

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-211-223

УДК. 621.398.04

**А. Е. Сазонов,
В. В. Сахаров,
А. А. Чертков**

МОДАЛЬНЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА НАБЛЮДАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА

Рассматривается метод синтеза наблюдателя для системы управления курсом судна на основе теории модальных регуляторов. Современные системы судовождения, их технические средства характеризуются высокой размерностью и сложностью. Их компонентами являются: авторулевые, системы управления движительным комплексом, динамические системы позиционирования, регуляторы, фильтры, средства мониторинга, оценки переменных состояния, динамические наблюдатели, идентификаторы и др. Модели оценки количественных и качественных показателей систем управления судном основаны на применении обобщенной математической модели, которая может принимать различные формы в зависимости от влияния многочисленных факторов на ее структуру и параметры. Применение класса простых моделей динамики управления танкерами, предложенных Номото, для синтеза оптимальных регуляторов и параметрической настройки авторулевых связано с необходимостью учета изменений их параметров, восстановлением вектора состояния по неполным измерениям. Адекватность динамики простых моделей и объекта, функционирующего в условиях изменяющейся внешней среды, можно повысить на основе применения современных алгоритмов анализа, синтеза и оптимизации автоматических систем, инструментария вычислительных сред и компьютерных технологий с применением основных положений модального управления.

Цель работы состоит в улучшении качественных показателей удержания судна на курсе с авторулевым комплексом — замкнутой системы управления — путем выбора требуемого спектра матрицы состояния, модального метода параметрической оценки коэффициентов регулятора и синтеза динамических наблюдателей по вектору выхода, содержащего одну из переменных состояния системы. Рассматривается метод синтеза динамического наблюдателя Луенбергера полной размерности, отличающийся тем, что в нем учтена структура матрицы состояния модели судна с регулятором Аккермана, допускающая при соблюдении условий управляемости и наблюдаемости выбор структуры стабилизирующей части матрицы наблюдателя в форме векторов — столбцов с ненулевыми элементами, что позволяет существенно упростить процедуру синтеза. Выполнен расчет наблюдателя для оценки вектора переменных состояния супертанкера дедвейтом 150 тыс. т.

Ключевые слова: судно, модель, управление, наблюдатель, матрица, векторы выхода и состояния, модальный метод, алгоритм, синтез.

Современные системы управления судном и судовыми энергетическими установками представляют собой автоматизированные технические комплексы высокой сложности, предназначенные для эффективного выполнения операций, определяемых назначением и спецификой работы судна в конкретных условиях. Обеспечение высокой производительности автоматизируемых объектов при выполнении грузоперевозок, пассажирских перевозок, паромных операций, перевозок нефти, нефтепродуктов и сжиженного газа, а также комплекса операций по бурению скважин при освоении прибрежного шельфа, прокладки труб и кабелей различного назначения, выполнении дноуглубительных работ и т. п. потребовали качественных изменений в составе систем и средств автоматического и автоматизированного управления, построенных на базе последних научных и технических достижений в данной предметной области [1].

Высокоточные системы позиционирования, созданные на основе технологий спутниковой навигации, системы контроля и управления, базирующиеся на современных вычислительных сре-

дах и методах оптимизации, позволяют на качественно новом уровне решать задачи совершенствования управления судном с использованием компьютерных моделей динамики управляемых морских объектов различного назначения. Повышение точности и надежности управления судном на курсе с обеспечением устойчивости движения по отношению к возмущениям угла курса, угла дрейфа и угловой скорости вращения связано с совершенствованием динамической модели, выбором параметров авторулевых и измерениями переменных состояния [2].

Получение достоверной информации о векторе переменных состояния судна играет решающую роль при изучении эволюционных процессов и синтезе управляющих функций, обеспечивающих целенаправленное поведение динамического объекта во времени и пространстве. Однако вектор фазовых координат зачастую недоступен для измерения по различным причинам. В этом случае вектор фазовых координат можно оценить по вектору выхода. Вследствие того, что измерения выполняются с погрешностью, а также ввиду наличия шумов на входе системы, требуется получать оценки, базирующиеся на процедурах стохастической фильтрации [3].

Для измерений переменных состояния, наряду с существующими, могут быть предложены математические датчики информации, построенные на динамических наблюдателях и оценщиках. Их практическое применение на судах должно способствовать повышению энергетической эффективности и качества работы судовых систем и средств автоматики, а также обеспечению надежности и безопасности в случаях возникновения неисправностей датчиков информации [4].

Проблеме конструирования динамических наблюдателей состояния как линейных, так и нелинейных систем в отечественной и зарубежной литературе уделяется большое внимание [5], [6]. В современной теории управления существует ряд эффективных методов ее решения [7]. Вместе с тем практическое использование наблюдателей для восстановления переменных состояния по ограниченному числу измеряемых координат на конкретном объекте имеет свою специфику, которая должна учитываться в процессе их синтеза [8].

Наблюдатель представляет собой динамическую систему с двумя входами, которыми являются вектор управления наблюдаемой системы и вектор выхода. Эти векторы должны быть измеряемыми. Процедура синтеза наблюдателя состоит в получении структуры и параметров динамической системы, отвечающей определенным условиям, например, условиям Луенбергера, которые придают этой динамической системе требуемые свойства по восстановлению недостающих координат вектора состояния по вектору выхода. Модель наблюдателя представляется в форме пространства состояний. Условия Луенбергера обеспечивают процесс наблюдения на всем временном интервале, если начальные условия наблюдателя и наблюдаемой системы совпадают. Если же такое совпадение не обеспечено, то восстановление недостающих переменных состояния гарантируется по окончании переходного процесса в наблюдателе. Собственные значения матрицы состояния наблюдателя выбираются, как правило, на порядок меньше собственных значений матрицы состояния наблюдаемой системы, что обеспечивает быстрое завершение переходного процесса в наблюдателе. При нормальном функционировании наблюдателя величина погрешности — разность вектора выхода системы и вектора выхода наблюдателя — также должна уменьшаться с течением времени, что определяется свойствами асимптотической устойчивости наблюдателя как динамической системы. Наиболее простым по структуре и процедуре синтеза следует считать наблюдатель для инвариантной во времени системы. Применение наблюдателей в оптимальных системах значительно улучшает режимы функционирования последних.

Модальный метод синтеза наблюдателей рассмотрим применительно к математической модели в пространстве состояний для инвариантной во времени системы:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t); \quad (1)$$

$$y(t) = D \cdot x(t), \quad (2)$$

где A — $(n \times n)$ -матрица; B — $(n \times k)$ -матрица; D — $(r \times n)$ -матрица постоянных коэффициентов; $x(t)$ — $(n \times 1)$ -мерный вектор состояния; $u(t)$ и $y(t)$ — векторы управления и выхода соответствен-

ющей размерности. Если $r < n$, то измерения выполняются лишь части переменных состояния. Для системы управления с одним входом $k = 1$.

Для восстановления всех переменных состояния по вектору выхода $y(t)$ используем динамический наблюдатель, построенный на базе матричного уравнения Луенбергера, что позволяет существенно упростить процедуру синтеза с одновременной оценкой параметров регулятора Аккермана в цепи обратной связи управляемого объекта по заданному спектру матрицы замкнутой системы. Матричное уравнение Луенберга имеет следующий вид [9]:

$$T \cdot A - F \cdot T = H. \quad (3)$$

Здесь предполагается, что существует матрица преобразования T , удовлетворяющая приведенному матричному уравнению (3), и что матрицы постоянных коэффициентов F и H соответствующей размерности образуют структуру динамического наблюдателя

$$\dot{z}(t) = F \cdot z(t) + H \cdot x(t) + T \cdot B \cdot u(t). \quad (4)$$

Заметим, что на вход наблюдателя (4) подаются два сигнала: $x(t)$ и $u(t)$. Поясним принцип синтеза наблюдателя на простой задаче. Предположим, что в уравнении (1) вектор $u(t) = 0$. Тогда переходный процесс в системе определится с помощью матричного экспоненциала

$$x(t) = e^{At} x(0),$$

где $x(0)$ — вектор начальных условий.

Теперь при нулевом сигнале управления подадим $x(t)$ на вход наблюдателя (4). Получим уравнение динамической системы

$$\dot{z}(t) = F \cdot z(t) + H \cdot x(t), \quad (5)$$

где F и H — матрицы наблюдателя, подлежащие определению на основании условия (3). В основе синтеза наблюдателя лежит следующее утверждение: если существует такая матрица преобразования T , что удовлетворяется матричное уравнение (3)

$$T \cdot A - F \cdot T = H,$$

то при соблюдении этого условия можно утверждать, что будет соблюдаться равенство $z(t) = T \cdot x(t)$ для $t \geq 0$.

Если известны начальные условия объекта и наблюдателя, причем

$$z(0) = T \cdot x(0), \quad (6)$$

то наблюдению подлежат текущие значения вектора состояния для всех $t \geq 0$. Если же условие (6) не соблюдается, то $z(t) \approx T \cdot x(t)$ с момента $t \geq t_p$, где t_p — время переходного процесса наблюдателя (5).

Докажем это утверждение. Если существует линейное преобразование $z(t) = T \cdot x(t)$, то

$$\dot{z}(t) - T \cdot \dot{x}(t) = F \cdot z(t) + (H - T \cdot A) \cdot x(t) = F [z(t) - T \cdot x(t)]. \quad (7)$$

Введем вектор ошибки

$$s(t) = z(t) - T \cdot x(t). \quad (8)$$

Тогда уравнение (7), с учетом равенства (8), можно записать следующим образом:

$$\dot{s}(t) = F \cdot s(t). \quad (9)$$

Решение (9) также определяется с помощью матричной экспоненты и вектора начальных условий:

$$s(t) = e^{Ft} \cdot s(0). \quad (10)$$

Из (10) следует, что если $s(0) = 0$, то $s(t) = 0$. Следовательно, в переходном режиме

$$s(t) = z(t) - T \cdot x(t) = 0 \Rightarrow z(t) = T \cdot x(t). \quad (11)$$

Если же $s(t) = z(t) - T \cdot x(t) \neq 0$, т. е. отсутствует информация о векторе начальных условий управляемой системы (1) либо наблюдателя (5), переходный процесс можно найти с помощью уравнения

$$z(t) = T \cdot x(t) + e^{Ft} [z(0) - T \cdot x(0)]. \quad (12)$$

Если структуру матрицы F выбрать так, чтобы переходный процесс в наблюдателе на временном интервале $(0 - t_p)$ завершался значительно быстрее, чем в системе (1), то второе слагаемое в правой части уравнения (12) при $t > t_p$ практически будет равно нулю и будет также выполнено условие $z(t) \approx T \cdot x(t)$.

В работах по теории наблюдателей показано, что существует единственное решение линейного уравнения (3) относительно T , если матрицы A и F не имеют общих собственных чисел.

Теперь обобщим полученный результат на систему (1) с ненулевым входом. Умножим это уравнение на матрицу T слева и воспользуемся моделью наблюдателя (4), т. е. подадим на вход наблюдателя (5) сигнал управления $T \cdot B \cdot u(t)$:

$$\dot{z}(t) = F \cdot z(t) + H \cdot x(t) + T \cdot B \cdot u(t).$$

Тогда уравнение (7) примет следующий вид:

$$\dot{z}(t) - T \cdot \dot{x}(t) = F \cdot z(t) + (H - T \cdot A) \cdot x(t) + (T \cdot B - T \cdot B) \cdot u(t).$$

Следовательно, переходный процесс в наблюдателе при компенсации погрешности наблюдений не зависит от сигнала управления $u(t)$. Поэтому наблюдатель для системы можно рассчитывать в предположении отсутствия сигнала управления с последующим использованием результатов расчета для случаев с ненулевым входом.

Для получения наблюдателя в виде $z(t) = x(t)$ необходимо в уравнении (3) выбрать $T = I$ (I — единичная матрица). Тогда наблюдатель должен представляться динамической моделью той же размерности, что и размерность системы, поскольку

$$F = A - H. \quad (13)$$

Матрица H в уравнении (13) может состоять из двух блоков. Первый блок представляет собой преобразователь вектора выхода системы, а второй определяется структурой входа наблюдателя. Структура наблюдателя для системы управления курсом судна, а также морских подвижных управляемых объектов со спецификой морского судна непосредственно связана с математическими моделями.

Математическая модель судна представляется сложной системой нелинейных дифференциальных уравнений, интегрирование которых возможно только численными методами с направленностью на результаты, пригодные для решения практических задач [10]. Применение компьютерных технологий, реализованных вычислительными средами в форме модулей и блоков, может кардинально расширить данную предметную область исследований при должном научном обосновании получаемых практических результатов. В среде MATLAB таким инструментарием можно считать Marine GNC Toolbox, в котором содержатся следующие модули: управления, внешней среды, генерирования траекторий движения, модели судна, навигации, модуль с набором утилит. Инструментарий также содержит модуль с многочисленными примерами использования элементов других модулей и блоков в совокупности со средствами MATLAB для получения конкретных решений [11].

Практика показывает, что речные водоизмещающие суда, как правило, являются неустойчивыми на курсе, а их диаграммы управляемости характеризуются наличием гидродинамического «люфта» [12]. Для их удержания на заданной траектории необходим определенный тип авторулевого в замкнутой системе с модулями предиктивного управления, управления по модели следования, модального управления и оптимизации [11]. Оптимизация режимов движения судна

по заданной траектории в условиях воздействия ветра и волнения по критерию минимума средне-квадратичного отклонения может быть реализована с помощью оценщиков, базирующихся на фильтрах Калмана–Бьюси [3].

При малых отклонениях переменных состояния от рабочей точки для синтеза систем управления судном используются линейные модели [13]. Наиболее простыми принято считать обобщенные модели Номото первого, второго и третьего порядков [14]. Их практическое применение базируется на возможности сильного редуцирования реального динамического процесса к одной из обобщенных моделей путем «пригонки» параметров к эксперименту средствами параметрической идентификации [15]. Модели нелинейных систем управления судном, с учетом специфики воздействия на объект внешних сил и моментов, в допустимой области вариации параметров, как правило, приводятся к линейным [13].

Динамические модели судна в форме пространства состояний, используемые в практике управления супертанкерами и другими водоизмещающими судами, предпочтительнее иных форм, поскольку позволяют применить весь арсенал методов матричного анализа и инструментарию среды MATLAB для решения комплекса научно-технических задач на базе различных технологий [16], [17]. В этой связи для синтеза динамического наблюдателя в работе принята структура модели супертанкера следующего вида [4], [17]:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + b \cdot u(t),$$

где матрицы A и b в уравнении (1), согласно работе [17], можно записать следующим образом:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Поскольку собственные значения матрицы A

$$\lambda_1 = 0; \quad \lambda_{2,3} = \frac{1}{2} \cdot \left(a_{11} + a_{22} \pm \sqrt{a_{11}^2 + a_{22}^2 - 2 \cdot (a_{11} \cdot a_{22} - 2 \cdot a_{21} \cdot a_{22})} \right),$$

объект является неустойчивым, и необходимо синтезировать регулятор для обеспечения требуемых динамических свойств системы с обратной связью по вектору состояния. Используя (14), получим матрицу замкнутой системы

$$A_7 = A - b \cdot K = \begin{bmatrix} a_{11} - b_1 \cdot K_1 & a_{12} - b_1 \cdot K_2 & -b_1 \cdot K_3 \\ a_{21} - b_2 \cdot K_1 & a_{22} - b_2 \cdot K_2 & -b_2 \cdot K_3 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

с регулятором $K = [K_1 \ K_2 \ K_3]$ для каждого режима с известными численными значениями элементов соотношений (14). Отметим также, что в модели (15) существует однозначная связь между коэффициентами характеристических полиномов замкнутой, разомкнутой систем и элементами матрицы регулятора. Коэффициенты регулятора выбираются так, чтобы матрица A_7 была гурвицевой с заданным спектром. Для полностью управляемой системы это означает существование и обоснованность выбора модального управления по состоянию с последующим получением характеристического полинома замкнутой системы с помощью регулятора в цепи обратной связи.

Модальный метод синтеза систем управления является наиболее мощным, теоретически обоснованным методом, широко используемым на практике [18]. Применительно к системам управления судном на курсе модальный метод позволяет автоматически корректировать параметры авторулевого при изменении условий плавания, получать желаемый вид переходного процесса с необходимыми качественными показателями на основе нормированных полиномов ряда фильтров (Баттерворта, Бесселя и др.), выполнять операции восстановления вектора состояния по вектору выхода при неполных измерениях. Метод связан с оптимальными решениями класса задач АКОР (аналитического конструирования оптимальных регуляторов), что позволяет обо-

сновывать выбор спектра матрицы A_3 по оценке коэффициентов весовых матриц интегрального критерия качества, используемого в задачах АКОР. При наличии численных значений параметров системы (1) со структурой матриц (14) с помощью модального метода устанавливается однозначная связь между коэффициентами полиномов разомкнутой и замкнутой систем. Это означает, что параметры регулятора можно оценить с помощью простого алгоритма модального управления, состоящего из следующих операций:

- 1) получение численных значений элементов матриц (14);
- 2) выбор собственных чисел матрицы A_3 ;
- 3) расчет регулятора путем применения функции Аккермана и оценки элементов A_3 по формуле (15);
- 4) построение характеристического полинома замкнутой системы с определением корней, численно равных собственным значениям A_3 .

Последняя операция алгоритма предусмотрена для проверки корректности вычислений.

Рассчитаем коэффициенты регулятора $K = [K_1 K_2 K_3]$ по алгоритму для авторулевого танкера дедрейтом 250 тыс. т. Ненулевые элементы матриц (14) математической модели судна в грузу имеют численные значения [17]:

$$a_{11} = -0.01306; \quad a_{12} = -8.639; \quad a_{21} = -0.00009309; \quad a_{22} = -0.04314;$$

$$b_1 = 0.07037; \quad b_2 = -0.0004592.$$

Выберем собственные числа матрицы A_3 в уравнении (15):

$$\lambda_1 = -0.05704; \quad \lambda_{2,3} = -0.01988 \pm i \cdot 0.014217.$$

Для расчета регулятора по способу Аккермана сначала из выбранных собственных значений сформируем вектор-столбец

$$p = [\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3]^T,$$

а затем при соблюдении синтаксиса оператора *acker* получим оценку коэффициентов K ,

$$K = \text{acker}(A, b, p) = [0.1476 \ -65.7976 \ -2.7154].$$

В результате получим матрицу A_3 системы с регулятором, которую для проверки корректности вычислений приведем в полном формате:

$$A = \begin{bmatrix} -0.023445757810724 & -4.008825298651207 & 0.191080317215991 \\ -0.000025317654019 & -0.073354242189276 & -0.001246896144175 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для проверки можно воспользоваться функцией *eig*(A_3), которая возвращает ранее выбранные элементы вектора p .

Синтез наблюдателя произведем с использованием функций инструментария *Symbolic Toolbox*. Это позволит придать вычислительному алгоритму свойства универсальности при вариации параметров, структуры модели судна и назначении собственных чисел матрицы состояния наблюдателя.

Предположим, что размерность выхода $y(t)$ равна $(r \times 1)$, где $r < n$. Тогда модель наблюдателя, с учетом уравнения (2), будет иметь следующий вид:

$$\dot{z}(t) = F \cdot z(t) + G \cdot y(t), \quad (16)$$

$$\text{где } H = G \cdot D. \quad (17)$$

В процессе синтеза наблюдателя матрица D размерности $(r \times n)$ не изменяется, а G размерности $(n \times r)$ может выбираться произвольно. Однако при выборе G следует иметь в виду, что динамические свойства наблюдателя полностью определены матрицей

$$F = A - G \cdot D. \quad (18)$$

Применительно к модели судна, с учетом ее структуры, для синтеза динамического наблюдателя Луенбергера полной размерности в уравнении (18) можно выбрать матрицу $G = [g_1 \ g_2 \ g_3]^T$. Тогда $D = [d_1 \ d_2 \ d_3]$ можно представить вектором-строкой, элементы которой принимают последовательно значения: $D_1 = [1 \ 0 \ 0]$, $D_2 = [0 \ 1 \ 0]$ и $D_3 = [0 \ 0 \ 1]$. Выбор структуры стабилизирующей части матрицы наблюдателя (18) в форме векторов-столбцов с ненулевыми элементами позволяет существенно упростить процедуру синтеза. В первом случае, согласно (2), при соблюдении условий управляемости и наблюдаемости по измерениям первой координаты состояния объекта можно восстановить вторую и третью координаты, во втором — первую и третью, а в последнем — по измерениям третьей переменной состояния оценить первую и вторую. Матрицы наблюдателей с введением стабилизирующей составляющей в рассматриваемых трех вариантах измерения имеют структуру:

$$F_1 = \begin{bmatrix} a_{11} - g_1 & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} - g_2 & a_{22} & a_{23} \\ -g_3 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad F_2 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} - g_4 & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} - g_5 & a_{23} \\ 0 & 1 - g_6 & 0 \end{bmatrix}; \quad F_3 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} - g_7 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} - g_8 \\ 0 & 1 & -g_9 \end{bmatrix}.$$

В матрице

$$A_3 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

содержатся элементы a_{ij} , где $i = 1, 2; \dots j = 1, 2, 3, \dots$ с численными значениями, приведенными ранее в полном формате. В составе собственных чисел матрицы A_3 содержится пара комплексно-сопряженных значений с отрицательной вещественной частью, что свидетельствует о достижении требуемого быстродействия при небольшом перерегулировании. Этот режим был установлен на танкере в полном грузу. Поскольку собственные числа матриц F_1 , F_2 и F_3 не должны совпадать со значениями, содержащимися в векторе $p = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3]^T$, для обеспечения устойчивости динамических наблюдателей при требуемом быстродействии выберем их равными следующим вещественным отрицательным значениям:

$$m = [m_1 \ m_2 \ m_3]^T = [-0.06 \ -0.05 \ -0.04]^T. \quad (19)$$

Полином наблюдателей со стабилизирующей частью, имеющий корни m_1 , m_2 и m_3 , приведенные в (19), представим в следующем виде:

$$z = (x - m_1) \cdot (x - m_2) \cdot (x - m_3) = x^3 + 0.15 \cdot x^2 + 0.074 \cdot x + 0.00012.$$

Полиномы наблюдателей, соответствующие матрицам F_1 , F_2 и F_3 , получим с помощью функций инструментария *Symbolic Toolbox*:

$$Z_n = a^3 + d_{1j} \cdot a^2 + d_{2j} \cdot a + d_{3j},$$

где $j = 1, 2, 3$.

Приравняем коэффициенты Z_n с неизвестными g_i , где $i = 1 \dots 9$, численным значениям z . В результате будем иметь систему алгебраических уравнений:

$$d_{1j} = 0.15; \ d_{2j} = 0.074; \ d_{3j} = 0.00012.$$

Решение для $j = 1$ определяет стабилизирующую часть наблюдателя G_1 при измерении первой координаты:

$$G_1 = [g_1 \ g_2 \ g_3] = [0.0532 \ -0.0001 \ 0.0018].$$

Аналогично для $j = 2$, т. е. при измерении второй координаты, получим G_2 :

$$G_2 = [g_4 \ g_5 \ g_6] = [5.6419 \ 0.0532 \ -2.5219].$$

Если $j = 3$, элементы вектора G_3 принимают значения

$$G_3 = [g_7 \ g_8 \ g_9] = [-0.5629 \ -0.0006 \ 0.0532].$$

Согласно (18), определим матрицы:

$$\begin{aligned} F_1 &= A_3 - G_1^T \cdot D_1; \\ F_2 &= A_3 - G_2^T \cdot D_2; \\ F_3 &= A_3 - G_3^T \cdot D_3. \end{aligned} \quad (20)$$

Для моделирования системы составим блочную матрицу S_j следующего вида:

$$S_j = \begin{bmatrix} A_j & 0_{3 \times 3} \\ G_j^T \cdot D_j & F_j \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где $j = 1, 2, 3$.

Теперь, подставив численные значения элементов матриц в (21), мы можем сформировать *LTI*-объект в форме пространства состояний, что позволяет использовать функции инструментария *Control Toolbox* для моделирования режимов работы наблюдателей. С этой целью, согласно синтаксису функции *ss*, введем матрицы $B1 = [0 \ 0 \ 0.425 \ 0 \ 0 \ 0.425]^T$; $C1 = eye(6)$; $D1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$. Создадим обобщенные системы

$$sysL_j = ss(S_j, B, C1, D1) \quad (22)$$

и произведем их моделирование при различных начальных условиях объекта и наблюдателя. Введем вектор состояния обобщенной системы

$$v = [v1 \ v2 \ v3 \ v4 \ v5 \ v6]^T,$$

где $v1, v2, v3$ — переменные состояния объекта, а $v4, v5, v6$ — соответствующие им переменные состояния наблюдателя.

Если известен вектор начальных условий

$$v0 = [v01 \ v02 \ v03 \ v04 \ v05 \ v06],$$

причем $v01 = v04, v02 = v05$ и $v03 = v06$, то время переходного процесса в наблюдателе, согласно (12), практически равно нулю, и для всех $t \geq 0$ на всех режимах соблюдаются равенства:

$$v1(t) = v4(t), \ v2(t) = v5(t) \text{ и } v3(t) = v6(t).$$

В других случаях динамический наблюдатель обеспечивает качественный режим восстановления неизмеряемых переменных состояния объекта на временном интервале $t \geq t_p$, где t_p — время переходного процесса в наблюдателе.

Моделирование выполнено при входном сигнале прямоугольной формы. Векторы начальных условий задаются так, чтобы можно было увидеть на графиках переходные процессы в обобщенных системах и, в частности, оценить время переходного процесса в наблюдателях.

На рис. 1 приведены результаты моделирования системы с наблюдателем S_1 при измерении $v1(t)$. Вектор начальных условий принят равным

$$v0 = [0 \ 0.003 \ 0.005 \ -0.6 \ -0.003 \ 0.06]^T.$$

Из рисунка видно, что переходный процесс в наблюдателе при измерении $v1(t)$ практически завершается за время $t_p \leq 210$ с.

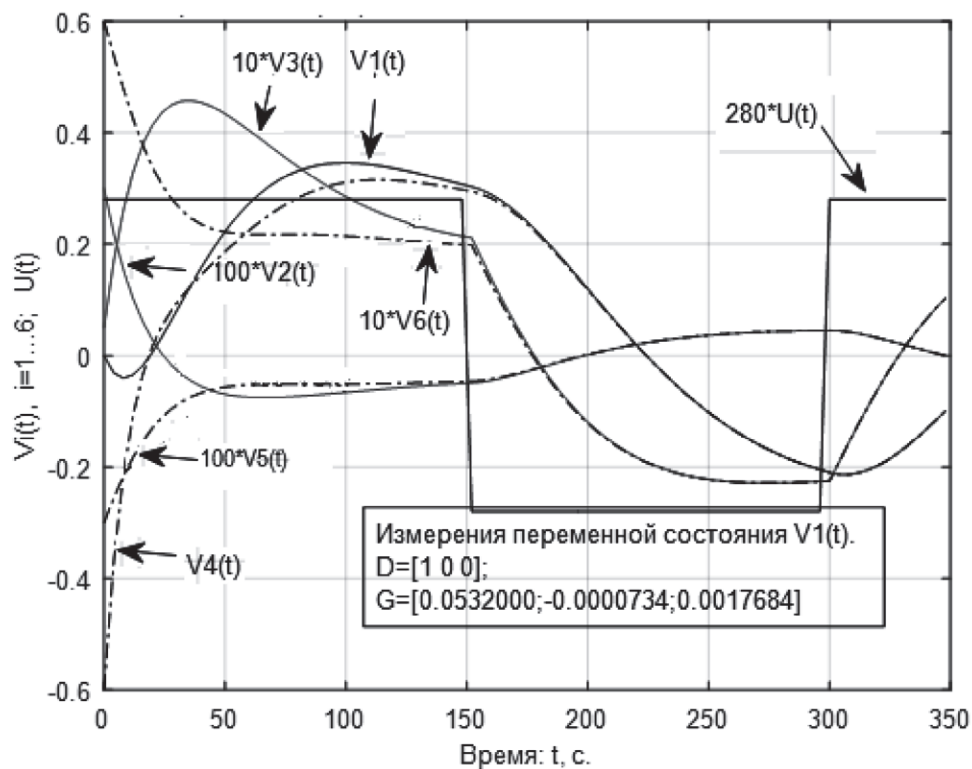


Рис. 1. Переходный процесс в обобщенной системе (22) с матрицей S_1

На рис. 2 приведены результаты моделирования системы с наблюдателем S_2 при измерении $v_2(t)$.

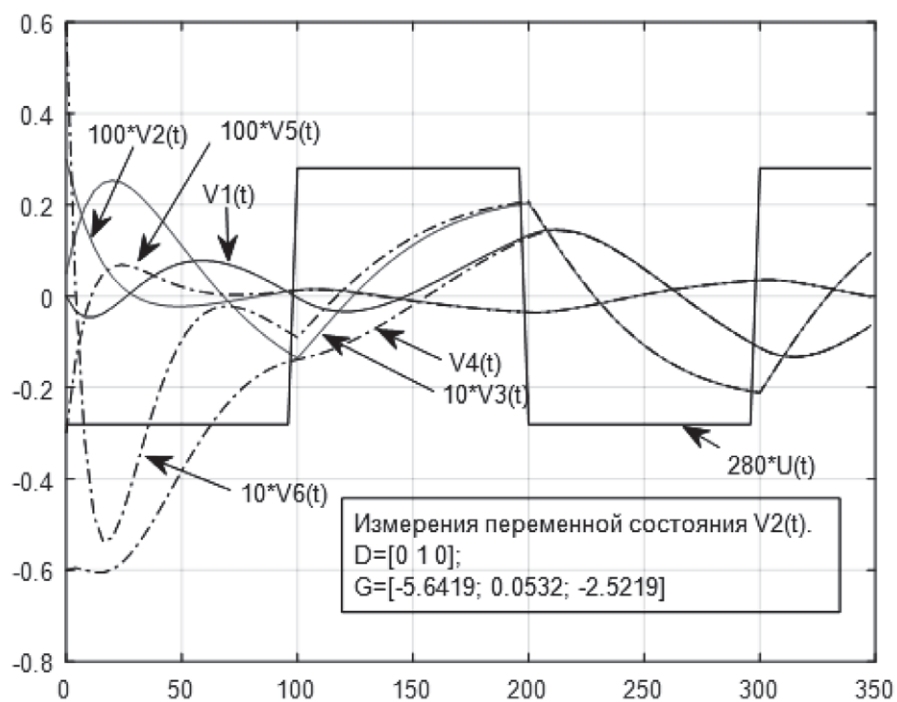


Рис. 2. Переходный процесс в обобщенной системе (22) с матрицей S_2

Из рис. 2 следует, что время переходного процесса t_p в наблюдателе при измерении $v_2(t)$ и векторе начальных условий

$$v_0 = [0 \ 0.003 \ 0.005 \ -0.6 \ -0.003 \ 0.06]^T$$

составляет не более 210 с.

Переходный процесс при измерении $v_3(t)$ представлен на рис. 3.

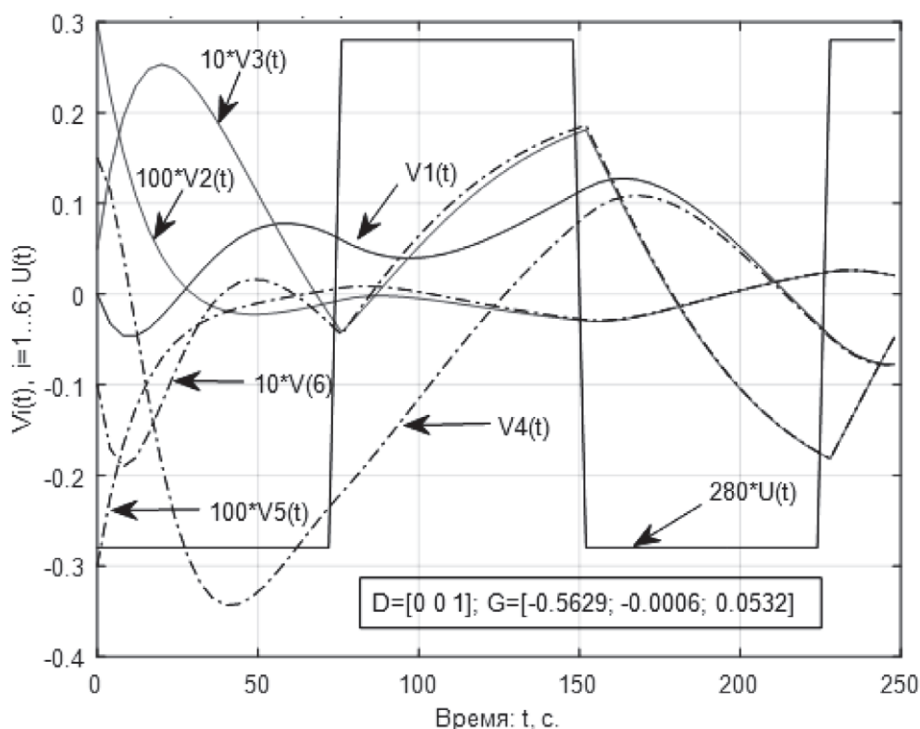


Рис. 3. Переходный процесс в обобщенной системе (22) с матрицей S_3

Для моделирования третьего наблюдателя с измеряемой координатой $v_3(t)$ выбран вектор начальных условий

$$v_0 = [0 \ 0.003 \ 0.005 \ 0.150 \ -0.003 \ -0.010]^T.$$

Время переходного процесса в наблюдателе, как и в предшествующих вариантах решения, составляет не более 210 с.

Модальный метод синтеза наблюдателя и алгоритм его реализации в приложении к модели судна с заданной структурой позволяют получить простые решения для управления свободными составляющими движения, однозначно определяемыми по совокупности собственных значений матрицы замкнутой системы. Для линейных моделей наблюдателей устойчивость гарантируется обоснованным выбором спектра, в котором не рекомендуется использовать кратные значения и численные значения, несущественно отличающиеся от корней характеристического полинома замкнутой системы управления курсом судна. Метод и алгоритм позволили синтезировать наблюдатели с одинаковым спектром с использованием одной из трех переменных состояния в качестве координаты выхода для полного восстановления вектора состояния при любых способах перекладки руля.

Выбор структуры стабилизирующей части наблюдателей путем введения векторов D_1 , D_2 и D_3 позволяет предложить способ мониторинга датчиков угла курса, угловой скорости и угла дрейфа, являющихся переменными состояния объекта. Модальный метод оценки коэффициентов полиномов моделей с одним выходом для расчета G_1 , G_2 , G_3 предпочтительнее других способов вычислений, поскольку обеспечивает сходимость решения при выборе корней, близких к кратным значениям. Наблюдатели фактически являются математическими датчиками информации и могут использоваться как для восстановления неизмеряемых переменных состояния, так и других переменных, измерение которых в судовых условиях затруднено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Perez T.* Ship motion control. Course keeping and roll stabilization using rudder and fins / T. Perez. — Springer-Verlag London Limited, 2005. — 309 p.
2. *Басин А. М.* Ходкость и управляемость судов / А. М. Басин. — М.: Транспорт, 1968. — 255 с.
3. *Сахаров В. В.* Синтез оптимального оценщика для системы управления судовым динамическим объектом / В. В. Сахаров, О. В. Шергина, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 26–31.
4. Автоматизация и повышение эффективности использования топлива на судах / ред. С. О. Барышников, А. А. Кузьмин, В. В. Сахаров, С. Н. Тарануха. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2016. — 390 с.
5. *Lewis F. L.* Optimal Control / F. L. Lewis, D. Vrabie, V. L. Syrmos. — 3rd ed. — N. Y.: John Wiley and Sons, 2012. — 541 p.
6. *Witkowska A.* Designing a ship course controller by applying the adaptive backstepping method / A. Witkowska, R. Smierzchalski // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. — 2012. — Vol. 22. — Is. 4. — Pp. 985–997. DOI: 10.2478/v10006-012-0073-y.
7. *Pang C. K.* Modal parametric identification of flexible mechanical structures in mechatronic system / C. K. Pang, F. L. Lewis, T. H. Lee // Transactions of the Institute of Measurement and Control. — 2010. — Vol. 32. — No. 2. — Pp. 137–154. DOI: 10.1177/0142331209339868.
8. *Dhaliwal S. S.* State Estimation and Parameter Identification of Continuous-time Nonlinear Systems: Master thesis / S. S. Dhaliwal. — Ontario, Canada: Queen's University Kingston, 2011. — 83 p.
9. *Гринкевич Я. М.* Наблюдатели и оценщики состояния в судовых системах управления / Я. М. Гринкевич, В. В. Сахаров. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2001. — 193 с.
10. *Гофман А. Д.* Динамика корабля / А. Д. Гофман. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2003. — 150 с.
11. *Сазонов А. Е.* Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети / А. Е. Сазонов, В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 6–13.
12. *Садков А. В.* Моделирование динамики водоизмещающего речного судна, неустойчивого на курсе / А. В. Садков // Морской вестник. — 2012. — № 3. — С. 94–96.
13. *Tomera M.* Nonlinear controller design of a ship autopilot / M. Tomera // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. — 2010. — Vol. 20. — Is. 2. — Pp. 271–280. DOI: 10.2478/v10006-010-0020-8.
14. *Nomoto K.* On steering qualities of ships / K. Nomoto, T. Taguchi, K. Honda, S. Hirano // International Shipbuilding Progress. — 1957. — Vol. 4. — No. 35. — Pp. 354–370.
15. *Агарков С. А.* Параметрическая идентификация обобщенной модели Номото с помощью аппарата вариационного исчисления / С. А. Агарков, С. В. Пашенцев // Вестник МГТУ. — 2015. — Т. 18. — № 1. — С. 7–11.
16. *Веремей Е. И.* Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов / Е. И. Веремей, В. М. Корчанов, М. В. Коровкин, С. В. Погожев. — СПб.: Изд-во НИИ Химии СПбГУ, 2002. — 370 с.
17. *Reid R. E.* Design of the steering controller of a supertanker using linear quadratic control theory: A feasibility study / R. E. Reid, B. C. Mears // Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, 1981 20th IEEE Conference on. — IEEE, 1981. — Pp. 181–187. DOI: 10.1109/CDC.1981.269493
18. *Панкратов В. В.* Специальные разделы теории автоматического управления: учеб. пособие / В. В. Панкратов, О. В. Нос. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. — Ч. I. Модальное управление и наблюдатели. — 48 с.

A MODAL METHOD FOR THE SYNTHESIS OF AN OBSERVER FOR HEADING CONTROL

A method for synthesis of an observer for heading control based on the theory of modal controllers considered. Modern systems of navigation, their technical facilities are characterized by high dimensionality and complexity. Their components are: gyro pilots, control systems, propulsion complex, dynamic positioning systems, controls, filters, monitoring tools, evaluation of state variables, dynamic observers, identifiers, etc.. Evaluation models of quantitative and qualitative indicators, ship control systems based on the use of generalized mathematical models, which can take different forms depending on the influence of numerous factors on its structure and parameters. The use of a class

of simple models of the dynamics of managing tankers, proposed by Nomoto, for the synthesis of optimal controllers and parametric settings of the autopilots is connected with necessity of accounting of changes of their parameters, the reconstruction of the state vector according to incomplete measurements. The adequacy of the dynamics and simple models of object functioning in the conditions of changing external environment, can be improved through the application of modern algorithms of analysis, synthesis and optimization of automatic systems and tools of computing environments and computer technologies with application of the main provisions of the modal control. The technique of synthesis of dynamic observer of Luenberger complete dimension, characterized in that it takes into account the structure of the state matrix model of the vessel with the regulator Ackerman, permit subject to the conditions of controllability and observability of the choice of the stabilizing structure of the matrix of the observer in the form of vectors — columns with non-zero elements, which allows to simplify the synthesis procedure. The calculation of the observer for estimation of vector of state variables completed for supertanker with a deadweight of 150 thousand tons.

Keywords: ship, model, control, observer, matrix, output and state vectors, modal method, algorithm, synthesis.

REFERENCES

1. Perez, T. *Ship motion control. Course keeping and roll stabilization using rudder and fins*. Springer-Verlag London Limited, 2005.
2. Basin, A. M. *Hodkost' i upravlyayemost' sudov*. M.: Izd-vo «Transport», 1968.
3. Saharov, V. V., O. V. Shergina, and A. A. Chertkov. "Optimal estimator synthesis for ship dynamic object control." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(20) (2013): 26–31.
4. Baryshnikov, S. O., A. A. Kuzmin, V. V. Saharov, and S. N. Taranuha, eds. *Automation and improving fuel efficiency in the courts*. Spb.: Izd-vo Politehnicheskogo un-ta, 2016.
5. Lewis, F. L., D. Vrabie, and V. L. Syrmos. *Optimal Control*. 3rd ed. N.Y.: John Wiley and Sons, 2012.
6. Witkowska, A., and R. Smierzchalski. "Designing a ship course controller by applying the adaptive backstepping method." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 22.4 (2012): 985–997. DOI: 10.2478/v10006-012-0073-y.
7. Pang, C. K., F. L. Lewis., and T. H. Lee. "Modal parametric identification of flexible mechanical structures in mechatronic system." *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 32.2 (2010): 137–154. DOI: 10.1177/0142331209339868.
8. Dhaliwal, S. S. *State Estimation and Parameter Identification of Continuous-time Nonlinear Systems*. Master thesis. Ontario, Canada: Queen's University Kingston, 2011.
9. Grinkevich, Ja. M., and V. V. Saharov. *Nabludateli i ocenivatelyi sostojaniya v sudovyh sistemah upravleniya*. SPb.: SPGUWK, 2001.
10. Gofman, A. D. *Dinamika korablja*. SPb.: Izd-vo SPGUWK, 2003.
11. Sazonov, A. E., and V. V. Derjabin. "Forecasting to paths of the motion ship with the help of neyronnoy network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 6–13.
12. Sadkov, A. V. "Modeling the dynamics of displacement river boat which is course-unstable." *Morskoy Vestnik* 3 (2012): 94–96.
13. Tomera, M. "Nonlinear controller design of a ship autopilot." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 20.2 (2010): 271–280. DOI: 10.2478/v10006-010-0020-8
14. Nomoto, K., T. Taguchi, K. Honda, and S. Hirano. "On steering qualities of ships." *International Shipbuilding Progress* 4.35 (1957): 354–370.
15. Agarkov, S. A., and S. V. Pashentsev. "Parametric identification of the Nomoto generalized model using the apparatus of variational calculus." *Vestnik of MSTU* 18.1 (2015): 7–11.
16. Veremey, E. I., V. M. Korchanov, M. V. Korovkin, and S. V. Pogojev. *Kompyuternoe modelirovanie sistem upravleniya dvizheniem morskikh podvijnykh ob'ektov*. SPb.: NII Himii SPbGU, 2002.
17. Reid, R. E., and B. C. Mears. "Design of the steering controller of a supertanker using linear quadratic control theory: a feasibility study." *Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, 1981 20th IEEE Conference on*. IEEE, 1981: 181–187. DOI: 10.1109/CDC.1981.269493.
18. Pankratov, V. V., and O. V. Nos. *Specialnye razdely teorii avtomaticheskogo upravleniya. Ch. I. Modalnoe upravlenie i nabljudateli: ucheb. Posobie*. Novosibirsk.: Izd-vo NGTU, 2001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сазонов Анатолий Ефимович — чл.-корр. РАН,
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
sazonst@yandex.ru
Сахаров Владимир Васильевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
saharov@rambler.ru, SaharovVV@gumrf.ru
Чертков Александр Александрович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
chertkov51@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sazonov Anatoliy Efimovich — corr. RAS,
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
sazonst@yandex.ru
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

Статья поступила в редакцию 11 апреля 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-223-231
УДК 004.732.629.5-52

**В. В. Вычужанин,
Н. О. Шибаева**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
СУДОВЫХ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ
МОДЕЛИРОВАНИЯ И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

В статье приведены результаты анализа литературных источников, из которых следует актуальность поиска оптимальных вариантов по критериям качества для принятия конечного решения в целях повышения эффективности эксплуатации судовых сложных технических систем. Для достижения поставленной цели разработаны и исследованы модели многокритериальной и многопараметрической оптимизации технологических параметров эксплуатируемых сложных технических систем на примере судовой энергетической установки. При постановке и решении задачи оптимизации характеристик судовой энергетической установки определен набор независимых параметров, условий, определяющих допустимые их значения, получена целевая функция и выбран метод решения оптимизационной задачи на базе системного подхода. В результате решения задачи оптимизации определено множество альтернативных решений, соответствующих принципу оптимальности Парето и удовлетворяющих поставленным ограничениям. Полученные результаты оптимизации позволяют установить конкретные значения долевых мощностей и часовых расходов топлива главным двигателем, вспомогательным дизель-генератором, аварийным дизель-генератором, при которых судовая энергетическая установка энергоэффективна.

Ключевые слова: судовая энергетическая система, многокритериальная оптимизация, энергоэффективность.

Введение

Разработка и эксплуатация высокоэффективных технических систем и технологических процессов не обходится без применения новых технологий и невозможна без оптимального согласования существенного количества функциональных параметров, влияющих на эффективность систем. Основной задачей повышения эффективности сложных технических систем (СТС) и процессов является разработка виртуальных моделей, описывающих комплекс свойств и харак-