

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ РУЛЕВЫХ МАШИН МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ОТКАЗО-ТОЛЕРАНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Пипченко А.Д., Шевченко В.А.,
Одесская национальная морская академия*

В работе получен способ повышения надежности работы гидравлической рулевой машины методами отказа-толерантного управления. Разработана отказа-толерантная рулевая система с переменной структурой, устойчивая к таким типовым неисправностям, как несоответствие угла перекладки руля заданному значению, заклинивание руля в одном положении при работе двух рулевых машин. Разработан и реализован алгоритм, предусматривающий реконфигурацию системы управления с целью исключения из нее неисправного элемента. Проведено имитационное моделирование, показывающее эффективность применения методов отказа-толерантного управления к рулевой системе судна с целью компенсации рассмотренных в работе неисправностей. Ключевые слова: судно, рулевая машина, автоматизация, отказа-толерантное управление.

Введение. С увеличением интенсивности судоходства безаварийность плавания судов приобретает все большую актуальность. С технической точки зрения, безаварийность плавания напрямую зависит от надежной работы движительно-рулевого комплекса, одним из наиболее важных узлов которого является рулевая машина.

Актуальность исследований. В мировой практике известны многие крупные аварии судов, непосредственными причинами которых были отказы или выходы из строя гидравлических рулевых машин (ГРМ) [1].

Первым шагом к повышению требований к надежности работы рулевых машин стали «Поправки 1981г. к Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 года» [2], в которых содержится принципиально новое требование – так называемый критерий (показатель) единичной неисправности. Согласно этому требованию, единичная неисправность (отказ) в гидравлической системе, силовых агрегатах (насосах) или системе управления рулевым приводом должна быть изолирована в течение не более 45 сек при обеспечении работоспособности рулевой машины для поддержания управляемости судна.

В эксплуатируемых сегодня рулевых машинах приведенное выше требование реализуется резервированием не только силовых агрегатов и систем управления, но и гидравлических силовых систем [1]. Последнее условие значительно усложняет конструкцию рулевых машин, в то же время, позволяя сохранить их работоспособность при разгерметизациях силовой гидравлической части путем оперативного отключения ее неисправной части.

Процесс определения и отключения некоторых неисправных частей рулевой машины до сих пор не автоматизирован и занимает время, необходимое для локализации неисправности вручную. Зачастую это время

является определяющим в аварийных ситуациях, даже несмотря на своевременные действия квалифицированного экипажа (навал т/х «Известия» на другое судно в Суэцком канале [1]).

В работе [3] приведены концепция и теоретические основы отказо-толерантного управления (ОТУ). В основу концепции ОТУ заложена идея своевременного определения вышедшего из строя или частично неисправного (с пониженными характеристиками) элемента системы и автоматическое принятие мер по компенсации локальной неисправности с целью предотвращения отказа системы в целом.

В работе [4] положено начало исследованиям в отношении повышения надежности системы автоматического управления курсом судна с применением методов ОТУ.

Повышение требований к безопасности мореплавания, связанное с интенсификацией судоходства, увеличением размеров торговых судов и появлением все более сложных задач, выполняемых техническим флотом, обуславливает актуальность применения методов ОТУ как в системе управления судном в целом, так и с целью повышения надежности работы отдельных ее элементов (в частности – рулевой машины), что в свою очередь требует дальнейших глубоких исследований.

Постановка задачи. Целью данной работы является повышение устойчивости системы управления судовой рулевой машиной к типовым локальным неисправностям путем синтеза ее рациональной структуры, а также алгоритмов ее реконфигурации, методами отказо-толерантного управления.

Результаты исследований. Рассмотрим две характерные неисправности ГРМ, приведенные среди ряда других в работе [1]:

- 1) руль перекадывается на угол больше или меньше заданного;
- 2) заклинивание руля в одном положении при работе двух рулевых машин.

Наиболее вероятная причина первой неисправности – наличие люфтов в механизме управления насосами; последствие – снижение качества управления судном.

Наиболее вероятная причина второй – рассогласование задающих органов системы управления ГРМ; последствие – потеря управления судном.

Математическая модель ГРМ может быть описана следующей передаточной функцией [5]:

$$y(s) = \frac{B \cdot Q_s}{(I \cdot s^2 + B \cdot A \cdot s)} \cdot \left(\frac{1}{\tau \cdot s + 1} \right) \cdot X(s) - \frac{1}{I \cdot s^2 + B \cdot A \cdot s} \cdot \left(\sum M_{ext}(s) \right), \quad (1)$$

где $B = \frac{A \cdot \rho / 2 \cdot Q_s}{(2 \cdot \pi \cdot r \cdot U \cdot C_d)}$, Q_s – скорость подачи насоса; A – площадь плунжера;

ρ – плотность гидравлической жидкости (масла); C_d – коэффициент перетечек рабочей жидкости в насосе согласно его характеристике; r –

радиус плунжера; I – приведенный к оси баллера момент инерции подвижных частей рулевого привода и руля с присоединенной к нему массой забортной воды; U – модуль объемной упругости рабочей жидкости, $x \in [-1, 1]$ – положение распределительного клапана, y – скорость плунжера.

На рис. 1 приведена блок-схема ГРМ, работающей в следящем режиме управления (задание формируется положением штурвала либо авторулевым) по ПД закону.

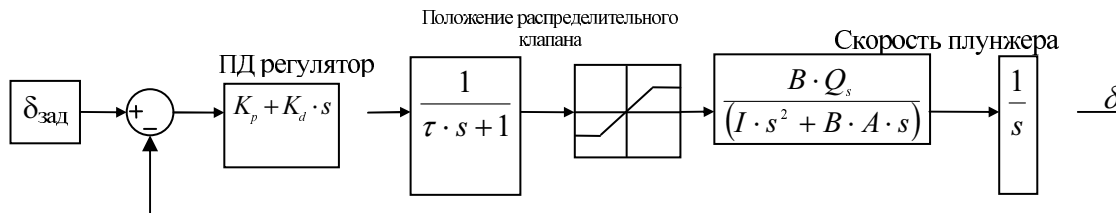


Рисунок 1 – Блок-схема линейной модели ГРМ

Для моделирования первой неисправности добавим в уравнение скорости плунжера дополнительный возмущающий момент M_{ext} (рис. 2). Как видно на рис. 3 (штриховая линия), при перекладках руль не достигает заданного положения на переменную величину d . Для обеспечения выполнения задания, согласно методам теории ОТУ, необходимо прибегнуть либо к изменению параметров системы, либо к ее реконфигурации [3].

В данном случае более целесообразно реализовать второй способ решения проблемы, так как в системе наблюдаются отклонения управляемой величины от задания, не связанные с настройками регулятора. Предположим, что модель (рис. 1) с высокой точностью отображает динамику исправного объекта управления (рис. 2). В этом случае сигнал рассогласования d между выходом модели δ^* и объекта δ может служить в качестве компенсирующего сигнала, поступающего на вход регулятора. При этом компенсирующий сигнал может быть задан функцией вида:

$$c(t) = c(t-1) + k \cdot d(t) \text{ либо}$$

$$c(t) = c(t-1) + k \cdot \text{sign}(d(t)) \cdot [d(t) - d(t-1)]^2,$$

где c – компенсирующий сигнал; k – коэффициент усиления; d – отклонение выхода объекта управления от выхода модели.

Пример подобной системы управления ГРМ с переменной структурой приведен на рис. 2. Результаты моделирования работы обычной системы и системы с переменной структурой приведены на рис. 3.

Вторую неисправность можно смоделировать путем введения на вход ПД регулятора в заданный момент времени постоянного значения максимальной перекладки руля (рис. 4). Как видно из графика (рис. 5), руль заклинивает в положении лево на борт (-30°) в момент времени $t = 90$ с. Как описано в работе [1], одним из решений данной проблемы может быть попеременное включение/отключение насосов ГРМ с целью удаления неисправного из контура управления. Однако на определение этой критической неисправности и выполнение необходимых действий

судоводителем может потребоваться время, достаточное для того, чтобы привести судно к тяжелой аварийной ситуации. Ввиду этого целесообразно введение в контур алгоритма, предусматривающего реконфигурацию системы управления, с целью исключения из нее неисправного элемента.

Для этого в систему управления ГРМ предложим включить логический блок, на вход которого поступают данные о разности заданного и фактического положения пера руля $\varepsilon(t)$ и о состоянии насосов (включены/отключены). Реакцию на заклинивание руля в логическом блоке можно выразить следующей условной функцией:

ЕСЛИ

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(t - T_1) \neq 0 \text{ И } \varepsilon(t) \neq \varepsilon(t - T_2)$$

$$\text{ИЛИ } SG_1(t - 1) = 0 \text{ И } \varepsilon(t) \neq \varepsilon(t - T_2)$$

$$\text{ИЛИ } SG_1(t - 1) = 0 \text{ И } \varepsilon(t) = 0,$$

$$\text{ТО } SG_1(t) = 0; SG_2(t) = 1;$$

ИНАЧЕ ЕСЛИ

$$\varepsilon(t - T_1) = \varepsilon(t - T_2) \neq 0 \text{ И } |\varepsilon(t)| > |\varepsilon(t - T_1)|$$

$$\text{ИЛИ } SG_2(t - 1) = 0 \text{ И } \varepsilon(t) \neq \varepsilon(t - T_2)$$

$$\text{ИЛИ } SG_2(t - 1) = 0 \text{ И } \varepsilon(t) = 0,$$

$$\text{ТО } SG_1(t) = 1; SG_2(t) = 0;$$

ИНАЧЕ

$$SG_1(t) = 1; SG_2(t) = 1,$$

где $SG_{1,2}$ – булевы функции, определяющие состояние насосов (включен, выключен); $T_{1,2}$ – постоянная времени оценки неисправности (здесь $T_1 = 3$ с, $T_2 = 6$ с, при шаге дискретизации $\Delta t = 1$ с). Результаты моделирования исключения выше приведенной неисправности отображены на рис.5.

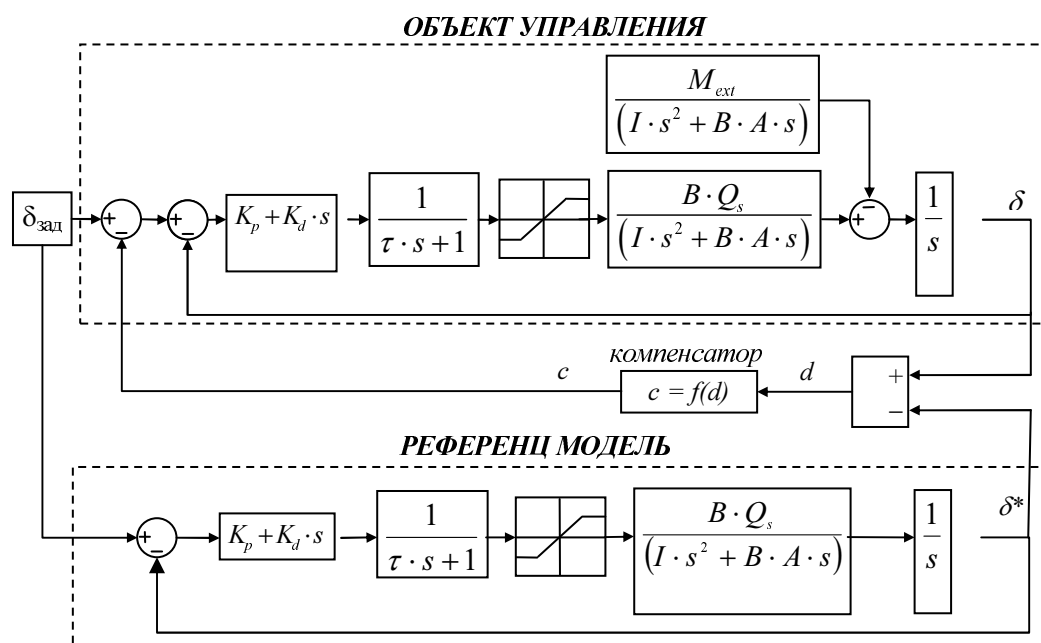


Рисунок 2 – Блок-схема системы управления ГРМ с компенсатором

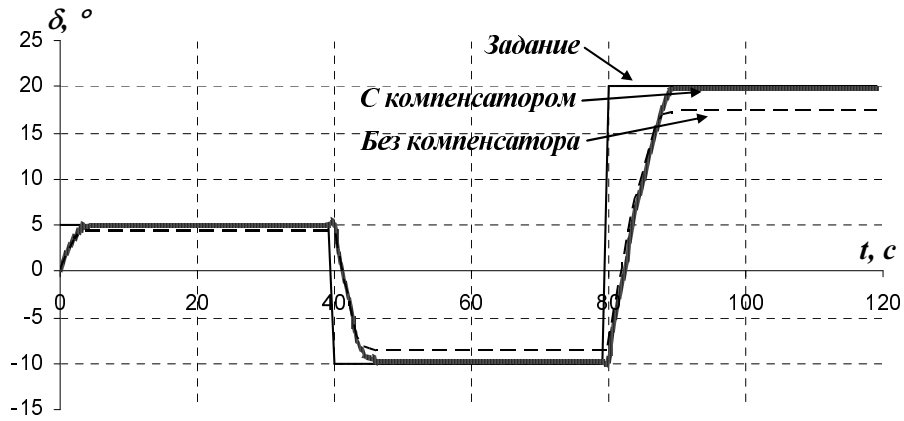


Рисунок 3 – Графики работы ГРМ при различных конфигурациях системы

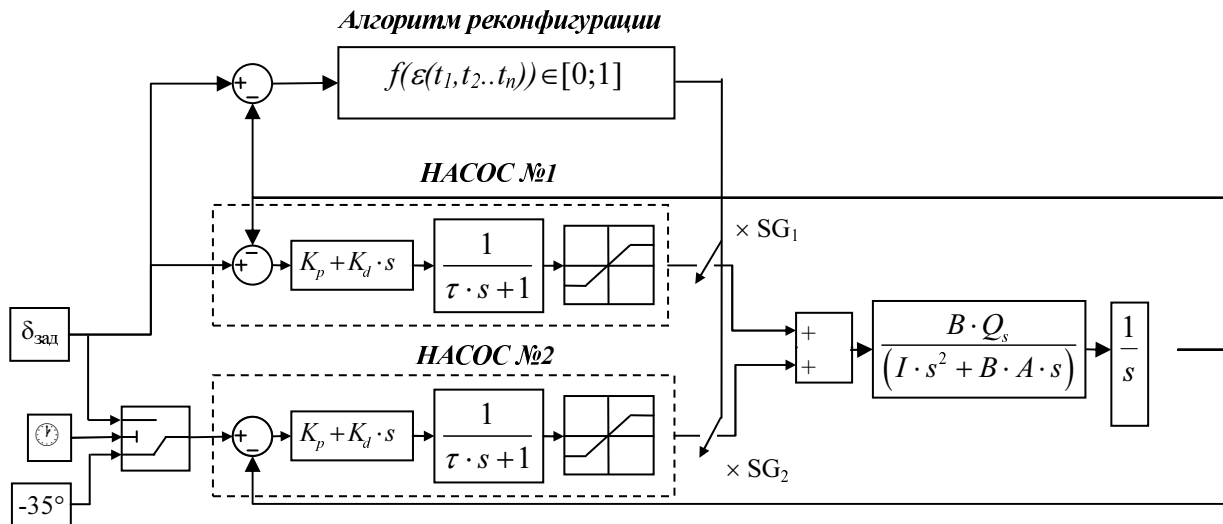


Рисунок 4 – Блок-схема системы управления ГРМ с алгоритмом авто-отключения

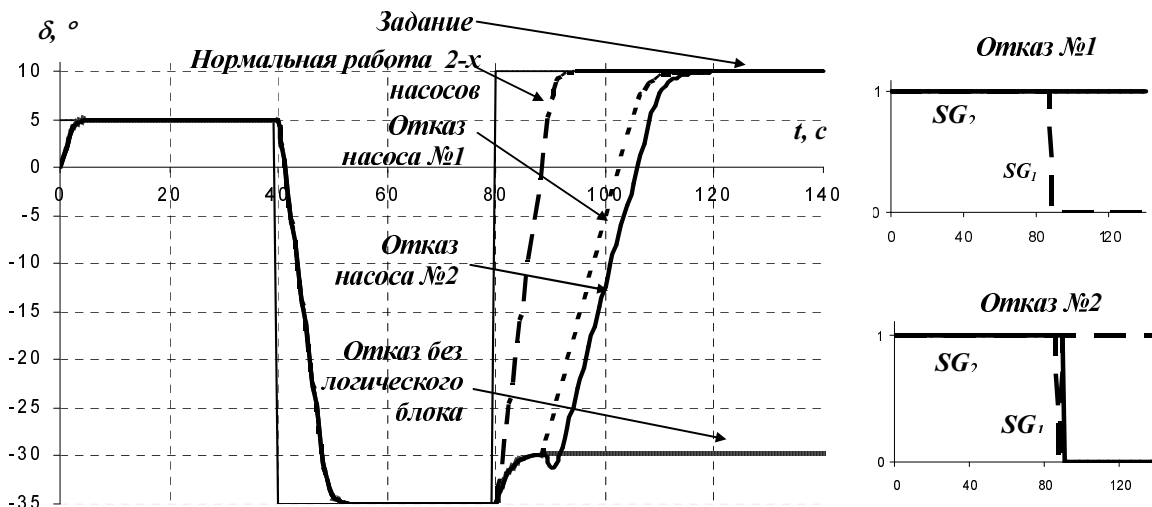


Рисунок 5 – Графики работы ГРМ при различных конфигурациях системы
Слева: положение пера руля; справа: включение/выключение насосов

Выводы. В работе получены композиции рулевой системы судна с переменной структурой, устойчивой к таким типовым неисправностям как: несоответствие угла перекладки руля заданному значению; заклинивание руля в одном положении при работе двух рулевых машин. Что достигалось путем реализации алгоритмов реконфигурации системы управления, направленных на изоляцию или компенсацию возникших неисправностей, методами теории отказа-толерантного управления.

Результаты имитационного моделирования работы полученных систем посредством программного комплекса MATLAB Simulink показали эффективность применения методов ОТУ к рассмотренным неисправностям и целесообразность дальнейших исследований в данном направлении.

Таким образом, дальнейшие исследования следует связать с более глубоким анализом неисправностей, возникающих при работе рулевых машин, а также способов их определения, оценки и последующей компенсации либо изоляции методами ОТУ.

Ожидаемым результатом исследований в данном случае является методика разработки отказа-толерантных систем управления рулевой машиной, устойчивых к широкому спектру неисправностей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харин В. М. Судовые гидравлические рулевые машины : Учеб. пособ. / В. М. Харин. – Одесса : Феникс, 2005. – 280 с.
2. Поправки 1981 г. к Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 года. – М. : Мортехинформреклама, 1984. – 392 с.
3. M. Blanke, M. Staroswiecki and N. E. Wu (2001). Concepts and Methods in Fault-tolerant Control : Invited tutorial lecture at American Control Conference (Washington, USA, 22-24 June 2001) – 15 p.
4. E. OMERDIC, G.N. ROBERTS and Z. VUKIC (2002). Reconfigurable Control System for Ship Course-changing/keeping. 15th IFAC World Congress. – Barcelona, Spain, July 21-26, 2002.
5. Xiros N. I., Tsourapas V. P., Mourtzouchos K. K. A hydraulic steering gear simulator for analysis and control. Proceeding of WSEAS conference (Athens, Greece, 2004) – pp. 276-287.

Піпченко А.Д., Шевченко В.О. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ СТЕРНОВИХ МАШИН МЕТОДАМИ ВІДМОВО-ТОЛЕРАНТНОГО КЕРУВАННЯ
В роботі отриманий спосіб підвищення надійності роботи гідравлічної стернової машини методами відмово-толерантного керування. Розроблена відмово-толерантна стернова система зі змінною структурою, стійка до таких типових несправностей як: невідповідність кута перекладки стерна заданому значенню; заклинювання стернав у одному положенні при роботі двох стернових машин. Розроблений та реалізований алгоритм, який передбачає реконфігурацію системи керування з метою виключення несправного елемента.

Проведено імітаційне моделювання, яке показує ефективність застосування методів відмово-толерантного керування до стернової системи судна з метою компенсації розглянутих в роботі несправностей.

Ключові слова: судно, стернова машина, автоматизація, відмово-толерантне керування.

Рурченко А.Д., Шевченко В.А. INCREASING THE OPERATING RELIABILITY OF STEERING GEARS BY FAULT TOLERANT CONTROL METHODS

This paper presents a way of improving reliability of hydraulic steering gear by the fault tolerant control methods. Fault tolerant steering system with variable structure is received. This system is tolerant for the following faults: rudder angle mismatches with setpoint; rudder stuck when using two steering gears simultaneously.

Reconfiguration algorithm was developed and implemented into system.

Modeling of fault tolerant steering system showed its robustness for the considered faults in steering gear system and effectiveness of applying the fault tolerant control method to steering system.

Key words: ship, steering gear, automation, fault tolerant control.