

СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ¹

В.Г. Борисов, С.К. Данилова, В.О. Чинакал

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

Рассмотрены основные пути повышения безопасности управления движением морских подвижных объектов на основе единой сквозной компьютерной технологии поддержки разработки технических средств и систем управления, отработки алгоритмических структур управления на полной математической модели движения объекта и различных вариантов алгоритмов управления и использования технических средств управления в штатных и нештатных ситуациях.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях одна из актуальных проблем состоит в повышении безопасности и эффективности управления движением подвижных объектов, в частности, морских подвижных объектов, например, подводных лодок и разнообразных подводных аппаратов, использующих различные гидродинамические и гидростатические технические средства управления. При управлении такими объектами операторам различных постов управления приходится решать комплекс достаточно сложных задач. Это и оперативные задачи по прокладке или изменению заданной траектории движения МПО в зависимости от известных заранее или возникающих в процессе управления статических или динамических траекторных угроз, и задачи выбора ТСУ, и задачи координированного управления различными средствами, решаемые с учетом эффективности применения различных ТСУ и фактических ресурсных ограничений. При-

ходится учитывать не только траекторию и динамику самого движущегося управляемого объекта, состояние и предельные возможности ТСУ и системы управления, но и возможное изменение внешней обстановки и действие различных возмущений (движение других объектов, плохая видимость, ветер, течения, узкости, мели и т. п.).

Наиболее сильное влияние на безопасность и эффективность управления МПО оказывают:

- качество используемого в СУ алгоритмического обеспечения;
- качество информационного обеспечения;
- эффективность программного обеспечения;
- уровень подготовки операторов постов управления МПО.

В связи с этим в данной работе рассмотрены возможности создания и применения общей методики для отработки различных аспектов безопасного управления МПО и, в первую очередь, совершенствования АО, ИО и ПО создаваемых перспективных систем управления нового поколения и подготовки высококвалифицированных операторов постов управления МПО и средств поддержки их работы. Для обеспечения эффективной поддержки основных этапов методики была разработана компьютерная технология, реализуемая на специ-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 05-08-01334а) и Программы фундаментальных исследований по теме № 301-04/01 ИПУ РАН в рамках комплексного проекта РАН № 2462.

ально созданном специализированном сетевом стенде [1].

Принятые сокращения:

АО — алгоритмическое обеспечение;
БД — база данных;
ИИ — искусственный интеллект;
ИО — информационное обеспечение;
ИСПР — интеллектуальная система поддержки работы операторов;
КТ — компьютерная технология;
МПО — морской подвижный объект;
ПО — программное обеспечение;
ПСУ — перспективная система управления;
ПТС — программно технические средства;
СИМ — система имитационного моделирования;
СОО — система обучения операторов;
СППР — система поддержки принятия решений;
СУ — система управления;
ТПР — типовые проектные решения;
ТСУ — технические средства управления.

Под перспективной системой управления нового поколения понимается модульная, параметрически настраиваемая интегрированная система навигации и управления, включающая в себя в качестве основных компонентов собственно систему управления объектом, систему навигации, встроенные в СУ систему поддержки принятия решений и систему обучения операторов постов управления МПО. Для выработки управляющих решений в такой системе применяются эффективные методы текущей адаптации параметров моделей объекта и ТСУ, получение оценок действующих возмущений и подстройки параметров алгоритмов управления. Построение и коррекция параметров алгоритмов управления осуществляется на базе методов оптимального управления, элементов и методов искусственного интеллекта, реализуемых в интеллектуальной системе поддержки работы оператора. Разработка такой перспективной СУ осуществляется на базе единого подхода и общих принципов построения АО, ИО и ПО с помощью общих моделей, типовых алгоритмов идентификации, адаптации, управления и методов ИИ, реализуемых в виде типовых проектных решений (ТПР). На базе единых ТПР разрабатывается также и система обучения операторов управления МПО, включающая в себя полную модель объекта, ТСУ, СУ и ИСПР.

Применение современных компьютерных технологий и ТПР на базе ИИ, а также реализация бортовых ПСУ на типовых программно-технических средствах в виде распределенной системы управления обеспечивают не только резкое сокращение сроков и затрат на создание ПСУ и СОО, но, самое главное, обеспечивают значительное повы-

шение эффективности и безопасности управления МПО. Существенная часть общего положительного эффекта обеспечивается путем применения ИСПР как в процессе управления МПО, так и при обучении операторов [1–5].

1. ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОГО УПРАВЛЕНИЯ МПО

Анализ существующих подходов и методов создания и эксплуатации систем управления, СППР и систем обучения показывает [2, 3], что имеются значительные резервы повышения общего уровня безопасного управления МПО.

Существенное продвижение в решении данной проблемы возможно путем применения системного подхода к созданию единого комплекса ПСУ нового поколения, обеспечивающего на базе единого подхода и качественно новый уровень управления объектом и одновременно высокий уровень подготовки операторов для ПСУ. Поисковые исследования и НИР, направленные на разработку основных компонентов такого комплекса, были начаты в Институте проблем управления РАН в 1998 г. по инициативе и при постоянной поддержке И.В. Прангишвили. Результаты этих исследований, продолжающихся и в настоящее время, позволили выполнить совместно с проектно-конструкторскими организациями ряд НИР и ОКР по созданию и отработке отдельных компонентов прототипов ПСУ для конкретных объектов.

Применительно к созданию нового поколения ПСУ для МПО рассматривались различные подходы. Один из них связан с созданием методики и эффективных программно-технических средств для создания и отработки АО, ИО и ПО для ПСУ и, в частности, с разработкой и применением специальных стендов имитационного моделирования. Созданный в ИПУ РАН специализированный программно-технический комплекс [1] реализован в виде многомашинного сетевого компьютерного стенда имитационного моделирования. Стенд позволил автоматизировать отработку алгоритмического и информационного обеспечения для распределенных ПСУ и обеспечить автоматизацию полномасштабного моделирования одновременной работы основных подсистем ПСУ с использованием общей имитационной модели. Конфигурирование полной имитационной модели позволяет включать и исследовать различные варианты модели объекта в нормальных и аварийных режимах, отрабатывать варианты перспективных компонентов АО, ИО и ПО для СУ и ТСУ, варианты реализации СППР, СОО и моделировать различные внешние возмущения и траекторные угрозы.

В работах [2, 3] были рассмотрены и другие подходы, повышающие эффективность и безопас-



ность управления МПО благодаря применению методов искусственного интеллекта, ПСУ, интеллектуальных СППР и СОО, а также разработке и применению типовой подсистемы создания виртуальной реальности в дополнение к традиционным методам визуализации отдельных режимов управления МПО.

В настоящей работе рассмотрен подход к повышению эффективности и безопасности управления МПО путем применения современных компьютерных технологий, реализуемых на базе полномасштабной СИМ и обеспечивающих совместную обработку АО, ИО и ПО, предназначенных для СУ и ТСУ, для бортовых ИСПР, встроенных в СУ, а также современных тренажеров и систем обучения операторов.

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ МПО

В основу разработанной общей методики, реализуемой на базе методов системного анализа и единой компьютерной технологии, положены общие принципы и подходы к повышению общего уровня безопасного управления МПО. Методика учитывает специфику управления движением МПО и позволяет получить сопоставительные оценки эффективности работы ТСУ, СУ и операторов при возникновении типовых аварийных ситуаций и их сочетаний. Например, заклинка рулей при высокой скорости хода или пробойна в прочном корпусе могут приводить к наступлению других аварийных ситуаций (провал за допустимую глубину, запредельный крен или дифферент и др.). Аналогичные аварийные ситуации могут вызываться и при неправильных действиях операторов постов управления движением МПО.

Основное внимание уделено согласованной разработке вариантов АО, ИО и ПО для СУ и ТСУ, а также соответствующих вариантов построения СППР и СОО. Общая методика обеспечения безопасного управления реализует:

- получение текущих оценок параметров модели движения объекта и параметров альтернативных математических моделей неизменяемых возмущений, действующих на объект, с помощью интегрированной системы навигации и управления;
- генерацию, проверку и выбор наиболее вероятных гипотез о моделях, значениях их параметров, состоянии объекта, работоспособности ТСУ и оставшихся ресурсах управления;
- определение безопасного управления МПО с помощью принципа максимума Л.С. Понтрягина и учета текущих оценок параметров выбранных моделей;

– прогноз движения объекта и определение областей безопасного управления МПО с учетом статических и динамических траекторных угроз;

– визуализацию пространственного движения МПО, работы ТСУ и областей безопасного управления МПО с помощью компьютерных методов создания виртуальной реальности для операторов постов управления;

– интеллектуальную поддержку управления МПО и принятия решений операторами в штатных и нештатных ситуациях с помощью интеллектуальной СППР;

– построение эффективной системы обучения операторов постов управления МПО на основе изложенных принципов, единых математических моделей, типовых АО, ИО и ПО, общей системы визуализации и интеллектуальной поддержки, используемых при построении СУ, СППР и СОО.

Применение комплекса компьютерных технологий позволяет не только реализовать основные компоненты ПСУ на основе указанных принципов, но и дает возможность получить численные оценки эффективности применения различных алгоритмов и средств управления, значительно увеличить число исследованных вариантов использования ТСУ, АО, ИО и ПО, обеспечить углубленное тестирование функциональности и надежности работы ПО, а также значительно сократить затраты и сроки создания СУ и СОО.

При реализации общей КТ на базе имитационного исследовательского комплекса проверялись различные варианты построения и совместного применения компьютерных моделей, методик и компьютерных технологий, позволяющих реализовать отдельные задачи и принципы. Исследовались возможности применения различных универсальных и специализированных пакетов, прикладных программ и инструментальных сред типа MATLAB-SIMULINK и др. Однако, за исключением реализации отдельных программных компонентов, при построении имитационного исследовательского комплекса реального времени потребовался значительный объем программирования на языках высокого уровня.

Научные и методические вопросы реализации отдельных компонентов ПСУ рассматривались в ряде известных работ, а также в некоторых работах авторов. В частности, рассмотрен подход к определению многомерного оптимального управления МПО и построению допустимых безопасных управлений на основе принципа максимума Л.С. Понтрягина [2], рассмотрена структура ИСПР и особенности ее построения [3]. Допустимые безопасные управления определяются с учетом имеющихся ресурсов управления, данных системы навигации и наиболее вероятной модели внешних возмущений. Заданные и фактические траектории

движения МПО, работа ТСУ, области безопасного управления и имеющиеся ресурсы управления представляются операторам постов управления с помощью трехмерной системы виртуальной реальности. Алгоритмы управления, синтезируемые для ПСУ, реализуются и в СУ, и в ИСПР. Доступ к ИСПР обеспечивается с различных постов управления МПО.

Разработанная общая методика отработки АО, ИО и ПО позволяет обеспечить компьютерную поддержку реализации следующих основных этапов создания ПСУ:

- выявление и исследование основных предпосылок и причин возникновения и развития ситуаций, угрожающих безопасному управлению МПО, уточнение математических моделей самого МПО и моделей ТСУ по результатам ходовых испытаний или данным эксплуатации МПО, построение моделей, учитывающих отказы в аппаратно-программных средствах СУ и ТСУ, адаптация параметров текущих моделей внешних возмущений;

- определение оценок предельных возможностей МПО, ТСУ и СУ по обеспечению требований безопасности управления МПО при выполнении поставленных целей и учете остальных тактико-технических требований, включая возможные аварийные ситуации, отказы ТСУ, СУ и неправильные действия операторов;

- совместное определение согласованных требований и параметров МПО, ТСУ и прототипа АО, ИО и ПО для типовой СУ на этапе автоматизированного проектирования ТСУ и СУ МПО;

- исследование на стенде СИМ [1] эффективности совместной работы МПО, ТСУ и СУ на этапе создания и отработки рабочих проектов с использованием полных математических моделей и получением численных оценок для различных вариантов и ситуаций;

- определение требований на доработку СУ и разработку ИСПР и СОО на базе использования в них единых моделей МПО, ТСУ и внешних возмущений, а также рекомендаций по обеспечению эффективной поддержки действий операторов в экстремальных ситуациях;

- автоматизированное тестирование и испытания работы аппаратно-программных средств СУ при комплексном моделировании совместной работы МПО, ТСУ и СУ на этапе ввода объекта в эксплуатацию;

- разработка ИСПР, встроенных в СУ, и создание СОО на базе единых моделей МПО, ТСУ, СУ и моделей внешних возмущений [2, 3];

- доработка ТСУ, СУ, ИСПР и СОО по результатам ходовых испытаний или модернизация этих подсистем после эксплуатации МПО (с повторением всех или некоторых перечисленных пунктов).

3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СИМ

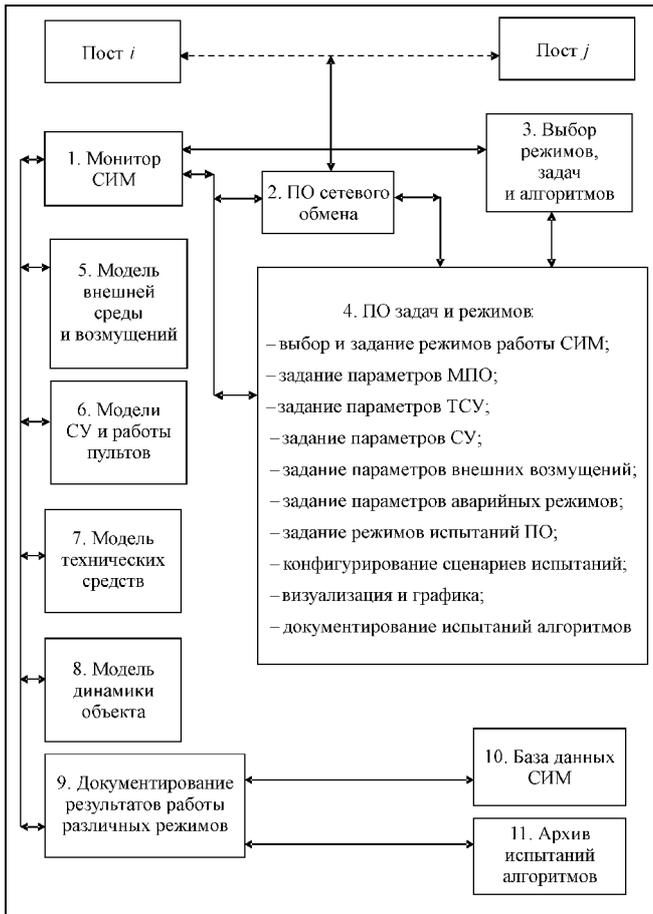
В качестве математической модели пространственного движения объекта принята система обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений 12-го порядка, представленная в нормальной форме. В общей модели имитации управления МПО, кроме модели движения МПО, учитываются модели работы ТСУ, модели системы управления и модели действия возмущений на объект. В общей модели учитывается сложная структура всех взаимосвязей между моделями. Модель зависимости тяги от задаваемого числа оборотов входит в уравнение движения в виде задания функции, имитирующей набор и сброс оборотов. Модели зависимостей сил и моментов учитывают влияние волнения моря, изменение плотности воды, влияние свободной поверхности и других возмущений и входят покомпонентно в уравнения сил и моментов общей имитационной модели.

Математические модели работы ТСУ описываются системами нелинейных дифференциальных уравнений до 6-го порядка для процессов, происходящих при функционировании различных исполнительных органов и видов арматуры (различных видов клапанов, кингстонов, насосов, цистерн и др.), а также включают в себя ограничения по скорости и положению приводов исполнительных органов, представляющие собой существенные нелинейности типа ограничений сверху, снизу и гистерезиса. В структуру типовой СУ входят также различные фильтры для оценивания неизмеряемых фазовых координат движения МПО. Общий порядок полной имитационной модели, реализуемой на СИМ, определяется моделью объекта, моделями СУ, моделями ТСУ и внешних возмущений и в зависимости от числа и типа исполнительных органов может быть более 40.

Рассмотрим кратко особенности реализации основных компонентов СИМ.

4. РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ НА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ СИМ

На рисунке представлена общая структура основных блоков распределенной сетевой специализированной СИМ, включающей в себя шесть рабочих станций, сервер и инжиниринговую станцию. Штриховой линией условно показана связь ПО рабочих станций и ПО сервера по сети, а ниже показаны основные блоки ПО (блоки 1–11), реализующие соответствующие задачи на сервере и рабочих станциях. Имитация работы полной имитационной модели производится пошагово. Монитор (блок 1) системы имитационного моделирования синхронизирует на каждом шаге обмен данными между сервером и отдельными задачами на



Структурная схема ПО системы имитационного моделирования

рабочих станциях через дополнительное ПО обеспечения режимов сетевого обмена (блок 2). При формировании сигналов с сервера используются также следующие имитационные модели: — динамики объекта (блок 8), внешней среды и возмущений (блок 5), работы технических средств (блок 7).

В ПО задач, реализуемых на каждом шаге имитации на отдельных рабочих станциях в различных режимах, входят следующие блоки: 2 — дополнительное ПО поддержки режимов сетевого обмена; 4 — ПО конфигурирования модулей, задач и режимов; 6 — имитации работы системы управления и пультов; 9 — текущего документирования работы режимов; 10 — база исходных данных СИМ по объекту, ТСУ, возмущениям и алгоритмам систем управления; 11 — архив испытаний алгоритмов.

В прикладное ПО инжиниринговой станции входят блок 2 и блок 3 — выбора режимов, задач, сценариев испытаний и формирования необходимых параметров перед началом испытания работы заданных последовательностей алгоритмов и режимов на стенде. После проведения испытания режима это ПО формирует данные для блоков 10

и 11 (на сервере), получая и обрабатывая накопленные данные из блоков 9 рабочих станций.

Возможны различные варианты работы стенда — от имитации автономной работы отдельных задач и режимов, реализуемых на различных постах управления, до имитации комплексных режимов взаимодействия работы алгоритмов, ТСУ и различных постов управления с обменом по сети всеми необходимыми данными между ними.

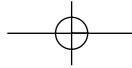
5. ПРИМЕРЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ И ОТОБРАЖЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ ОПЕРАТОРА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МПО

На основе проведенных исследований и применения КТ был разработан прототип АО, ИО и ПО основных подсистем ПСУ [4, 5]. На рисунках (см. цветную вклейку) представлены примеры видеокладов виртуального представления операторам постов управления движением МПО текущей и прогнозируемой ситуации, состояния ТСУ и движения объекта [4, 5]. Для существенного улучшения восприятия и оценки операторами поступающей концентрированной оперативной информации при построении подсистемы виртуальных отображений применены принципы и методы инженерной психологии. Оператор осуществляет пространственное координированное ручное управление МПО по курсу и глубине с помощью четырех ТСУ, управляя положением горизонтальных кормовых и носовых рулей, вертикальными рулями и скоростью хода (см. верхний рисунок). На нижнем рисунке приведен пример видеоклада при автоматическом управлении МПО с представлением оператору предсказанного положения объекта, ограничений по управлению и выполнения требований обеспечения траекторной безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение единой компьютерной технологии при разработке систем управления, интеллектуальных систем поддержки работы операторов, тренажеров и систем обучения операторов позволяет не только создать программно-технические средства нового поколения, но и гарантировать высокий уровень подготовки операторов, необходимый для эффективной эксплуатации этих средств. В конечном итоге все это и обеспечивает безопасное, безаварийное и эффективное управление морскими подвижными объектами, особенно в нестандартных и чрезвычайных ситуациях;

Повышение качества разработки указанных систем обеспечивается благодаря типизации и стандартизации проектных решений в различных подсистемах, применению общих моделей и методов, конфигурированию и параметрической на-

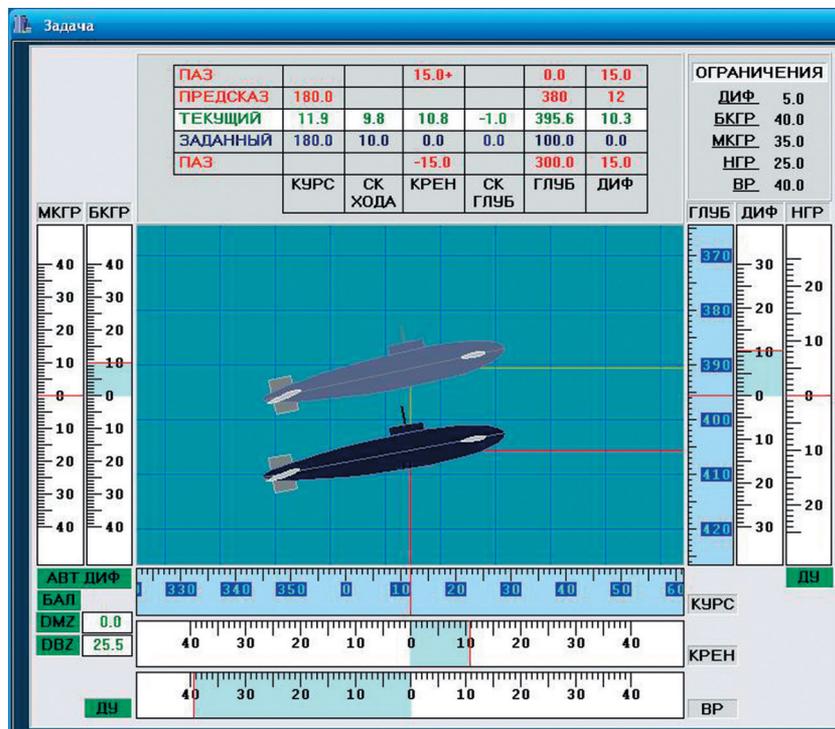


СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

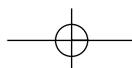
(см. статью Борисова В.Г., Даниловой С.К., Чинакала В.О. на с. 79)



Видеокадр ручного управления морским подвижным объектом



Видеокадр автоматического управления морским подвижным объектом



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