

О необходимости интеллект-дополнения человеческого элемента транспортной системы

В.В. ДЕМЬЯНОВ, профессор

В статье построена модель влияния человеческого фактора (ЧФ) на управление транспортной системой на примере морских судовых систем. Эта модель призвана решить вопросы: какими должны быть точность определения дистанции от борта до опасного объекта, скорости их сближения и быстрота решения задачи их встречи, выполняемой неким «идеальным наблюдателем» для того, чтобы заданная надежность безаварийной швартовки судна была, например, 1 навал на 100 швартовок или 1 — на 1000 и т.д. (то есть коэффициент готовности K_r к безаварийности 0,99 или 0,999 и т.д.).

Используя глазомерный способ оценки дистанций и рассчитывая в уме момент встречи борта с тем или иным препятствием, человек не может иметь коэффициент готовности K_r выше 0,9. Для $K_r = 0,999$ необходима сантиметровая точность определения расстояний и скорость расчета момента столкновения — доли секунды. Людям это недоступно. Поэтому, пока они берутся за это «вручную», игнорируя достижения кибернетики, мы обречены иметь каждую десятую швартовку аварийной.

Проблема отрицательного влияния ЧФ на надежность действующих технологий швартовки-отшвартовки судов вышла на первое место в судовых эргатических системах (СЭС). Для снижения вклада ЧФ в ошибки швартовки необходимо преодолеть недооценку объективных ограничений глазомера и низкой оперативности решений людей, которые невозможно улучшить сверх отпущенного человеку природой. Недоступные человеческому элементу (ЧЭ) качества следует восполнять точными измерителями и быстрыми вычислителями ТЭ-страта СЭС, где ТЭ — технический элемент.

Исторически сложилась двухуровневая модель функционирования триадного комплекса СЭС: швартуемое судно с техническими средствами судовождения (ТСС), входящими в ТЭ-страт, управляющий его движением человек (ЧЭ) и внешний объектный мир с ближайшими границами опасности (ГО) для ЭС (рис. 1). В структуре СЭС = ЧЭ → + ← ТЭ ведущая роль ЧЭ показана символом (ЧЭ →), а вспомогательная роль ТЭ

символом (← ТЭ), означающим помощь ЧЭ от ← ТЭ.

Из рис. 1 видно, что K_r является медленно меняющейся вероятностной функцией, которая изменяется в области значений: $0,9 \leq K_r \leq 0,999999$. Асимптотическое значение $K_r = 1,0$ дает основание считать K_r мерой вероятности безотказного состояния СЭС, а с точки зрения теории информации — объемом информации о безотказном состоянии. В линейном масштабе оси ординат изменения функции $K_r(t)$ в интервалах $0,99 < K_r < 0,999999$ в зависимости от t графически неразрешимы, т. к. $K_r(t) \approx 1$. Поэтому нами разработан специальный квазилогарифмический масштаб (см. ось $K_r = a(1 - \lg \Delta)$ на рис. 1) для построения функций $K_r(t)$. Погрешность ординатного положения точек $K_r(t)$ везде меньше соответствующего значения $\Delta = 1 - K_r$. Физический смысл выражения K_r через девятки определен в подписи к рис. 1.

В новой разработке более надежной технологии управления транспортным средством сохраняется практика «восстановления отказа» СЭС в предотказном состоянии «аттрактора отказа» методами маневров последнего момента (МППМ). Этот метод актуален для флотских технологий потому, что маневрирование судов имеет большую длительность переходного процесса вовлечения судна в любое движение, потенциально чреватое отказом (столкновением, навалом, посадкой на мель). В теории надежности такое предотказное состояние характеризуют временным резервом. При соотношениях длительностей $\tau \downarrow > \tau \uparrow$ переходного процесса вовлечения ($\tau \downarrow$) и восста-

новления ($\tau \uparrow$) отказ предотвращают с помощью МППМ.

Практика управления транспортными системами путем МППМ, спонтанно изобретаемых опытными водителями, во-первых, не имеет системного научного описания, во-вторых, до сих пор не дает ожидаемого эффекта повышения надежности выше значений $0,9 < K_r < 0,95$. Этого явно недостаточно для швартовки крупных судов, особенно с опасными грузами, когда на 1–2 десятка швартовок приходится одно происшествие.

Новые (для флота) возможности повышения надежности судопроводки в местах стесненного маневрирования появятся только при новой организации функционирования ТЭ- и ЧЭ-стратов СЭС: речь идет о синергии между ТЭ и ЧЭ по методу их взаимного ноо-дополнения, особенно в части повышения точности и быстроты реакций слабейшего ЧЭ-звена за счет более оперативного и метрически более точного ТЭ-звена. В данной работе впервые ставится задача вывода на дисплей судоводителя двух решений надежности СЭС в очередном исполнении маневра: рекомендованного автоматами и избранного судоводителем с записью их в «черный ящик».

Внезапные и постепенные отказы в СЭС

С встречающимися в плавании опасностями мы будем связывать потоки отказов разных частей СЭС в ходе швартовки судна, а с действиями, предотвращающими эти происшествия, — соответствующие необходимые потоки восстановления отказов. При решении задач безаварийного маневрирования возникает ряд особенностей применения используемой (в том или ином случае) статистической базы.

Во-первых, требуется модификация методов решения надежности задач, связанная со спецификой одновременного учета нестационарных потоков внезапных и постепенных отказов ТЭ-структур (модели марковских процессов

и уравнения Колмогорова становятся неоднородными). Во-вторых, аналогичные расчеты коэффициентов вероятностной готовности ($K_r^{(i)}$) ЧЭ-структур СЭС гораздо чаще неоднородны и нестационарны. В поток отказов ЧЭ приходится включать любое возникающее по воле судоводителя состояние судна как потенциально опасное. При швартовке игнорирование таких потенциальных угроз отказа-навала на ГО недопустимо, так как точка пересечения линейного продолжения любого текущего вектора скорости борта судна с ближайшим объектом ГО имеет очень малый резерв времени для конструирования МПМ (минуты и даже секунды). Очевидно, давно назрела необходимость вывода на операторский монитор судоводителя оптимального маневренного решения советуемых автоматов, дающее информацию о временном резерве $\tau_{рез}$ и допустимом времени восстановления отказа с помощью МПМ.

Случайные (полностью неопределенные) и вероятностные (неполно определенные) причины отказов СЭС

Судно имеет дело с детерминированными действиями управления (энергетикой $У$) и со случайными пульсами механической природы, имеющими энергию Ш, которые при соотношении $У \sim Ш$ (характерном для швартовки) приводят к частичной или полной утрате управляемости судна (оно столь же управляемо, как и неуправляемо: $K_r \sim 0,5 \sim 1 - K_r$).

Методы повышения отношения сигнал/шум, известные из теорий процессов в электродинамических системах, прямо не применимы к механическим системам. Поэтому априорное знание временного резерва восстановления внезапного отказа при швартовке является, пожалуй, единственным средством их нейтрализации методами МПМ. Метод внешнего дополнения определенности действий ЧЭ-части (более стохастичной) со стороны точных решений ТЭ-части (менее стохастич-

ной) предполагает *оперативный* сбор статистической базы, необходимой для поиска оптимальных решений методами теории надежности. Очевидно, что описанная выше «статистическая база» внезапного отказа весьма специфична (требуется «мгновенное» определение временного резерва $\tau_{рез}$ до отказа для каждого положения векторов скорости центра тяжести, носа и кормы судна).

Нестационарность потоков отказов при маневрировании судна

Основными требованиями к потоковым функциям отказности в этих базах данных являются: стационарность на временных интервалах их применения; соответствие выбираемым функциям распределения; адекватность условиям всего пространства оперативного применения базы при решении неоднородных задач.

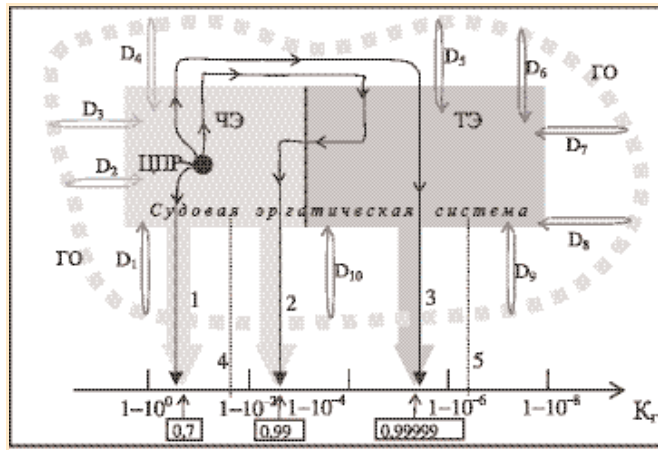


Рис. 1. Древняя (1) и современные (2,3) эрготехнические модели реализации надежности судоводителя, выраженной в относительных единицах коэффициента готовности K_r , характеризующего способность судна выполнять безошибочный маневр с вероятностью $0 < K_r \leq 1$ (ось K_r имеет квазилогарифмический масштаб; показатель степеней N в часе $1 - 10^{-N}$ определяет число девиаток после закладки, ширинер: $N = 6$ означает $1 - 10^{-6} = 0,999999$):
 1 – без использования технических средств судовождения (ТСС) древним редким судоводителем;
 2 – то же для выживших судоводителей;
 3 – с использованием ТСС и принятием всех решений судоводителем;
 4 – с использованием ТСС и автоматизированным без вмешательства судоводителя в большинство управленческих решений автоматом, который находится лишь под его тактико-тактико-информационным наблюдением;
 5 – то же для каждого из множества маневров (без вмешательства судоводителя в решения автомата).
 D_1, D_2 – дальности от борта до границы опасностей ГО, измеряемые в гизах или дальнометрах.

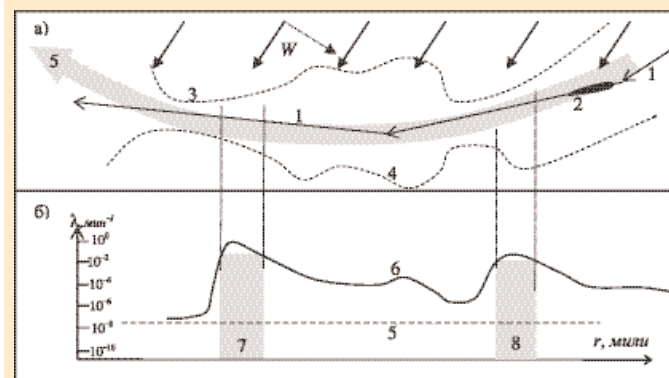


Рис. 2. а) Схема прохождения судном узкостей, характеризующих повышенной опасностью возникновения происшествий, грозящих безопасностью судна и экологической безопасностью акватории моря: 1 – траекс судна; 2; 3 и 4 – правая и левая границы опасностей относительно траекс судна; 5 – прогнозируемое течение; W – вектор текущего направления ветра (сплошной) и вектор изменения его направления (пунктир).
 б) Функциональная зависимость потока внезапных отказов (б) эргатической системы управления судном, причиной которых являются неоптимальные волевые действия судоводителя, т.е. подкомплекса ЧЭ по рис.1 (5 – поток отказов в отсутствие границ 3 и 4, стесняющих маневры судна; 7, 8 – участки траекс с повышенными потоками внезапных отказов).

На рис. 2а показан путь 1 судна 2 на акватории с априори выявленными границами опасности 3, 4, а на рис. 3б представлена функция $\lambda(r)$ изменения потока λ внезапных отказов на разных участках стесненности (r) маневров. Видно, что в областях 7 и 8 повышенного стеснения маневров (от ГО 3 и 4) потоки внезапных отказов 6 от неоптимальных управленческих действий судоводителя резко возрастают. Для сравнения дан случай 5 ничтожной вероятности отказов СЭС при маневрировании судна в открытом море (когда опасностей 3 и 4 нет).

К внезапным ошибкам-отказам могут приводить в ситуации на рис. 2а: *неточность* работы ТСС, на основе которых судоводитель принимает управленческие решения; *неправильность* учета течения 5, направления и силы ветра W и др. причины; *отоздание* с решением нужного МПМ; *просто зевки* от низкой разрешающей силы глазомера (когда игнорируются или отсутствуют подсказки автоматов) и т.п.

Все эти причины способны проявляться внезапно в преддверии катастрофы, поэтому предотвратить ее возможно только с помощью МПМ. Обеспечить для этого максимальный резерв времени можно только при использовании самой ранней диагностики скрытых аттракторов в зоны ГО.

Скоростные возможности решений СЭС

Скорость определения «в уме» времени встречи подвижного объекта с препятствием весьма ограничена даже у самых опытных профессионалов. Вместе с низкой (декаметровой) точностью визуальной дальнометрии судоводителей это определяет ту высокую вероятность артефактности ЧФ, которая наблюдается сегодня на флоте (на рис. 3 это состояние 2).

Интеллектуализация швартовки с помощью подсказывающих автоматов ТЭ повышает надежность СЭС до $K_r \approx 0,997$ (4 на рис. 3), но радикального снижения аварийности при швартовках можно будет достичь только при двумерном

круговом обзоре положения судна относительно ГО (на рис. 3 это уровень 5). Это будет такой уровень безопасности, который позволит снизить вклад человеческого фактора аварийности на флоте с сегодняшних 80% до единиц процентов в будущем.

Методика расчета вероятностного K_r СЭС безаварийной швартовки

Вероятностная аппроксимация процесса функционирования ЧЭ сложной СЭС марковским процессом с дискретными состояниями и непрерывным временем основывается на предположении о том, что любое кинетическое состояние швартуемого судна случайно предсказуемо. В этой модели каждому состоянию вектора скорости V маневрирующего судна предпосылается потенциальная опасность встречи судна (через некоторое время T_{ki} с одним из окружающих внешних объектов, случайно попадающих на линейное продолжение V . Назовем T_{ki} временем от момента наблюдения i -опасности до момента встречи с ней в потенциально возможной катастрофе. С другой стороны, это тот текущий интервал времени, который отведен для осуществления всех необходимых процедур управления судном по предотвращению i -катастрофы, предсказываемой в момент i -го наблюдения кинетического состояния судна в i -направлении. Все части цикла управления ($\tau_{упр} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + \dots$) судном, уводящего его от «отказов» (навалов, столкновений и т. п.) и приводящего к цели (безопасной постановке у причала), могут реализоваться судоводителем только на интервале $T_{ki} = r_i / V_i$.

На рис. 4б полный цикл управления $\tau_{упр}$ представлен суммой времен: t_1 — переработки получаемой информации судоводителем; t_2 — срабатывания органов управления; t_3 — отработки команд машинами; t_4 — отвлечения судоводителя от данного направления опасности (например, от направления 1, 2, 3, 4 на направление 1', 2' на рис. 4а) и т.п. Надо учитывать также интервал време-

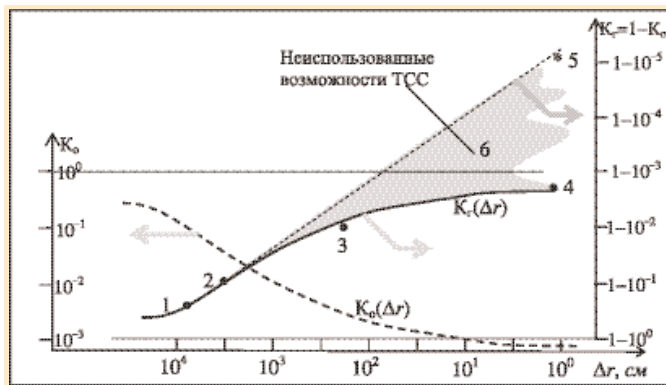


Рис. 3. Зависимость коэффициента готовности K_r и отказности K_o СЭС безотказной швартовки танкера от абсолютной точности Δr определения его координат на поверхности акватории и расстояний от швартуемого борта до линии швеса (уровень $1 \cdot 10^{-3} = 0,999$ соответствует одному отказу (например, навалу) из 1000 швартовок): 1 — «за глаз» без ТСС; 2 — с использованием ТСС с десятикратной погрешностью измерения положения судна относительно линии швеса; 3 — с использованием ТСС с десятикратной погрешностью измерения положения судна относительно линии швеса; 4, 5 — то же, что в 3, но при использовании швартовочных разрывных устройств для суднодвигателя поворот восстановления его ориентации относительно линии швеса; 6 — область неиспользованных возможностей швартовки судна с помощью подвижных анкеров.

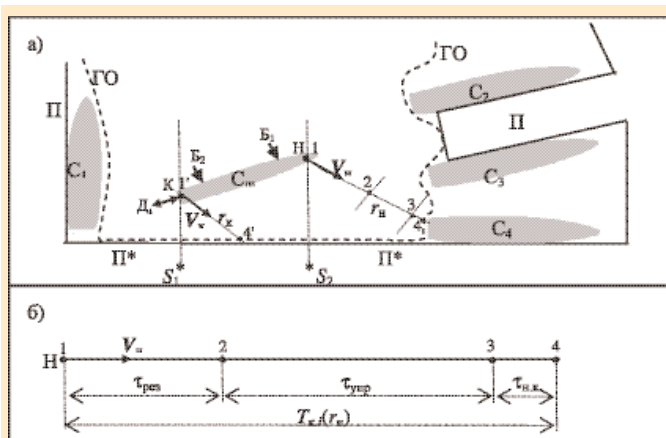


Рис. 4. Схема швартовки (а) судна C_{III} к месту $S_1 - S_2$ стоянки у швеса (П) и модель (б) формирования резерва времени $\tau_{рез}$ для осуществления безопасного маневрирования при швартовке C_{III} : а) акватория швартовки, свободная (зеленая) опасностей (ГО), образованная прерывистой линией (П*, П*) и стоянками судна (C_1, C_2, C_3, C_4); швартовка осуществляется буксирами (B_1 и B_2) с использованием собственных двигателей D_1 ; б) модель формирования одного из состояний функциональной надежности в «зоне вероятных опасностей» от образования поперечной части судна C_{III} с ГО. Для вычисления V_{nk} предполагается, что точка Н судна C_{III} в данное время $t_{nk} = r_{nk} / V_{nk}$ обогнала ее со скоростью V_{nk} с точкой 4 на корме стоянки судна C_4 (векторная $t_{nk} \rightarrow \infty$)

ни $t_{нк}$, вхождение в который со скоростью V_{nk} означает неизбежность катастрофы ($_{нк}$), связанной с навалом носа судна C_{III} на корму судна C_4 (в точке 4 на рис. 4), так как на участке 3–4 количество движения $m_c \cdot V_i$ судна уже не смогут преодолеть никакие МПМ.

Таким образом, резервное время $\tau_{рез}$ для оперативных действий судоводителя для поиска вариантов безотказного управления судном при швартовке в каждом текущем кинетическом i -состоянии будет:

$$\tau_{рез} = T_{ki}(r_i, V_i) - (t_{упр} + t_{нк}) = T_{ki}(r_i, V_i) - t_o, \quad (1)$$

где t_o будем называть совокупным временем отвлечения (o) СЭС от действий, направленных на восстановление отказа средствами целенаправленного МПМ с затратами времени $\tau_{упр,i}$; $t_{нк}$ — остаточное время, когда неизбежна катастрофа ($_{нк}$) из-за непреодолимости инерции судна. В данной модели при $t_o < \tau_{рез}$ состояние судна практичес-

ки безотказно, а при выходе t_o за пределы резервного времени ($t_o > \tau_{рез}$) начинается экспоненциальный рост вероятностей происшествия опасных событий (навалов, столкновений и т.п.). Из (1) видно, что системное время $T_{ki}(r_i)$ выполняет роль параметра СЭС, называемого в теории надежности «временем наработки на отказ». Специфика параметра $T_{ki}(r_i, V_i)$ в данной модели надежности процесса в том, что при $t_o > T_{ki}$ имеет место 100% вероятность навала на ГО, и это найдет далее свое выражение в асимптотике формулы (5): $p_{\Sigma}(t_o \rightarrow \infty) = 1$.

Из данных определений ясно, что резервное время на реализацию программы оперативного управления судном в значительной степени зависит от скорости реакции судоводителя (запаздывание $t_1 + t_2$ человеческого элемента = ЧЭ) и времен последствия машин и механизмов ТЭ (запаздывание $t_3 + t_4$). Чем меньше затрат времени $t_{упр,i}$ уходит на подготовку управленческого противодействия обнаруживаемой угрозе навала на ГО, тем большая часть времени T_{ki} до отказа остается во временном резерве у судоводи-

теля для поиска «безотказного» маневрирования. Очевидно, что анализ процесса швартовки судна сведен нами к теории надежности СЭС с временным резервом.

Задачу количественного расчета коэффициента отказности СЭС при управлении швартовкой судна поставим аналогично тому, как это делается в эргатических системах пультового управления реакторами, самолетами и т.п. Будем считать, что до истечения резервного времени $\tau_{рез,i}$ в i -й кинетической ситуации носа или кормы судна СЭС безотказна по линии ЧЭ. Тогда вероятность p_1 того, что за время отвлечения t_o от действий, направленных на восстановление потенциального отказа (в частности, на рис. 4а — столкновения C_{III} с ГО), после истечения сложившегося резервного времени (t_o есть когда $t_o > \tau_{рез,i}$) успевают возникнуть то или иное внезапное возмущение, можно вычислить так:

$$p_1(t_o - t_{рез,i}) = 1 - \exp[-\lambda(t_o - t_{рез,i})], \quad (2)$$

где λ — интенсивность потока «потенциальных отказов» (мин⁻¹). Очевидно, что интенсивность «отказов» λ при швартовке будет зависеть от величины, направления и быстроты смены направления векторов скорости носа и кормы (с ростом $V_{H,ki}$ и быстроты изменения направления $V_{H,ki}$ поток отказов λ растет).

В силу случайной конфигурации контура ГО вероятность появления больших или меньших опасностей (возмущений) можно считать подчиняющейся нормальному закону. Из всего спектра возникающих при швартовке состояний потенциальной отказности вероятность p_2 появления различных $\tau_{рез,i}$ будет распределена вокруг некоторого среднего значения $t_{рез,ср}$ и может быть вычислена так:

$$p_2(t_{рез,i}) = \int_{t_{рез,i}}^{t_{рез,i+1}} (2\pi)^{-1/2} \sigma \cdot \exp[-(t_{рез,i} - t_{рез,ср})^2 / 2\sigma^2] \cdot dt_{рез,i} \quad (3)$$

где $t_{рез,ср} = \sum_{i=1}^k t_{рез,i} / k$ — среднее резервное время по k направлениям наблюдения за ГО; $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^k (t_{рез,i} - t_{рез,ср})^2 / k}$ — дисперсия k -множества резервных времен.

Учитывая, что вероятности p_1 и p_2 независимы, полная вероятность $p_{\Sigma i}$ внезапного отказа-навала (из-за отвлечения судоводителя СЭС на время t_o от наблюдения за i -м направлением (сектором) надвигающейся на i -ю часть борта судна ГО i -опасности) определится произведением $p_1 \cdot p_2$ (для $t_o \geq \tau_{рез,i}$):

$$p_{\Sigma i}(t_o) = \{1 - \exp[-\lambda(t_o - \tau_{рез,i})]\} \cdot \int_{t_{рез,i}}^{t_{рез,i+1}} (2\pi)^{-1/2} \sigma \cdot \exp[-(t_{рез,i} - t_{рез,ср})^2 / 2\sigma^2] \cdot dt_{рез,i} \quad (4)$$

Полная вероятность отказа СЭС по причине отвлечения судоводителя от наблюдения за i -м сектором опасностей от ГО на просмотр остальных $(k-1)$ секторов ОГ вокруг бортового периметра судна определится совместной вероятностью происхождения отказов (навалов, столкновений и т.п.) по всем k -направлениям:

$$p_{\Sigma}(t_o) = \sum_{i=1}^k \{1 - \exp[-\lambda(t_o - \tau_{рез,i})]\} \cdot \int_{t_{рез,i}}^{t_{рез,i+1}} (2\pi)^{-1/2} \sigma \cdot \exp[-(t_{рез,i} - t_{рез,ср})^2 / 2\sigma^2] \cdot dt_{рез,i} / p_2(\infty), \quad (5)$$

где $p_2(\infty)$ — асимптотическое значение $p_2(t_o)$ при $t_o \rightarrow \infty$, нормирующее вероятность $p_2(t_o)$ для больших $(t_o \rightarrow \infty)$ отвлечений судоводителя от управления судном на 100% уровень происхождения катастрофы. Формула (5) описывает коэффициент $K_o^i = p_2(t_o)$ вероятной отказности СЭС в основном от несовершен-

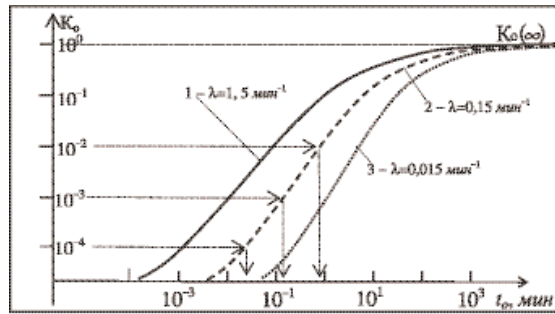


Рис. 5. Зависимость коэффициента отказности K_o СЭС при швартовке танкера от времени отвлечения t_o судоводителя от наблюдения за направлением (сектором) опасностей. Опасности плавая или столкновения расположены на т.н. границе опасности (ГО) данной акватории с минимальным размером (см. рис. 4а): 1 — $L_{ГО} = 1,5$ каб.; 2 — $L_{ГО} = 8$ каб.; 3 — $L_{ГО} = 50$ каб.

ства ЧЭ. Выражая конструктивную сторону деятельности судоводителя в рамках СЭС в форме коэффициента безотказности швартовки, получаем выражение коэффициента готовности ЧЭ к безотказной швартовке:

$$K_r^i(t_o) = 1 - p_{\Sigma}(t_o) = 1 - K_o^i(t_o). \quad (6)$$

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента отказности $K_o(t_o)$ СЭС при швартовке танкера от времени отвлечения t_o от наблюдения за направлением опасности, расположенной вдоль вектора скорости на тот или иной участок (ГО). Видно, что при временах отвлечения судоводителя $t_o > 10$ мин (а это соответствует средним временам $T_{ки}$ достижения борта швартуемого судна ($C_{ш}$) границы опасности, вероятность столкновения с ГО становится близкой к $1,0 = K_o(\infty)$. Это вполне ожидаемый результат.

Гораздо более интересный вывод из приведенных расчетов следует для области малых значений t_o , так как он проливает свет на перспективы снижения вклада человеческого фактора (а он пропорционален K_o) в аварийность на флоте при швартовках судов. Ее уровень (по сценарию 2 на рис. 1) в лучшем случае $K_o \sim 10^{-2}$ (одна авария на сотню швартовок); этот уровень надежности технологий швартовки судов обусловлен преобладанием действий на глаз и решений в уме, чреватых низкой точностью определения расстояний от борта до ГО и большими временами отвлечения t_o от наиболее опасных секторов встречи борта (особенно носа и кормы) с ГО.

Расчеты коэффициента отказности $K_o(t_o)$ СЭС от степени медлительности ЧЭ, приведенные на рис. 5, отчетливо показывают, что большой вклад человеческого фактора в отказность СЭС уровня $\sim 10^{-2}$ соответствует временам отвлечения t_o порядка единиц секунд. Понятно, почему уровень отказности ЧФ в последние 30–40 лет практически не улучшается: человек не может

обеспечить малых времен отвлечения t_o (меньше единиц секунд). Отказность уровня $\sim 10^{-4}$ требует времен отвлечения десятки миллисекунд, а $\sim 10^{-5}$ — единицы миллисекунд. Такая быстрота сканирования секторов ГО вокруг судна недоступна человеку без специальных наблюдательных технических средств швартовки с обработкой данных измерений на сверхбыстрых ЭВМ, способных готовить для судоводителя оптимальные решения-подсказки для управления судном в реальном масштабе времени.

По описанной методике на рис. 3 были построены зависимости коэффициента вероятностной готовности $K_r^i(\Delta r)$ СЭС от абсолютной погрешности дальномеров, обслуживающих судовой ЧЭ-подкомплекс измерениями разной точности дистанций от разных участков борта танкера до ближайшего опасного объекта. Достижение готовности $K_r^i(\Delta r)$ СЭС уровня $\sim 10^{-5}$ (в точке 5 на рис. 3) реализуется не только внедрением круговой дальнометрии сантиметровой точности между всеми участками борта судна и ГО, но и применением автоматов, оперативно осуществляющих МПМ без участия человека (роль которого сводится к наблюдению за исправной работой автоматов).

Таким образом, в настоящей работе изложена новая методика расчета вероятностной степени готовности $K_r^i(\Delta r)$ сложной СЭС к безопасной швартовке судна в зависимости от абсолютной точности дальномеров, обслуживающих судоводителей и от оперативности кругового обзора опасностей вокруг судна. ЭВМ решают на резервном интервале работы до отказа ($\tau_{рез}$) задачи определения момента встречи каждого участка борта судна с опасным объектом и предлагают судоводителю оптимальную подсказку на очередной маневр. Актуальной мерой опасности (ошибок ЧФ) швартовочных операций, исходящей от судового ЧЭ-подкомплекса, в данной методике выступает фактор опасности $K_o^i = 1 - K_r^i$, в обиходной практике называемый человеческим фактором, вклад которого в отказность СЭС при швартовке судов определяющий. При записи в «черный ящик» параметров траекторных маневров швартуемого судна методика дает возможность количественного описания вклада отказности ЧФ на всех стадиях процесса, включая заключительный МПМ.