

стройке программного обеспечения для различных классов подвижных объектов.

Применение разработанной компьютерной технологии и типовых проектных решений обеспечивает резкое сокращение сроков разработок и затрат на создание и модификацию отдельных компонентов перспективных систем управления и систем обучения операторов.

Дальнейшие публикации о системе имитационного моделирования предполагаются в последующих номерах журнала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Построение систем координированного управления движением подводных объектов на базе сетевых средств* / Борисов В.Г. и др. // Тр. междунар. конф. «Моринтех — 2001». — СПб., 2001.
2. *Борисов В.Г., Данилова С.К., Чинакал В.О.* Интеллектуальная система поддержки принятия решений для интегриро-

ванных систем управления и навигации морскими подвижными объектами // Тр. XI Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. — СПб.: Электроприбор, 2004.

3. *Борисов В.Г., Данилова С.К., Чинакал В.О.* О построении интегрированных систем навигации, управления и обучения операторов на базе методов интеллектуального управления // Тр. XII Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. — СПб.: Электроприбор, 2005.
4. *Международный военно-морской салон IMDS — 2003.* Компьютерный понятийный тренажер для обучения операторов управления морскими подвижными объектами. — СПб. 2003.
5. *Пятая Международная конференция и выставка по морским интеллектуальным технологиям «Моринтех — 2003».* Интеллектуальные технологии в эксплуатации кораблей и судов (системы обработки информации и управление). — СПб.: Моринтех, 2003.

☎ (495) 334-92-40, e-mail: lab57\_1@ipu.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.Г. Воликом. □

УДК 312.1:444

# СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ДЛЯ ОДНОЙ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Л.В. Евстигнеева, Н.Н. Тарасов, М.Г. Тахтамышев

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва*

Предложен алгоритм фильтрации и восстановления неизмеряемых координат для решения задачи синтеза алгоритма управления морскими подвижными объектами в режиме «без хода», позволяющий существенно повысить качество процессов управления.

## ВВЕДЕНИЕ

Одна из задач, стоящих перед проектировщиками систем управления движением морских подвижных объектов (МПО), заключается в обеспечении стабилизации МПО в режиме «без хода». Традиционно разработчики таких систем применяют структуры линейных регуляторов, но если в режимах движения при наличии скорости хода требуемое качество процессов обеспечивается, как

правило, с помощью ПД и ПИД-регуляторов, то для стабилизации МПО в режиме «без хода» такие структуры оказываются неэффективными, поскольку не позволяют получить необходимого запаса устойчивости системы. Для решения этой задачи в существующих системах управления МПО в законы управления вводятся высшие производные регулируемых координат с большими коэффициентами усиления. Однако при такой структуре регулятора, как показывает практика, существенно



увеличивается уровень шумов в канале управления, что, в свою очередь, приводит к ухудшению качества процессов автоматического управления.

В настоящее время при проектировании систем управления широкое применение находят подходы, основанные на применении методов фильтрации и восстановления координат. Реализация таких подходов позволяет не только снижать уровень помех измеряемых координат, но и восстанавливать неизмеряемые координаты, используемые в законах управления. Однако реализация таких фильтров на бортовых комплексах часто вызывает затруднения из-за ограниченной производительности бортовых вычислительных машин.

В настоящей статье рассматривается структура регулятора, в которой вместо высших производных используются оценки координат управляющих воздействий. Как показали результаты исследований, такой способ реализации не требует больших коэффициентов усиления, что в итоге приводит к существенному снижению уровня помех и повышению качества процессов управления.

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА

Объект управления описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений вида

$$\begin{aligned} \dot{V}_y &= a_1 V_y |V_y| + b_1 u_c, \\ \dot{\eta} &= V_y, \\ \dot{\omega}_z &= a_2 |V_y| \omega_z + b_2 (l_1 + l_2) u_{c1}, \\ \dot{\psi} &= \omega_z \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a_i$  — известные параметры,  $V_y$ ,  $\omega_z$ ,  $\psi$  и  $\eta$  — координаты движения,  $u_c$  и  $u_{c1}$  — управляющие воздействия. Производные  $\dot{u}_i$  управляющих воздействий представляют собой нелинейные функции, вид которых показан на рис. 1, где  $\sigma_i$  — алгоритмы управления:  $\sigma_c = f(\eta, \dot{\eta}, u_c)$ ,  $\sigma_{c1} = f(\psi, \dot{\psi}, u_{c1})$ .

В качестве измерителей служат датчики величин  $\psi$ ,  $\eta$  и  $\dot{\eta}$  (так как для рассматриваемой задачи  $\dot{\eta} = V_y$ , в дальнейшем под измеряемой величиной подразумевается координата  $V_y$ ). Уравнения, описывающие процесс измерения, с достаточной степенью точности могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} \psi_{\text{изм}} &= y_\psi = \psi + \xi_\psi, \\ \eta_{\text{изм}} &= y_\eta = \eta + \xi_\eta, \\ V_{\text{изм}} &= y_{V_y} = V_y + \xi_{V_y}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $y_\psi$ ,  $y_\eta$ ,  $y_{V_y}$  — измеренные значения параметров  $\psi$ ,  $\eta$  и  $V_y$ , а  $\xi_\psi$ ,  $\xi_\eta$  и  $\xi_{V_y}$  — случайные величины, характеризующие погрешность измерения.

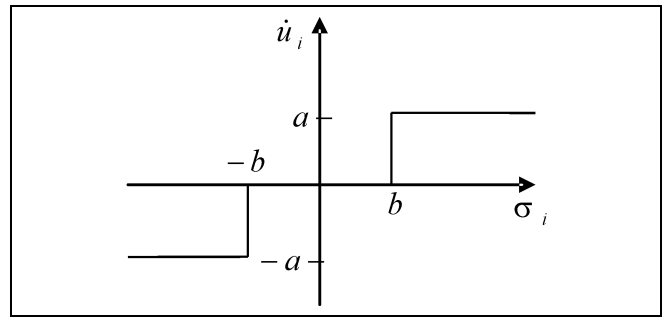


Рис. 1. Вид производных управляющих воздействий

Из системы уравнения (1) видно, что с помощью управляющего воздействия  $u_c$  осуществляется управление МПО по глубине  $\eta$ , а с помощью воздействия  $u_{c1}$  — стабилизация по дифференту  $\psi$ .

## 2. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

Традиционно применяемая структура регулятора, как правило, задается в виде

$$\begin{aligned} \sigma_c &= -k_{\Delta\eta} \Delta\eta - k_{\dot{\eta}} \dot{\eta} - k_{\ddot{\eta}} \ddot{\eta}, \\ \sigma_{c1} &= -k_\psi \Delta\psi - k_{\dot{\psi}} \dot{\psi} - k_{\ddot{\psi}} \ddot{\psi}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Delta\eta = \eta - \eta_{\text{зад}}$ ,  $k_i$  — постоянные коэффициенты. Анализ показывает, что при такой структуре регулятора требуются очень большие коэффициенты, особенно при высших производных. Реализация такой структуры затруднительна даже в том случае, когда все координаты движения  $\eta$ ,  $\dot{\eta}$ ,  $\ddot{\eta}$ ,  $\psi$ ,  $\dot{\psi}$ ,  $\ddot{\psi}$ , измеряются с достаточно высокой точностью. Однако измерению доступны лишь координаты  $\eta$ ,  $\dot{\eta}$  и  $\psi$ , причем с довольно высоким уровнем шумов. Поэтому получение их оценок, а тем более оценок их производных с требуемой точностью, практически невозможно. Таким образом, использование законов управления с большими коэффициентами усиления приводит к существенным погрешностям в управлении реальными объектами.

На рис. 2 представлены результаты моделирования процессов переходов по глубине для одного МПО, где символом  $\bullet$  обозначен процесс перехода при отсутствии ошибок измерений ( $\sigma_{Q_1} = -k_{\Delta\eta} \Delta\eta - k_{\dot{\eta}} \dot{\eta} - k_{\ddot{\eta}} \ddot{\eta}$ ), а символом  $\blacktriangle$  — процесс перехода при наличии реальных помех по координатам  $\dot{\eta}$  и  $\ddot{\eta}$ :  $\sigma_{Q_1} = -k_{\Delta\eta} \Delta\eta - k_{\dot{\eta}} V_{\text{изм}} - k_{\ddot{\eta}} (\ddot{\eta} + \xi_{\ddot{\eta}})$ ; для оценки влияния помех по каждой из координат приведен также процесс перехода (символ  $\blacksquare$ ) при наличии помех только по координате  $\dot{\eta}$ :  $\sigma_{Q_1} = -k_{\Delta\eta} \Delta\eta - k_{\dot{\eta}} V_{\text{изм}} - k_{\ddot{\eta}} \ddot{\eta}$ .

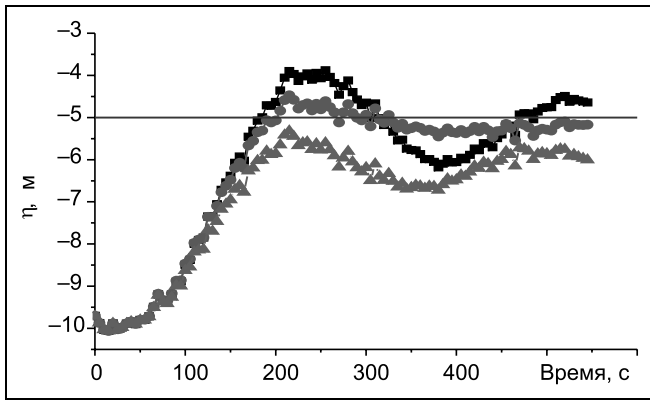


Рис. 2. Результаты моделирования процессов перехода (алгоритм (3))

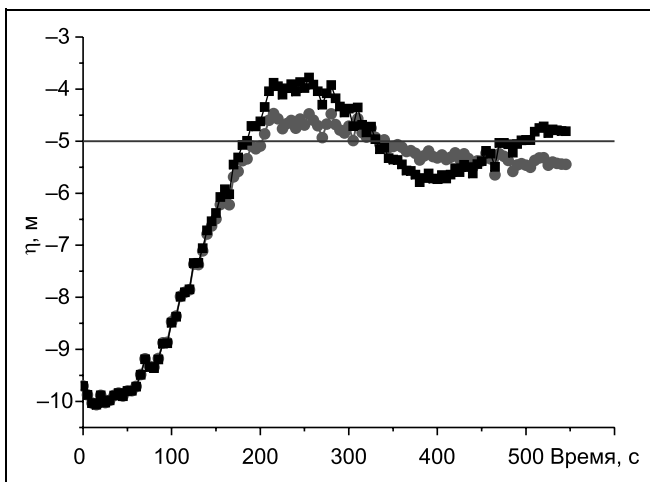


Рис. 3. Результаты моделирования процессов перехода (алгоритм (4))

Отметим, что для рассматриваемых МПО критерием качества процессов перехода по глубине служит минимум времени перехода, при условии, что перерегулирование не должно превышать 10 % от уровня перехода.

Алгоритм  $\sigma_{Q_1} = -k_{\Delta\eta}\Delta\eta - k_{\dot{\eta}}\dot{\eta} - k_{\ddot{\eta}}\ddot{\eta}$  обеспечивает требуемое качество управления только в «идеальном» случае, при отсутствии ошибок измерения. Учет реальных ошибок измерения (около 10 % от измеряемой величины) показывает, что данная структура алгоритма не позволяет обеспечить требуемое качество процессов управления.

Рассмотрим предлагаемую структуру алгоритма управления, не включающую в себя производные координат второго порядка:

$$\begin{aligned}\sigma_{Q_1} &= -k_{\Delta\eta}\Delta\eta - k_{\dot{\eta}}\dot{\eta} - k_{u_c}u_c, \\ \sigma_{Q_2} &= -k_{\Delta\psi}\Delta\psi - k_{\dot{\psi}}\dot{\psi} - k_{u_{c1}}u_{c1}.\end{aligned}\quad (4)$$

Реализация этой структуры, как показали результаты анализа для одного класса МПО, требует существенно меньших значений коэффициентов  $k_{u_c}$  по сравнению с коэффициентами  $k_{\dot{\eta}}$  и  $k_{\ddot{\eta}}$  в структуре алгоритма (3).

На рис. 3 представлены результаты моделирования переходов того же МПО по глубине в соответствии с алгоритмом (4): символом  $\bullet$  обозначен процесс перехода при отсутствии ошибок измерений ( $\sigma_{Q_1} = -k_{\Delta\eta}\Delta\eta - k_{\dot{\eta}}\dot{\eta} - k_{u_c}u_c$ ), а символом  $\blacksquare$  — процесс перехода при наличии реальных помех 10 % помех по координатам  $\dot{\eta}$  и  $u_c$ :  $\sigma_{Q_1} = -k_{\Delta\eta}\Delta\eta - k_{\dot{\eta}}V_{\text{уизм}} - k_{u_c}(u_c + \xi_{u_c})$ .

При отсутствии ошибок измерений алгоритм (4), как и алгоритм (3), обеспечивает хорошее качество управления. Ошибки измерения при реализации алгоритма (4) сказываются на качестве процесса управления значительно в меньшей степени, чем при реализации алгоритма (3).

Однако реализация алгоритма (4) связана с необходимостью восстановления неизмеряемой координаты  $u_c$ . Поэтому предложен алгоритм, использующий оценки как измеряемых, так и неизмеряемых координат движения:

$$\begin{aligned}\sigma_{Q_1} &= -k_{\Delta\eta}\Delta\hat{\eta} - k_{\dot{\eta}}\dot{\hat{\eta}} - k_{u_c}\hat{u}_c, \\ \sigma_{Q_2} &= -k_{\Delta\psi}\Delta\hat{\psi} - k_{\dot{\psi}}\dot{\hat{\psi}} - k_{u_{c1}}\hat{u}_{c1},\end{aligned}\quad (5)$$

где  $\Delta\hat{\eta} = \hat{\eta} - \eta_3$ .

Для получения оценок координат, входящих в алгоритм (5), возникает необходимость в решении задачи фильтрации и восстановления [1].

### 3. АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ КООРДИНАТ

Реализация фильтра для нелинейной модели объекта (1) требует большого объема вычислений. Это связано с необходимостью решения в реальном времени уравнения Риккати размерности  $n(n+1)/2$ , что предъявляет высокие требования к характеристикам бортовых вычислительных комплексов.

Ниже приводится способ решения задачи фильтрации и восстановления координат, не требующий для реализации решения системы уравнений большой размерности в реальном времени. Из системы уравнений (2) можно получить  $V_y = y_{V_{\text{изм}}} - \xi_{V_{\text{изм}}}$ , или  $V_y = y_{V_{\text{изм}}} - \xi_{V_{\text{изм}}} \approx y_{V_{\text{изм}}}$ .



Подставляя это выражение в модель движения, получим:

$$\begin{aligned}\dot{V}_y &= a_1 V_y |y_{V_{изм}}| + b_1 u_c, \\ \dot{\eta} &= V_y, \\ \dot{u}_c &= q_1.\end{aligned}\quad (6)$$

Легко проверить, что система (2), (6) является наблюдаемой, и параметры, необходимые для формирования закона управления, можно получить с помощью алгоритма фильтрации вида [2]:

$$\begin{aligned}\hat{V}_y &= a_1 \hat{V}_y |y_{V_{изм}}| + b_1 \hat{u}_c + K_V (y_\eta - \hat{\eta}), \\ \hat{\eta} &= \hat{V}_y + K_V (y_\eta - \hat{\eta}), \\ \hat{u}_c &= q_1 + K_V (y_\eta - \hat{\eta}).\end{aligned}\quad (7)$$

Коэффициенты усиления  $K = PC^T R^{-1} = (K_{V_c}, K_\eta, K_{u_c})^T$  в цепи обратной связи определяются, как правило, из уравнения Риккати  $\dot{P} = AP + PA^T - PC^T R^{-1} CP + Q$ ,

$$\text{где } A = \begin{pmatrix} a_1 |y_{V_y}| & 0 & b_1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; C = (0 \ 1 \ 0); Q = \begin{pmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{pmatrix};$$

$R = r$ .

Для реализации фильтра (7) не требуется решение уравнений Риккати в реальном времени, и коэффициенты  $K_i$  могут быть просчитаны заранее [3].

На рис. 4 приведены процессы переходов по глубине для системы управления МПО, в соответствии с алгоритмом (5) и фильтром (7) с посто-

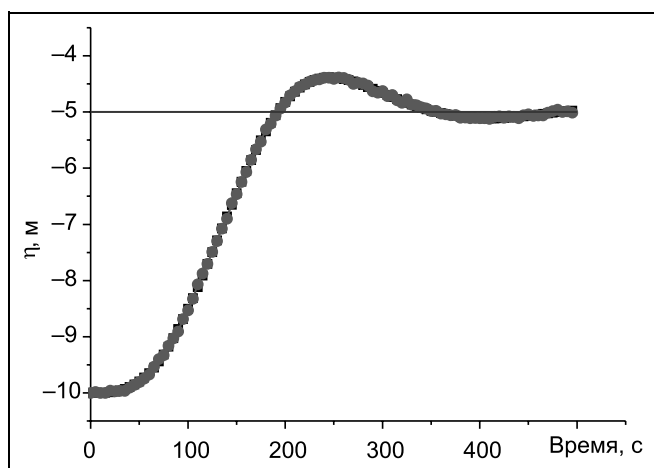


Рис. 4. Результаты моделирования процессов перехода (алгоритм (5) и диаметр (7))

янными коэффициентами  $K_i$ . Символом  $\bullet$  обозначен процесс перехода при отсутствии ошибок измерений, а символом  $\blacksquare$  — процесс перехода при наличии реальных помех измерения (10 %).

Как видно, эти процессы практически совпадают, и качество процессов в обоих случаях соответствует требуемому (минимум времени перехода при условии 10 %-й трубки по перерегулированию). Таким образом, если алгоритм (3) и алгоритм (4), в условиях реально действующих шумов измерений, не могут обеспечить требуемое качество процессов управления, то применение алгоритма (5) совместно фильтром (7) позволяет решить поставленную задачу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача синтеза алгоритма управления морскими подвижными объектами в режиме «без хода». Для оценки текущего состояния объекта применена структура фильтра Калмана, что позволяет получить оценки неизмеряемых координат. С помощью полученных оценок реализован алгоритм управления МПО, обеспечивающий высокое качество процессов управления благодаря существенному снижению уровня шумов по сравнению с традиционно применяемым алгоритмом. Известно, что реализация фильтра Калмана в бортовых системах управления вызывает затруднения из-за необходимости решать уравнения Риккати в реальном времени. Предложенный подход позволяет избежать этих затруднений. Этот подход предполагает:

- приведение нелинейной системы дифференциальных уравнений, описывающих движение МПО, к линейной системе с переменными коэффициентами;
- определение постоянного (для данного объекта) набора коэффициентов усиления при невязках путем решения уравнений Риккати для линейной системы;
- возможность корректировки полученного набора постоянных коэффициентов с учетом реальных характеристик процессов управления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах* / Под ред. К.Т. Леондеса. — М.: Мир, 1980.
2. *Воронов А.А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость*. — М.: Наука, 1979.
3. *Венгеров А.А., Шаренский В.А. Прикладные вопросы оптимальной линейной фильтрации*. — М.: Энергоиздат, 1982.

☎ (495) 334-92-20, e-mail: takhnamv@ipu.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.Г. Воликом. □