

УДК 004.386

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ТРЕНАЖЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ КОМАНДЫ ХОДОВОГО МОСТИКА

**Каштальян П. В.**, аспирант кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии;

**Рожков С. А.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, ORCID: 0000-0002-1662-004X

*В статье рассмотрена проблема повышения безопасности морских перевозок за счет повышения качества тренажерной подготовки команды ходового мостика. Проведен критический анализ модельных курсов ИМО и их применимости к задачам тренажерной подготовки судоводителей. Классифицированы основные задачи судовождения, показан их формализованный вид и оптимальное решение. Предложена функция вероятности безаварийного плавания в качестве критерия оценки компетентности судоводителя. Определена структура комплекса-симулятора, допускающего оптимальное решение задачи тренажерной подготовки команды ходового мостика.*

**Ключевые слова:** тренажерная подготовка, команда ходового мостика, предварительная прокладка, оптимальный маршрут, тренажерный комплекс, сценарий упражнения, принятие решения, оптимальное управление.

DOI: 10.33815/2313-4763.2018.2.19.31–43

**Введение.** Несмотря на существенный спад в мировой экономике за последнее десятилетие, морской транспорт остается лидером по объемам и дешевизне грузоперевозок. Безопасность судоходства остается актуальной проблемой сегодняшнего дня, а «человеческий фактор» - основной причиной аварий и катастроф на транспорте. Наиболее катастрофические последствия имеют ошибки штурманского состава, на который возложены обязанности по безопасному управлению судном.

Одним из методов снижения вероятности ошибок судоводителей является их тренажерная подготовка в условиях современных центров переподготовки плавсостава. Однако, несмотря на значительные усилия и ресурсы, затрачиваемые на программные, технические и организационные средства подготовки судоводителей, аварийные ситуации не редки на флоте.

Такая ситуация требует повышения квалификации штурманского состава, их ознакомленности с функционалом и ограничениями судового оборудования, выработки слаженности действий команды, члены которой видят друг друга, возможно, первый раз в жизни.

**Актуальность исследований.** На сегодняшний день существует множество различных программных и технических средств, обеспечивающих обучение и закрепление знаний и навыков экипажей. Основой этих систем являются разнообразные тренажеры и симуляторы [1], различающиеся по назначению от моделирования ходового мостика до моделирования работы с отдельными агрегатами.

Лишь полноразмерные тренажерные комплексы удовлетворяют требованиям украинского [2] и международного законодательства по отработке взаимодействия членов команды ходового мостика и судовых систем, приближенно к реальному объекту (судну).

На таких тренажерных комплексах может решаться широкий круг задач, от непосредственного судовождения в ситуации расхождения судов [1], маневрирование при поиске и спасении, до задач полного прохождения маршрута.

На сегодняшний день существует ряд специализированных курсов по подготовке членов команды ходового мостика: Maritime Resources Management, Bridge Team Resources Management, Master-Pilot Relations Course, управление крупнотоннажными судами и т.п. Большинство из них базируются на модельных курсах, разработанных Международной морской организацией (ИМО) с целью стандартизации и унификации подготовки плавсостава в соответствии с Международной конвенцией по подготовке

и дипломированию моряков и несению вахты 1978/ 2010. Например, модельный курс 1.22 «Ship Simulator and Bridge Teamwork» [3] выдвигает требования к оборудованию и персоналу, проводящему обучение штурманского состава. Помимо технических навыков управления судном, в цели подготовки также входит умение грамотно организовывать несение вахты и взаимодействие всех задействованных в этом лиц [4]. Однако этот и аналогичные модельные курсы не предписывают детальной процедуры оценивания компетентности учащегося, как и того, по каким принципам инструктор должен осуществлять генерацию сценариев.

Плечи предварительной прокладки маршрута Гдыня – Валлвик универсального сухогруза «НС Веа-Luna», выполненной навигационным помощником капитана, показаны на рис. 1.

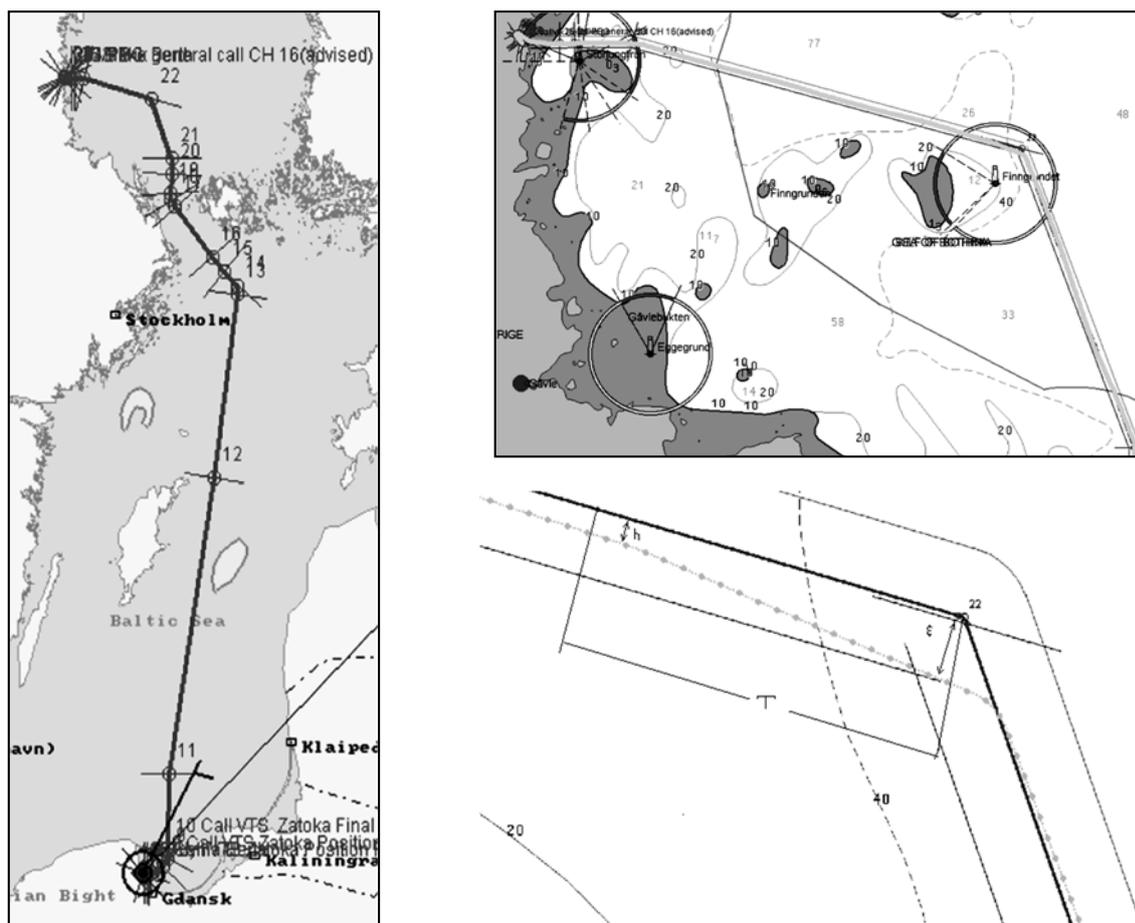


Рисунок 1 – Отображение маршрута судна в программной среде Transas ECDIS

Как можно видеть, реальная траектория судна не совпадает с линиями генеральных курсов предварительной прокладки. Из этого можно сделать вывод, что предварительная прокладка не была оптимальной, и/или вахтенный помощник капитана совершил промах в расчете маневра. Также вероятно, что расчет был произведен таким образом по причине дополнительных внешних возмущений (волнение моря, расхождение с другими судами или плавучей навигационной опасностью и т.п.).

Функционал ПО ЭКНИС TRASAS NAVI-SAILOR 4000 позволяет записывать траектории и маршруты реальных судов, наличие АИС – целей в пределах действия УКВ-частот. При наличии подключения, система может дополнительно фиксировать действие ветра, отклонение пера руля, крен судна и другую навигационную информацию. Анализ данной информации позволяет изучать поведение судоводителя при тренажерной подготовке команды ходового мостика.

Таким образом, имеется аппаратно-программный комплекс, который дает возможность оценивать базовую компетентность судоводителя/инструктора путем

построения оптимального маршрута и проводки судна по нему. Следующий уровень тренажерной подготовки должен проводиться с использованием полноразмерных симуляторов и взаимодействия обучаемых в качестве команды ходового мостика при условиях, максимально приближенных к реальным [5].

**Задачей исследования** является обоснование и развитие методов и средств тренажерной подготовки команды ходового мостика с учетом требований по снижению аварийности морских перевозок.

**Теоретические исследования.** Прежде всего следует разделить классы задач на задачу базовой подготовки судоводителей, которая используется при несении самостоятельной вахты и задачу коллективного несения вахты в усиленном составе команды мостика (капитан, лоцман, вахтенный помощник, впередсмотрящий, рулевой и т.д.). Первая задача может производиться обучаемым единолично с использованием малых тренажеров/симуляторов под контролем инструктора и нацелена на приобретение навыков работы с ЭКНИС, решения задач на маневренном планшете, освоение особенностей поведения конкретной математической модели судна. Вторая задача должна выполняться на тренажерном комплексе с полной визуализацией в составе команды ходового мостика и имеет задачей приобретение навыков согласованной работы и ее организации каждым в меру его должности.

Подготовку на тренажерном комплексе можно рассматривать как модель информационно-управляющей системы судна с ходового мостика. При этом следует учитывать, что независимо от уровня автоматизации судна, ответственность за результаты реализации управления несут члены команды ходового мостика, а ответственность за организацию работы остается за капитаном [6]. Поэтому далее будем рассматривать двойственную задачу: базовую компетентность штурмана и его способность к слаженной работе как члена команды ходового мостика данного типа судна (табл. 1).

Таблица 1 – Уровни тренажерной подготовки судоводителей

<i>Компетентность</i>	<i>«Базовая»</i>	<i>«Командная»</i>		
Оборудование	Малый тренажер/симулятор	Полноразмерный тренажерный комплекс		
Целевая функция	«Единоличная» вахта	Работа в команде	Организация несения вахт	Взаимодействие с лоцманом и пр.

Модель динамики принятия решения судоводителем, как оператором, принято описывать динамической системой [7]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= A\mathbf{x} + B\mathbf{u} + Q\mathbf{g} \\ \mathbf{y} &= C\mathbf{x} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где вектор состояния  $\mathbf{x}$  описывает развитие процесса принятия решения. Управление  $\mathbf{u}$  и возмущение  $\mathbf{g}$  описывают входные воздействия, и вектор  $\mathbf{y}$  описывает уровень готовности решения. Матрицы  $A, B, C, Q$  описывают линейную динамическую систему в пространстве состояний.

Рассматривая векторную модель, следует учитывать сложные решения, имеющие несколько связанных компонент. Возможно такой подход отличается от общепринятого [8], но он, на наш взгляд, более перспективный. При этом следует учитывать, что в модели (1) присутствуют запаздывания. Это, во-первых, задержка восприятия информации  $\tau_u$  и задержка выполнения решения  $\tau_c$ . Следовательно, для  $i$ -го члена команды ходового мостика получаем модель:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i(t) &= A_i\mathbf{x}_i(t) + B_i\mathbf{u}_i(t + \tau_{ui}) + Q_i\mathbf{g}_i(t) \\ \mathbf{y}_i(t + \tau_{ci}) &= C_i\mathbf{x}_i(t) \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

При принятии решения необходимо учитывать уровень ответственности принимаемого решения  $y_i^*$ :

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_i x_i(t) + B_i u_i(t + \tau_{ui}) + Q_i g_i(t) \\ y_i(t + \tau_{ci}) &= C_i x_i(t) \\ y_{ir} &= \begin{cases} y_{ri} & \text{if } a(y_i, y_i^*) \geq 0 \\ \mathbf{0} & \text{if } a(y_i, y_i^*) < 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Расстояние между векторами определяется метрикой  $a(y_1, y_2)$ , принятой в данной задаче. Модель динамики выполнения шага управления командой ходового мостика представляет собой последовательность операций принятия и выполнения решения:

$$\begin{aligned} & y_{1r}, \dots, y_{rn}; \\ & u_1, g_1, \dots, g_n \end{aligned} \quad (4)$$

При этом план формирования управления в  $j$ -ой ситуации определяется последовательностью коммутации канала передачи информации:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \vdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \vdots & K_{2n} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad K_{ij} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \vdots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \vdots & k_{2m} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ k_{m1} & k_{m2} & \vdots & k_{mm} \end{pmatrix}, \quad k_{ij} \in \{0,1\}. \quad (5)$$

Таким образом, задав последовательности принятия решения членами команды ходового мостика можно получить ожидаемое время реакции при заданных уровнях ответственности принимаемого решения. В свою очередь, уровень принятия решения определяется ожидаемыми потерями или средним риском решения. Так, в ситуации расхождения судов, могут быть приняты четыре решения:  $x_1$  – руль на левый борт с вероятностью  $P_1$ ,  $x_2$  – руль на правый борт с вероятностью  $P_2$ ,  $x_3$  – увеличить ход с вероятностью  $P_3$ ,  $x_4$  – уменьшить ход с вероятностью  $P_4$ . При этом, решение  $x_i$  определяет затраты  $C_i$  с вероятностью  $P_i$ . Следовательно, ожидаемые потери получаем как математическое ожидание [12]:

$$\bar{C} = M\{C\} = \sum_{i=1}^4 C_i P_i. \quad (6)$$

Таким образом, мы оцениваем ожидаемый риск выполнения маневра, который не больше максимального и может служить оценкой качества решений судоводителя.

Оптимальность решения, принимаемого командой ходового мостика по ситуации  $u_1$  и возмущениям  $g_1, \dots, g_n$ , оценивается ожидаемыми затратами и, собственно решение должно достигаться как решение оптимизационной задачи нахождения решения с минимальным ожидаемым риском:

$$y_1^*, y_1^*, \dots, y_1^* \xrightarrow{u_1, g_1, \dots, g_n} \min \bar{C}. \quad (7)$$

После серии испытаний, оценив вероятности принятия решений, можем определить ожидаемый риск, как оценку качества принимаемых решений судоводителем. Различные условия плавания сопровождаются различными рисками, что приводит к определению уровня ответственности решения  $y_i^*$ , для ожидаемых затрат  $C$  и при максимальных затратах  $C_{\max}$ :

$$y_i^* = \frac{\bar{C}}{C_{\max}}. \quad (8)$$

Тогда для одной компоненты решения оценка времени принятия решения  $t_n$  может быть определена по максимальному модулю корня  $\lambda_m$ . Учитывая, что  $T_i = 1/\lambda_{mi}$  имеем:

$$W_i = \frac{1}{T_i p + 1} \rightarrow x_i(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{T_i}}\right) \rightarrow t_{ri} = T_i \ln \left(1 - \frac{\bar{C}}{C_{\max}}\right). \quad (9)$$

Так как постоянная времени и время задержки не зависят от уровня ответственности решения, можно считать их характеристиками данного члена команды. Эти характеристики определяются в простых экспериментах определения времени реакции на известные сигналы. Таким образом, получаем модель поведения членов команды ходового мостика в зависимости от рисков принятия решения и внешних возмущений, которые следует отнести к входным управлениям.

На рис. 2. показана функция затрат относительно планируемого маршрута, которую предварительно необходимо построить при подготовке задачи.

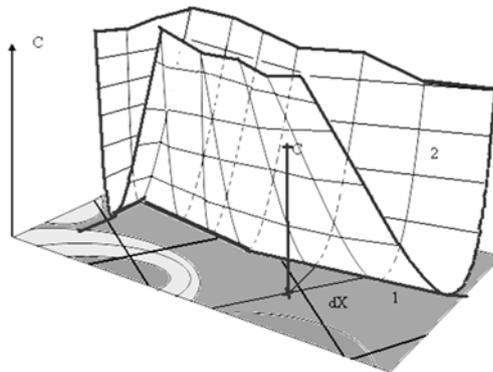


Рисунок 2 – Функция затрат по предварительной прокладке маршрута

Следует учитывать, что при построении функции затрат необходимо соотносить отклонения от предварительной прокладки и условия плавания. Поэтому отклонение  $dX$  будет вызывать различные затраты  $C$  на глубокой воде и в узкости. Задание функции затрат свободное, но наиболее рационально использовать ветви квадратических функций, различные для левого отклонения  $h > 0$  и правого отклонения  $h < 0$ :

$$C(h) = \left. \begin{array}{l} C_0 + r_+ dh^2 \quad \text{if } h > 0 \\ C_0 + r_- dh^2 \quad \text{if } h < 0 \end{array} \right\} \dots \quad (10)$$

Оценка риска и вероятность безаварийного плавания  $P$  может производиться на основе анализа статистических данных прохождения судами данной акватории, либо путем аналитических вычислений [10]:

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{D^2}{M^2}\right), \quad (11)$$

где  $D$  – минимальное расстояние от корпуса судна до ближайшей навигационной опасности с учетом траектории движения и положения корпуса судна на ней;  $M$  – радиальная среднеквадратическая погрешность места судна при подходе к опасности. Оценка отклонений от оптимальных траекторий, которые могут быть и несущественными, должна происходить с учетом текущего трафика и внешних возмущений.

Второй особенностью задачи подготовки судоводителя является ее сложность [9]. Рассмотрим формирование управления для команды ходового мостика из четырех человек. В этом случае подача команды и исполнение команды будут задержаны последовательно четырьмя динамическими системами (3). Поэтому управление принципиально строится как оптимальное с прогнозом, анализом модели и регулированием. Причем, если функции прогноза и анализа модели отнесены к старшим в команде ходового мостика, то регулирование выполняется как стабилизация указанных в команде параметров. Данное разделение не зависит от класса автоматизации судна. Таким образом, анализируя деятельность команды ходового мостика с целью формирования условий наилучшей подготовки, необходимо рассматривать решение задачи оптимального управления с несимметричной квадратической целевой функцией и заданными ограничениями. Такая задача предусматривает наличие начальной и конечной точки маршрута или траектории в случае заданий проводки, и вырождается в дифференциальную игру с неопределенным противником в случае задачи расхождения. Не менее сложной является задача маневрирования в акватории, где требуется учитывать динамические свойства судна и особенности его циркуляции.

Для первого случая управление связано с задачей оптимального управления динамическим объектом с формированием управления сложной динамической системой [11]:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_n^*(t), \eta^*(t) &\rightarrow \min J(\dot{\eta}(t), \eta(t), \mathbf{u}(t)); \\ \dot{\eta} &= A\eta + B\mathbf{u} + Q\mathbf{g} \quad ; \\ \eta(t_0) &= \eta_0, \quad \eta(t_1) = \eta_1 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_1(t) &= A_1\mathbf{x}_1(t) + B_1\mathbf{u}_1(t + \tau_{u1}) + Q_1\mathbf{g}_1(t) \\ \mathbf{y}_1(t + \tau_{c1}) &= C_1\mathbf{x}_1(t) \\ \mathbf{u}_{2r} &= \begin{cases} \mathbf{y}_{r1} & \text{if } a(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}^*_{1}) \geq 0 \\ \mathbf{0} & \text{if } a(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}^*_{1}) < 0 \end{cases} \\ \vdots & \\ \dot{\mathbf{x}}_n(t) &= A_n\mathbf{x}_n(t) + B_n\mathbf{u}_{n-1}(t + \tau_{un}) + Q_n\mathbf{g}_n(t) \\ \mathbf{y}_n(t + \tau_{cn}) &= C_n\mathbf{x}_n(t) \\ \eta_{ir} &= \begin{cases} \mathbf{y}_m & \text{if } a(\mathbf{y}_n, \mathbf{y}^*_n) \geq 0 \\ \mathbf{0} & \text{if } a(\mathbf{y}_n, \mathbf{y}^*_n) < 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

При этом должны выполняться ограничения мореплавания:

$$\left. \begin{aligned} \eta(t) &\notin \varphi_+(\boldsymbol{\eta}) \\ \eta(t) &\notin \varphi_-(\boldsymbol{\eta}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Значительные и нерегулярные запаздывания делают сложной проблему формирования обратной связи, и как следствие, решается задача оптимального быстрогодействия или оптимизация по затратам управления [12].

Командой ходового мостика решаются следующие основные оптимизационные задачи:

1. *Задача прокладки маршрута – задача минимизации рисков.* Для множества допустимых значений координаты судна  $x$  и множества ограничений, заданных условиями плавания  $\varphi(x)$  ставится задача определения множества узлов  $(x_0, x_1)_i$ , доставляющих минимум риска  $C$ :

$$\begin{aligned}
 (x_0^*, x_1^*)_i &\xrightarrow{i=1, n} \min \bar{C}; \\
 x &\in X_d; \\
 X_d \cap \varphi(x) &= \emptyset
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

2. *Задача плановой смены курса* – изопериметрическая задача с выбранным ресурсом управления [13]. Здесь цель и ограничения в виде функционала, что приводит к задаче с ограничением типа равенства и применение метода Лагранжа. В этом случае для функционала цели и ограничений:

$$\begin{aligned}
 J\{x(t), \dot{x}(t), t\} &= \int_{t_0}^{t_1} F(x, \dot{x}, t) dt \\
 I\{x(t), \dot{x}(t), t\} &= \int_{t_0}^{t_1} \psi(x, \dot{x}, t) dt = 0
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

генерируется функционал Лагранжа:

$$\begin{aligned}
 \tilde{L}\{x(t), \dot{x}(t), t\} &= \lambda_0 \int_{t_0}^{t_1} F(x, \dot{x}, t) dt + \lambda_1 \int_{t_0}^{t_1} \psi(x, \dot{x}, t) dt = \\
 &= \int_{t_0}^{t_1} \{\lambda_0 F(x, \dot{x}, t) + \lambda_1 \psi(x, \dot{x}, t)\} dt = \int_{t_0}^{t_1} L\{\lambda, x, \dot{x}, t\} dt
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Необходимое условие оптимума содержит требование нулевой вариации функционала Лагранжа  $\delta L(\lambda, x, \dot{x}, t) = 0, t \in (t_0, t_1)$ , что дает пару условий:

$$\begin{aligned}
 \delta J\{x(t), \dot{x}(t), t\}_x &= 0 \\
 \delta J\{x(t), \dot{x}(t), t\}_\lambda &= 0 \Leftrightarrow \int_{t_0}^{t_1} \psi(x, \dot{x}, t) dt = 0
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Решение полученной системы с учетом граничных условий позволяет найти экстремаль. В случае циркуляции изменяется курсовой угол  $\varphi$ . С учетом математической модели судна для изменения курсового угла на  $\Delta\varphi$  можем записать:

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta\varphi &= \int_0^T \frac{d\varphi}{dt} dt \\
 C &= \int_0^T \left( \frac{d^2\varphi}{dt^2} + a_1 \frac{d\varphi}{dt} \right) dt
 \end{aligned} \right\}
 \tag{19}$$

Следовательно, функционал Лагранжа, в этом случае, имеет вид:

$$L = \int_0^T F(\varphi, \dot{\varphi}, C_0, \lambda) dt = \int_0^T \left[ \left( \frac{d\varphi}{dt} + C_0 \right)^2 + \lambda_0 \varphi \right] dt
 \tag{20}$$

После использования условия Эйлера получаем:

$$\begin{aligned}
 \varphi(t) &= \frac{1}{4} t^2 + c_1 t + c_2; \\
 \varphi(0) &= 0 \\
 \varphi(T) &= \Delta\varphi
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Таким образом, получаем траекторию, минимизирующую затраты, входящие в оценку рисков.

3. *Задача уклонения* (задача Понтрягина) – оптимальное быстродействие линейной системы [15, 16]. В этой задаче требуется перевести линейную систему из одного состояния в другое за кратчайшее время. Эта задача ставится в общем случае как задача Лагранжа:

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, t^*) \rightarrow \inf J(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) &= \int_{t_0}^{t_1} f_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) dt, \\
 \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} &= \mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t); \quad \dim \mathbf{x} = \dim \mathbf{f} = n \\
 \mathbf{x}(t_0) &= \mathbf{x}_0, \quad \mathbf{x}(t_1) = \mathbf{x}_1
 \end{aligned} \tag{22}$$

Целевой функционал обладает выпуклыми свойствами (строго выпуклый, т.е. квазирегулярен или регулярен) и требует от динамической системы ограничений полной управляемости. Таким образом, получаем задачу выпуклого программирования. Условия выпуклости позволяют использовать теорему Куна-Таккера для лагранжиана:

$$L(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}, \lambda^*) \leq L(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*) \leq L(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*, \lambda^*) . \tag{23}$$

Учитывая идентичность экстремальных свойств функции Лагранжа и функции Гамильтона, запишем условие Куна-Таккера в терминах функции Гамильтона:

$$H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}, \lambda^*) \leq H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*) \leq H(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*, \lambda^*) . \tag{24}$$

Далее формируем прямую и двойственную задачу с разделением переменных состояния и управления. Условие выпуклости для определения трех неизвестных дает четыре связи. Следовательно, возможно упростить задачу, исключив «неудобные» связи:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} = -\frac{d\lambda}{dt} \\ \frac{\partial H}{\partial \lambda} = \frac{d\mathbf{x}}{dt} \\ \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Принцип} \\ \text{максимума} \\ \text{Понтрягина} \end{array} \left. \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} = -\frac{d\lambda}{dt} \\ \mathbf{u}^* \rightarrow_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} \max H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*) \\ \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0} \end{array} \right\} \\
 \left. \begin{array}{l} \mathbf{x}^* \rightarrow_{\mathbf{u}=\mathbf{u}^*} \min H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*) \\ \mathbf{u}^* \rightarrow_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} \max H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Принцип} \\ \text{Беллмана} \end{array} \left. \begin{array}{l} \mathbf{x}^* \rightarrow_{\mathbf{u}=\mathbf{u}^*} \min H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*) \\ \frac{\partial H}{\partial \lambda} = \frac{d\mathbf{x}}{dt} \\ \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0} \end{array} \right\} \tag{25}$$

Таким образом, получили принцип максимума Понтрягина на оптимальной прокладке, где при оптимальном управлении функция Гамильтона достигает своего максимума. Так как задача сведена к стандартной задаче оптимального быстродействия линейной системы, используем известное решение [16] для описания поворота на циркуляции на угол  $\varphi_0$ :

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = k_g u; \quad |u(t)| \leq 1; \quad u_1^* = \begin{cases} \text{if } t \in (0, t_1) & u^* = -u_m \\ \text{if } t \in (t_1, t_k) & u^* = +u_m \end{cases}, \quad \left. \begin{array}{l} t_1 = \sqrt{\frac{\varphi_0}{k_g}} \\ t_2 = 2\sqrt{\frac{\varphi_0}{k_g}} \end{array} \right\} . \tag{26}$$

На рис. 3, а приведены графики скорости поворота 1 и управления 2. На рис. 3, б приведена траектория судна при оптимальном по быстродействию управлении.

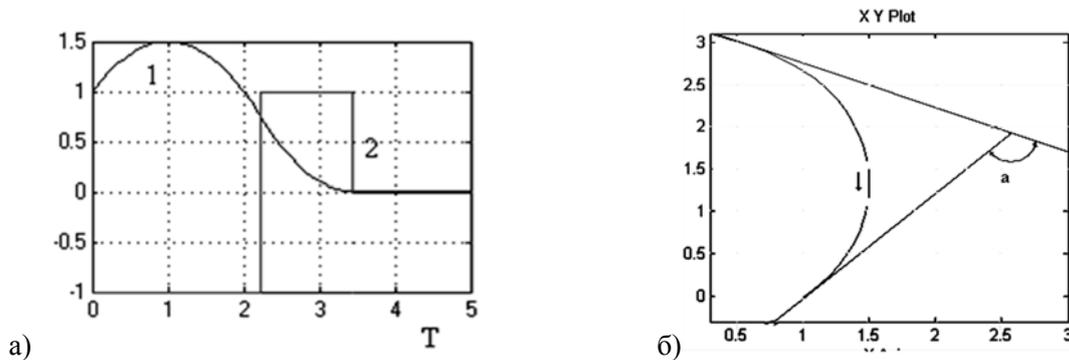


Рисунок 3 – Графики управления и траектория судна при управлении, оптимальном по быстродействию: а) график скорости поворота 1, и управления 2; б) траектории циркуляции с минимальным временем

Таким образом, задача судоводителя при экстренной смене курса весьма сложна и требует определения трех моментов: времени перекладки руля, времени начала циркуляции и времени снятия управления (одерживание).

4. *Задача удержания на курсе* (задача Беллмана) [17], предполагает для линейной системы минимизацию квадратичной функции:

$$I(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^T [\varphi^T(t)P(t)\varphi(t) + \mathbf{u}^T(t)Q(t)\mathbf{u}(t)]dt + \varphi(T)^T R\varphi(T), \quad (27)$$

где матрицы положительно определены. Используя условие стационарности по управлению находим вид оптимального управления:

$$\frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0} \rightarrow B^T(C\varphi + C^T\varphi) + 2Q\mathbf{u}^* = 0 \rightarrow \mathbf{u}^* = -Q^{-1}B^T C\varphi. \quad (28)$$

Полученное выражение позволяет находить оптимальное управление для каждого текущего  $y(t)$ , однако матрица  $C(t)$  неизвестна и находится из решения уравнения Рикатти:

$$\frac{dC}{dt} + CA + A^T C - CBQ^{-1}B^T C + P = 0. \quad (29)$$

Таким образом, решением этой задачи является адаптивное пропорциональное регулирование.

5. *Задача расхождения* – игра с минимизацией риска и неопределенной стратегией противника. Здесь минимизируется риск  $C$  принятия решения при ожидаемых действиях судна, представляющего опасность. Реализация стратегии минимизации риска приводит к последовательности шагов, реализующих оптимально-безопасную траекторию.

Опираясь на рассмотренные выше задачи, можно сформировать структуру тренажерного комплекса для подготовки команды ходового мостика (рис. 4).

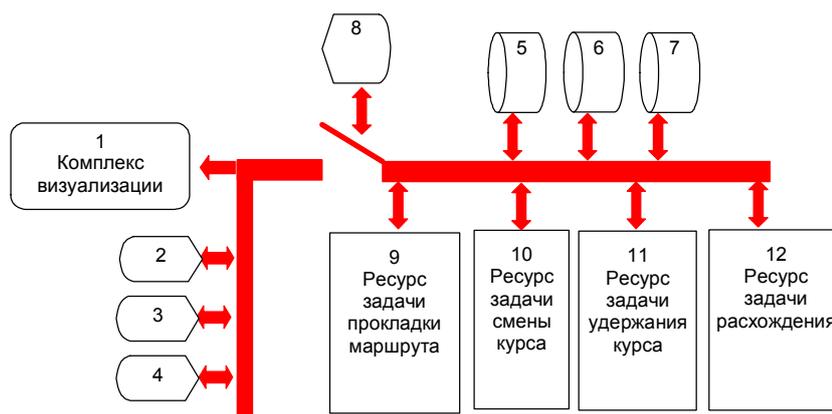


Рисунок 4 – Структура тренажерного комплекса команды ходового мостика

Тренажерный комплекс состоит из: комплекса визуализации 1, где моделируется внешняя ситуация, рабочих мест членов команды ходового мостика 2 – 4, базы моделей динамики судов 5, штурманской базы данных 6, базы моделей возмущений 7 и рабочего места инструктора 8.

Для обеспечения основных задач судовождения, как показано ранее, необходимо различное математическое обеспечение. Задача прокладки маршрута 9 требует не только штурманского комплекта и легенды, но и подготовленной статистики прохождения маршрута, что позволяет судоводителю оценить как основной критерий именно риски. Задача удержания на заданном курсе требует дополнительно использования динамической модели судна, что формируется отдельным модулем 5. Более сложная задача расхождения судов требует не только работы всей команды ходового мостика, но и искусства судоводителя. Данная задача поддерживается отдельным программным обеспечением 12. Необходимые массивы штурманского обеспечения, моделей судов и моделей возмущений содержатся в базах 5 – 7. Выделяется место инструктора с его системой оценок и управлений 8. Действия инструктора практически не имеют ограничений, а правила оценки формируются по его экспертному мнению. Соответственно, для соблюдения адекватности сценария реальным условиям плавания, данный модуль требует доработки.

**Выводы.** Тренажерная подготовка команды ходового мостика является существенным средством к снижению влияния «человеческого фактора» на аварийность водного транспорта.

Функционал существующих программно-аппаратных средств тренажерных комплексов в полной мере удовлетворяет требованиям модельных курсов ИМО и украинского законодательства. Однако, эти руководящие документы не предписывают подробных требований к созданию сценариев упражнений и принципов оценки обучаемых. Такое положение не позволяет повысить уровень автоматизации тренажерной подготовки команды ходового мостика и обеспечить автоматическую объективную оценку компетентности.

Предложен метод оценки показателей компетентности команды ходового мостика, основанный на использовании функции вероятности безопасного плавания и минимального риска. Представленный формализованный вид основных навигационных задач позволяет рассчитывать функцию риска для различных сценариев и строить функцию предполагаемых затрат на каждом участке предварительного маршрута.

Существующая структура тренажерных комплексов подготовки команд ходового мостика не позволяет в полной мере использовать ресурс заложенных в них баз и перегружает инструктора. Таким образом она может быть пересмотрена на основании предложенных решений.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. TRANSAS Navi-Planner 4000. User manual. 2013. –234 p.
2. Наказ Міністерства інфраструктури України №567 від 07.10.2014 «Про затвердження вимог до тренажерного та іншого обладнання, призначеного для підготовки та перевірки знань осіб командного складу та суднової команди». Режим доступу : [www.zakon3.rada.gov.ua](http://www.zakon3.rada.gov.ua).
3. IMO model course 1.22 Ship Simulator and Bridge Team Work. IMO, London, 2002. – 70 p.
4. IMO model course 7.03 Officer in charge of a navigational watch. IMO, London, 2014. – 275 p.
5. Наказ Міністерства інфраструктури України №491 від 07.10.2014 «Вимоги до тренажерного та іншого обладнання, призначеного для підготовки та перевірки знань судноводіїв на повномасштабних навігаційних тренажерах з візуалізацією». Режим доступу : [www.zakon3.rada.gov.ua](http://www.zakon3.rada.gov.ua).
6. Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року (консолідований текст з манільськими поправками). – К. : ТОВ «ВПК «Експрес-Поліграф»», 2010. – 566 с.
7. Павловская О. О. Алгоритм определения параметров математической модели механика-водителя, управляющего криволинейным движением быстроходной гусеничной машины / О. О. Павловская, С. В. Кондаков // Вестник ЮУрГУ. – 2012. – № 3. – С. 43–47.
8. Weir D. H. Models for Steering Control of Motor Vehicles / D. H. Weir, D. T. McRuer // Proc. 4th Annual NASA, 1968. – 192 с.
9. Устюжанин А. Д. Динамическая идентификация и оценивание характеристик человека-оператора в системах «человек–машина» / Устюжанин А. Д., Пупков К. А. – М. : Изд. РУДН, 2011. –180с.
10. Мореходные таблицы МТ-2000. Под ред. Емец К.А. СПб: ЦКФ ВМФ, 2002. – 585с.
11. Петров Ю. П. Оптимальное управление движением транспортных средств. / Ю. П. Петров. – Л. : Энергия, 1969. – 96 с.
12. T. I. Fossen. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. – John Wiley & Sons Ltd, 2011. – 575p.
13. Красовский Н. Н. Теория управления движением / Н. Н. Красовский. – М. : Наука, 1968. – 476 с.
14. Петров Ю. П. Оптимальные регуляторы судовых силовых установок (теоретические основы) / Ю. П. Петров. – Л. : Судостроение, 1966. – 118 с.
15. Петров Ю. П. Синтез оптимальных систем управления при неполностью известных возмущающих силах / Ю. П. Петров. –Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. – 292 с.
16. Понтрягин Л.С. и др. Математическая теория оптимальных процессов. – М. : Наука, 1969. – 384 с.
17. Болтянский В. Г. Математические методы оптимального управления / В. Г. Болтянский. – М. : Наука, 1969. – 408 с.
18. Рей У. Методы управления технологическими процессами / У. Рей. – М. : Мир, 1983. – 368 с.

## REFERENCES

1. TRANSAS Navi-Planner 4000 (2013). User manual.
2. Pro zatverdzhennya vimog do trenazhernogo ta inshogo oblalnannya, pryznachenogo dlya pidgotovki ta perevirki znan` osib komandnogo skladu ta sudnovoi komandi : *Nakaz Ministerstva infrastrukturi Ukraini №567 vid 07.10.2014*. Retrived from: [www.zakon3.rada.gov.ua](http://www.zakon3.rada.gov.ua).
3. IMO model course 1.22 Ship Simulator and Bridge Team Work . IMO, London, 2002. – 70p.

4. IMO model course 7.03 (2014). Officer in charge of a navigational watch. London : IMO.
5. Vimogi do trenazhernogo ta inshogo obladnannya, priznachenogo dlya pidgotovki ta perevirki znan` sudnovodiiv na povnomasshtabnix navigacijnix trenazherax z vizualizacziyu : *Nakaz Ministerstva infrastrukturi Ukraini №491 vid 07.10.2014*. Retrived from: [www.zakon3.rada.gov.ua](http://www.zakon3.rada.gov.ua).
6. Mizhnarodna konvencziya pro pidgotovku i diplomuvannya moryakiv ta nesennya vaxti 1978 roku (konsolidovaniy tekst z manil`s`kimi popravkami). (2010). Kyev : TOV «VPK «Ekspres-Poligraf»».
7. Pavlovskaya, O. O, Kondakov, S. V. (2012). Algoritm opredeleniya parametrov matematicheskoy modeli mexanika-voditelya, upravlyayushhego krivolinejny`m dvizheniem by`strohodnoj gusenichnoj mashiny`. *Vestnik YuUrGU*, 3, 43 –47.
8. Weir D.H., McRuer D.T. (1968). Models for Steering Control of Motor Vehicles. Proc. 4th Annual NASA.
9. Ustyuzhanin, A. D., Pupkov, K. A. (2011). *Dinamicheskaya identifikaciya i ocenivanie xarakteristik cheloveka-operatora v sistemax «chelovek–mashina»*. Moskva : Izd. RUDN.
10. *Morexodny`e tablicy` MT-2000*. (2002). Pod red. Emecz K.A. Sankt Peterburg : CzKF VMF.
11. Petrov Yu. P. (1969). *Optimal`noe upravlenie dvizheniem transportny`x sredstv*. Leningrad : Energiya.
12. Fossen T. I. (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Wiley & Sons Ltd.
13. Krasovskij N. N. (1968). *Teoriya upravleniya dvizheniem*. Moskva : Nauka.
14. Petrov Yu. P. (1966). *Optimal`ny`e regulatory` sudovy`x silovy`x ustanovok (teoreticheskie osnovy`)*. Leningrad: Sudostroenie.
15. Petrov Yu. P. (1987). *Sintez optimal`ny`x sistem upravleniya pri nepolnost`yu izvestny`x vozmushhayushhix silax*. Leningrad: Izd-vo Leningr. un-ta.
16. Pontryagin L.S. i dr. (1969). *Matematicheskaya teoriya optimal`ny`x processov*. Moskva : Nauka.
17. Boltyanskij V.G. (1969). *Matematicheskie metody` optimal`nogo upravleniya*. Moskva : Nauka.
18. Rej U. (1983). *Metody` upravleniya texnologicheskimi processami*. Moskva : Mir.

**Каштальян П. В., Рожков С. О. МЕТОДИ І ЗАСОБИ ТРЕНАЖЕРНОЇ ПІДГОТОВКИ КОМАНДИ ХОДОВОГО МІСТКА**

*В статті розглянута проблема підвищення безпеки морських перевезень за рахунок покращення якості тренажерної підготовки судноводіїв. Проведено критичний аналіз модельних курсів ІМО та їх застосування до задач тренажерної підготовки судноводіїв. Класифіковано основні задачі судноводіння, показано їх формалізований вигляд та оптимальне рішення. Запропоновано функцію вірогідності безаварійного плавання в якості критерію оцінки компетентності судноводія. Визначено структуру комплексу, який припускає оптимальне рішення задач тренажерної підготовки команди ходового містка.*

**Ключові слова:** *тренажерна підготовка, команда ходового містка, попередня прокладка, оптимальний маршрут, тренажерний комплекс, сценарій вправи, прийняття рішень, оптимальне управління.*

**Kashtalyan P. V., Rozhkov S. A. THE METHODS AND MEANS OF BRIDGE TEAM SIMULATOR TRAINING**

*The main source of incidents on merchant fleet is the «human factor» of bridge team. The most efficient solution to decrease its influence is to provide navigators with an effective simulator training. It is used both to achieve the basic knowledge and skills of navigator and to learn the members of bridge team on how to work and organize the cooperation on bridge effectively.*

*The IMO model courses and Ukrainian legislation acts regarding the simulator training of bridge team are critically overviewed in the current article. It is shown that there are no clearly defined algorithms of exercise scenario generation and principles of an unbiased performance assessment in these documents.*

*We reviewed the main navigational tasks of a bridge team during the voyage and proposed their formalized form: passage planning, a planned alteration of heading, deviation task, course keeping and collision avoidance maneuver. As a result we assume that the safe sailing probability function can be used as an effective criterion of navigator's competence who is a leader of bridge team.*

*The main navigational tasks were classified, their formalized form and solutions represented. A structure of bridge team simulator training complex is defined. It shows that the full functionality of databases cannot be used and no knowledge bases are included. Moreover, all the tasks are generated and controlled by the instructor this is why he is overloaded and cannot effectively monitor the bridge team members' cooperation. His actions are not limited therefore, the exercise can appear not adequate to reality and his assessment methods to be biased.*

*Such a situation requires the structure of training complex to be revised. A suggested formalized function of risk and safe sailing probability can be used as a basic principle of both exercise automated generation and students' performance assessment criterion.*

*The methods shown in this paper allow us to analyze the real voyages and select optimal routes on a specific area as well. A decision-making support system can be designed based on risk assessment and a safe sailing probability function.*

**Keywords:** *simulator training, bridge team, preliminary route plan, optimal route, Full-mission bridge, exercise scenario, decision making, optimal control.*

© Каштальян П. В., Рожков С. О.

Статтю прийнято  
до редакції 17.10.18