1.0000.

Применение оператора *sparse* позволило уменьшить сохраняемый массив до 240 чисел за счет исключения нулевых элементов из структуры SA размерности (70×104) , т. е. при наличии 7280 чисел.

Для выполнения вычислений (п. 7 алгоритма) применен оператор нелинейного программирования *fmincon*. Этот оператор выполняет поиск минимального значения скалярной функции нескольких переменных в условиях ограничений. Ограничения могут быть в виде линейных равенств и неравенств, заданных в матричной форме. В случае необходимости предусматривается введение нелинейных ограничений в виде отдельных файлов. Критерий качества выбран в виде функции

$$J=0.0001 \cdot \exp(0.2 \cdot k) \cdot \text{abs}(x),$$

содержащей экспоненциальную составляющую. Функция, как следует из равенства, на всех шагах является положительной. Минимум времени переходного процесса обеспечивается путем увеличения «веса» с возрастанием k .

Расчет завершается с получением последовательности векторов $y_1(k)$, $y_2(k)$, $u(k)$. Для их выбора из N значений с помощью алгоритма формируются массивы t_1 , t_2 и t_3 , а затем определяют порядковые номера переменных состояния и управления. В результате находятся $y_1 = x(t_1)$, $y_2 = x(t_2)$ и $u = [x(t_3); 0]$.

На рис. 1 изображены текущие значения переменных состояния и вектора управления, соответствующие минимальному времени переходного процесса.

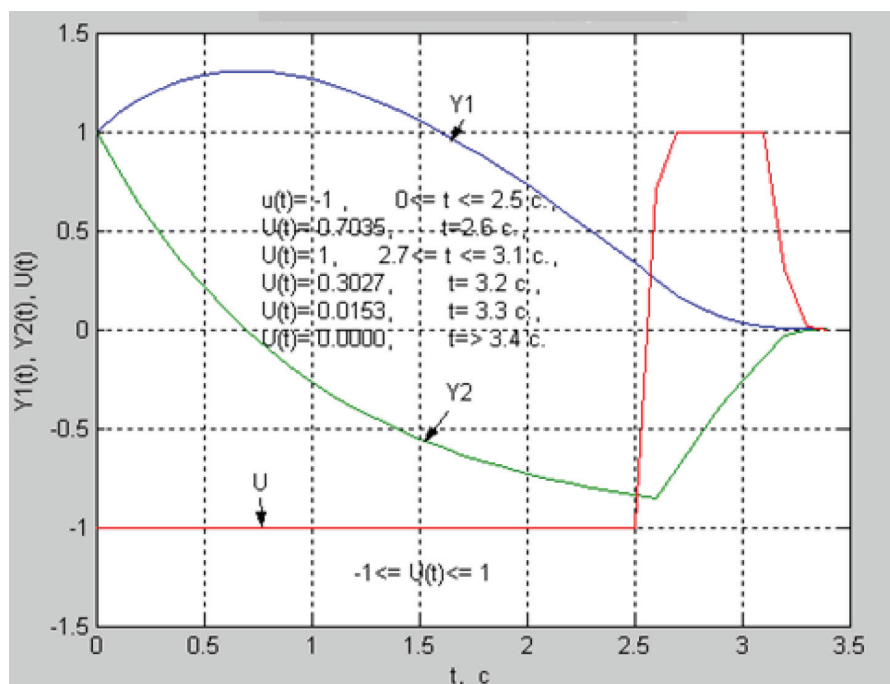


Рис. 1. Расчет методом нелинейного программирования быстродействующей динамической системы управления

Из рис. 1 следует, что максимальное быстродействие системы управления обеспечивается при следующих значениях $u(t)$:

$$\begin{cases} -1, & \text{если } 0 \leq t \leq 2,5 \text{ с;} \\ 0,7035, & \text{если } t = 2,6 \text{ с;} \\ 1, & \text{если } 2,7 \leq t \leq 3,1 \text{ с;} \\ 0,3027, & \text{если } t = 3,2 \text{ с;} \\ 0,0153, & \text{если } t = 3,3 \text{ с;} \\ 0, & \text{если } t \geq 3,4 \text{ с.} \end{cases}$$

Таким образом, если реализовать $u(t)$ по приведенной программе, то переходный процесс в системе, находящейся в начальном состоянии $y_1(0) = 1, y_2(0) = 1$, завершится за минимальное время, равное $t = 3,4$ с. Система будет переведена из заданного начального состояния в конечное с координатами «рабочей» точки $y_1(3,4) = 0, y_2(3,4) = 0$.

Применение линейного программирования (ЛП) для оптимального управления судовыми динамическими объектами позволяет значительно расширить класс решаемых вариационных задач численными методами, обладающими свойствами сходимости итерационных процессов. Однако при этом требуется учитывать специфику управляемого объекта и возможность приведения конкретной задачи к виду, допускающему применение «линейных» критериев качества в рекуррентных оценках. Преимущество линейного программирования состоит в том, что симплекс-метод, являющийся основой направленного поиска оптимальных решений в условиях линейных ограничений, обладает сходимостью и реализуется с помощью программ высокого качества, содержащихся практически во всех вычислительных средах, применяемых для выполнения инженерных и научных расчетов. Для выполнения расчетов пользователь должен лишь сформулировать задачу с учетом требований синтаксиса функции и правильно распорядиться исходными данными. К преимуществам вычислительных сред линейного программирования следует отнести возможность их применения для решения задач высокой размерности вектора переменных состояния и записи данных в виде разреженных матриц, что обеспечивает «сжатие» информации в процессе вычислений.

Эффективность применения линейного программирования в известной мере зависит от навыков оператора и корректности формулировки задачи автоматизации технологических процессов в терминах моделей ЛП. В отдельных случаях эффективность может быть повышена путем линеаризации уравнений, корректного использования линейных полиномов, выбора «нулевого» приближения при решении задач высокой и средней размерности, применения опций для улучшения процесса вычислений, выбора решателей, выполнения параллельных вычислительных схем, графической интерпретации результатов поиска экстремумов. Следует также иметь в виду, что задачи ЛП в обычной «стандартной» формулировке обеспечивают процесс планирования, т. е. коррекция решений при изменении коэффициентов уравнений производится без обратных связей. Однако программный инструментарий ЛП может быть приспособлен к построению механизма рекуррентных вычислений с реализацией управления с обратной связью дискретными моделями технологических процессов на судах.

Большие перспективы практического применения ЛП на водном транспорте открываются в связи с развитием пост-оптимального анализа в теории ЛП, поскольку последний ориентирован на оптимизацию технологических процессов, характеризуемых изменениями коэффициентов уравнений и критериев качества в зависимости от условий функционирования объектов автоматизации. Приспособленность данного класса задач к учету структурных изменений моделей систем позволяет выбирать альтернативные решения, близкие по конечному результату, но обладающие рядом преимуществ в сравнении с исходными задачами. Адаптация обеспечивается на основе использования градиентных методов, определения предиктивно-коррективных направлений, критериев остановки вычислительных процессов и др.

Для демонстрации применения моделей ЛП к решению задач оптимизации по быстродействию рассмотрим следующую систему, представленную в дискретной форме:

$$x(0) = b(0);$$

$$x(k) = A \cdot x(k-1) + B \cdot u(k-1) + b(k-1), \quad k = 1, 2, \dots, T, \quad (6)$$

где $x(k)$ — n -мерный вектор состояния; $u(k-1)$ — m -мерный вектор управления; $b(k)$ — n -мерный вектор помехи; A и B — известные матрицы размерности $(n \times n)$ и $(m \times n)$ соответственно система ограничений может быть записана в виде лестничной структуры

$$\begin{array}{rcl} x(0) & & = b(0) \\ -A \cdot x(0) - B \cdot u(0) + x(1) & & = b(1) \\ -A \cdot x(1) - B \cdot u(1) + x(2) & & = b(2) \\ \vdots & & \vdots \\ -A \cdot x(T-1) - B \cdot u(T-1) + x(T) & = & b(T) \end{array}$$

Запишем ограничения в блочной форме:

$x(0)$	$u(0)$	$x(1)$	$u(1)$	$x(2)$	...	$x(T-1)$	$u(T-1)$	$x(T)$	1
I									$b(0)$
$-A$	$-B$	I							$b(1)$
		$-A$	$-B$	I					$b(2)$
					$\ddots$				$\vdots$
						$-A$	$-B$	I	$b(T-1)$

Ленточная структура для задач большой размерности обычно представляется многомерным массивом, формирование которого легко программируется в среде MATLAB.

Работу алгоритма ЛП в виде ленточной структуры рассмотрим на примере управления по быстродействию судовым динамическим объектом, представленным уравнениями (1) – (2):

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u; \quad y = C \cdot x + D \cdot u; \quad x(0) = 0,$$

где $A = -10$; $B = 10$; $C = 1$; $D = 0$. Такую структуру имеют модели судовых объектов и систем класса аperiodических звеньев, а именно: судовые объекты подогрева топлива на танкерах, системы и устройства утилизации тепловой энергии судовых энергетических установок; динамические звенья силовых электронных схем судовой автоматики и др.

Необходимо рассчитать вектор управления $u(t)$, обеспечивающий переход из состояния $x(0)$ в заданное конечное состояние $x(T)$ за минимальное время $t = T$. Управление $u(t)$ ограничено. Диапазон изменений: $0 \leq u(t) \leq U_k$.

Решение этой задачи хорошо известно. Мы же получим решение с помощью линейного программирования. Ленточный алгоритм реализован в файле, составленном в кодах MATLAB:

```
% Линейное программирование.
% Исходные данные:
delt=0.0001; k=3000;
A=-10;B=10;
a=exp(A*delt); b=-(1-exp(A*delt))*inv(A)*B;
lvb=zeros(k+1,0); uvb=[];
% Определение оптимальных управлений для пяти режимов:
for i=1:5;
Uk=[50 75 150 200 250]';
Uk=Uk(i);
k1=0:k;
Хуцт=[25 65 120 170 220];
```

```

Xyct=Xyct(i);
lvb=zeros(k+1,1); uvb=[0;ones(k,1)]*Xyct;
flp=-ones(1,k+1);
m1=ones(1,k);
Ac=diag(m1,1);
Bc=diag([0 ones(1,k-1)*(-a) 0]);
ABc=Ac+Bc;
% Ограничения — неравенства:
Alp=ABc(1:k,:);
Blp=ones(k,1)*b*Uk;
% Применение функцииlinprog:
[x,J]=linprog(flp,Alp,Blp,[],[],lvb,uvb);
Ulp=Alp*x./b;
% Графические построения:
t=0:k;
plot(t*delt,x',t(1:k)*delt,Ulp),grid
axis([0 3000*delt 0 280])
hold on
end
hold off

```

В разделе файла «Линейное программирование» вычисляются a и b для перехода от непрерывной модели к дискретной с шагом $delt$. Затем в цикле производятся вычисления пяти режимов, оптимальных по быстродействию, с различными максимальными величинами сигналов управления и установившимися значениями переменной состояния. Эти величины представлены соответственно векторами

$$U_k=[50 \ 75 \ 150 \ 200 \ 250]' \quad \text{и} \quad X_{yct}=[25 \ 65 \ 120 \ 170 \ 220].$$

Устанавливаются верхняя и нижняя границы в виде векторов lvb и uvb . Согласно ленточной схеме, определяются матрицы ограничений-неравенств, после чего используется функция *linprog* для поиска оптимальных решений. Основной частью файла является процесс формирования блочной матрицы в виде структуры Alp и Blp высокой размерности. Для выполнения графических построений пяти режимов на одной плоскости вводится оператор *hold on* с последующей его отменой с помощью оператора *hold off* по завершении цикла.

На рис. 2 представлены оптимальные (по быстродействию) переходные процессы в рассматриваемой модели с различными U_k и X_{yct} .

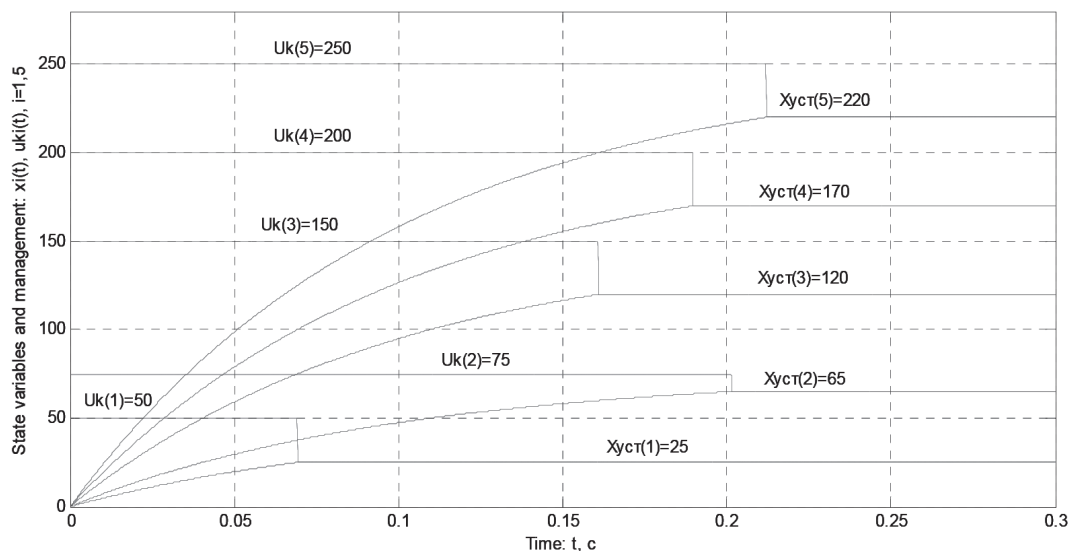


Рис. 2. Оптимальные по быстродействию переходные процессы в судовой динамической системе

Обсуждение основных результатов. В работе приводятся результаты исследований авторов, связанные с построением алгоритмов синтеза оптимальных по быстродействию систем управления с использованием функций линейного и нелинейного программирования, что позволяет, в отличие от существующих методов синтеза быстродействующих систем, получить численный алгоритм оптимизации с использованием ленточной структуры дискретных динамических ограничений. Корректность предлагаемых технических решений демонстрируется на примерах расчета оптимальных траекторий динамических объектов.

Результаты расчета переменных состояния и управления, полученные методами линейного и нелинейного программирования, соответствуют оптимальным (по быстродействию) переходным процессам в рассматриваемых моделях судового объекта при переводе его из начального состояния в установившееся состояние за минимальное время. На графиках (рис. 1 и рис. 2) показаны моменты переключения, отражающие специфику объекта, из которых следует, что время переходного процесса зависит от численных значений параметров модели, а также от максимальных величин сигнала управления и установившихся значений переменных состояния.

Заключительная часть. Предложенные алгоритмы численной оптимизации могут эффективно применяться на судах для управления технологическими процессами, плохо формализуемыми в математической форме, где необходимо для получения решения использовать численные методы практической оптимизации. Алгоритмы оптимизации судовых объектов и систем средствами математического программирования содержат модели динамических объектов в форме уравнений в пространстве состояний, которые образуют систему ограничений на каждом шаге итерационного процесса, представленных ленточными матрицами в терминах математического программирования. Применение методов нелинейного программирования для решения задач оптимизации технологических процессов на судах образует широкий спектр алгоритмов и программ, пригодных для реализации технологий энергосбережения средствами автоматизации. Средства ЛП эффективно использовать в тех случаях, когда переменные состояния и управления в условиях ограничений не принимают отрицательных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сахаров В. В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта в среде MATLAB: монография / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин, А. А. Чертков. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 436 с.
2. Сахаров В. В. Алгоритм энергоэффективного управления курсом судна / В. В. Сахаров, А. Г. Таранин, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 38–46.
3. Андрианов Е. Н. Диагностирование рабочего процесса судового дизеля по эталонным моделям с применением вейвлетов / Е. Н. Андрианов, В. В. Сахаров, А. Г. Таранин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 46–54.
4. Андрианов Е. Н. Модальный метод параметрического демпфирования динамической системы / Е. Н. Андрианов, В. В. Сахаров, А. Г. Таранин // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 4. — С. 56а–66.
5. Голубев П. В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на судах и управления судовыми техническими средствами: дис... канд. техн. наук / П. В. Голубев. — СПб.: СПбГУВК, 2010. — 213 с.
6. Голубев П. В. Информационное обеспечение, моделирование и оптимизация корпоративной структуры специализированного порта / П. В. Голубев, В. И. Королев, В. В. Сахаров // Труды института системного анализа Российской академии наук. — 2005. — Т. 17. — С. 222–235.
7. Чертков А. А. Оптимизация разовых выплат по кредитам при обновлении флота / А. А. Чертков, Д. А. Загребин, Ю. Б. Михайлов // Морской вестник. — 2014. — № 2 (50). — С. 109–111.
8. Мирошник И. В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 2000. — 550 с.

9. Севрюков А. С. Информационная поддержка и алгоритм синтеза динамической системы управления методом нелинейного программирования / А. С. Севрюков, П. В. Голубев, С. А. Лутков // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2005. — № 1. — С. 134–139.
10. Cannon M. Efficient nonlinear model predictive control algorithms / M. Cannon // Annual Reviews in Control. — 2004. — Vol. 28. — Is. 2. — Pp. 229–237. DOI:10.1016/j.arcontrol.2004.05.001
11. Дивеев А. И. Численный метод сетевого оператора для синтеза системы управления с неопределенными начальными значениями / А. И. Дивеев // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2012. — № 2. — С. 63.
12. Дьяконов В. П. Математические пакеты расширения MATLAB: специальный справочник / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. — СПб.: Питер, 2001. — 480 с.

ALGORITHMIC AND SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEMS OF SHIP DYNAMIC OBJECTS BY MEANS OF MATHEMATICAL PROGRAMMING

Modern means of mathematical programming and operations research are a powerful mechanism for improving ship control systems of dynamic objects and systems, ways of algorithmization and their synthesis on a new level. An optimal system can be taken as a benchmark to strive for when creating real systems. However, despite a wide range of scientific publications in the subject area, are still not fully resolved the issues of creating algorithms and software tools for effective application of numerical methods of optimization of technological processes on objects of water transport with due scientific justification. An important class of control systems is systems that provide maximum performance, allowing you to reduce the time of transient processes and, consequently, improve the performance of ship dynamic objects and systems of different purposes. The paper presents algorithms of synthesis of optimal control systems by using linear programming and nonlinear functions — solvers fmincon, which allows, in contrast to existing methods for the synthesis of high-speed systems, to obtain a numerical optimization algorithm using band structure discrete dynamic constraints. The correctness of the proposed technical solutions is demonstrated on examples of calculation of optimal trajectories of dynamic objects.

Keywords: algorithms, synthesis, ship dynamic objects, discrete systems, control performance, mathematical programming, functions, solvers, band structure of matrices of constraint inequalities, quality criteria.

REFERENCES

1. Saharov, V. V., A. A. Kuzmin, and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy optimizacii tehnologicheskikh processov na obektah vodnogo transporta v srede MATLAB: monografija*. SPb.: FGBOU VO «Gosudarstvennyj universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova», 2015.
2. Saharov, V. V., A. G. Taranin, and A. A. Chertkov. “Energoefficient ship steering control algorithm.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 38–46.
3. Andrianov, E. N., V. V. Saharov, and A. G. Taranin. “Ship diesel working process diagnosing with standard models and wavelet techniques applications.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 46–54.
4. Andrianov, E. N., V. V. Saharov, and A. G. Taranin. “Modally damped parametric method for ship constructions.” *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 4 (2012): 56a–66.
5. Golubev, P. V. *Modeli i algoritmy optimizacii tehnologicheskikh processov na sudah i upravleniya sudovymi tehničeskimi sredstvami*. Diss. SPb.: SPGUWC, 2010.
6. Golubev, P. V., V. I. Korolev, and V. V. Saharov. “Informacionnoe obespechenie, modelirovanie i optimizacija korporativnoj struktury specializirovannogo porta.” *Trudy instituta sistemnogo analiza Rossijskoj akademii nauk (ISA RAN)* 17 (2005): 222–235.
7. Chertkov, A. A., D. A. Zagredinov, and Ju. B. Mihajlov. “Optimization of single payments on loans when upgrading fleet.” *Morskoy Vestnik* 2(50) (2014): 109–111.
8. Miroshnik, I. V., V. O. Nikiforov, and A. L. Fradkov. *Nelineynoe i adaptivnoe upravlenie slojnymi dinamicheskimi sistemami*. SPb.: Nauka, 2000.

9. Sevrjukov A. S., P. V. Golubey, and S. A. Lutkov. "Informacionnaja podderzhka i algoritm sinteza dinamicheskoy sistemy upravleniya metodom nelinejnogo programmirovaniya." *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. Informacionnye tehnologii i sistemy (Upravlenie, jekonomika, transport)*. SPb.: ООО «Andreevskij izdatelskij dom», 2005: 134–139.

10. Cannon, M. "Efficient nonlinear model predictive control algorithms." *Annual Reviews in Control* 28.2 (2004): 229–237. DOI:10.1016/j.arcontrol.2004.05.001.

11. Diveev, A. I. "A numerical method for network operator for synthesis of a control system with uncertain initial values." *Journal of Computer and Systems Sciences International* 51.2 (2012): 228–243.

12. Djakonov, V. P., and V. V. Kruglov. *Matematicheskie pakety rasshirenija MATLAB: Specialny spravochnik*. SPb.: Piter, 2001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сахаров Владимир Васильевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
saharov@rambler.ru

Чертков Александр Александрович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
chertkov51@mail.ru

Сабуров Сергей Валерьевич — аспирант.
Научный руководитель:
Сахаров Владимир Васильевич.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_osnpr@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saharov Vladimir Vasilevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
saharov@rambler.ru

Chertkov Alexandr Alexandrovich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
chertkov51@mail.ru

Saburov Sergey Valerevich — Postgraduate.
Supervisor:
Saharov Vladimir Vasilevich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kfspguyk@mail.ru

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2016 г.

УДК 681.51

А. А. Дыда,
Е. Б. Осокина,
П. А. Дыда

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА

В настоящей работе представлен подход к построению и оптимизации линейных регуляторов системы управления курсом судна, гарантирующих её робастные свойства с заданным качеством переходных процессов. Для оценки переходных процессов в системе управления используется показатель степени устойчивости. Особенностью математической модели судна является интервальная неопределённость её параметров, связанная с режимом его движения. Теоретической основой для построения системы управления, малочувствительной к вариациям параметров судна, является теорема В. Л. Харитонова. Показано, что оптимизация робастных регуляторов по критерию степени устойчивости сводится к стандартной задаче нелинейного программирования. Предложена методика параметрической оптимизации робастных регуляторов в системе управления линейным динамическим объектом. Приводятся результаты математического моделирования синтезированной робастной системы управления курсом судна.

Ключевые слова: управление судном, модель Номото 1-го порядка, робастность, степень устойчивости, интервальные параметры.