



УДК 629.5

**MATHEMATICAL MODEL OF THE SYSTEM OF AUTOMATIC
CONTROL OF THE COURSE OF THE SHIP
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
КУРСОМ СУДНА**

Doshchenko G.G./Дощенко Г.Г.*s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.**Kherson State Maritime Academy,**Kherson, Ushakova, 20, 73000**Херсонская государственная морская академия,**Херсон, проспект Ушакова, 20, 73000*

Аннотация. В данном исследовании рассматривается задача оптимизации систем управления курсом судна. Проанализированы недостатки в существующих подходах к решению данной задачи. Проведено моделирование работы системы автоматизированного управления курсом судна (САУКС).

Ключевые слова. Гирокомпас, курс, судно, авторулевое, автоматизированная система, модель, микропроцессор.

Введение. Важной особенностью большинства управляемых процессов является обратная связь. Понятие обратной связи можно легко проиллюстрировать с помощью простых примеров моряка, который управляет кораблем с помощью рулевого колеса. Штурвальный выдерживает курс судна в соответствии с заданными командами. Этот метод управления, обозначаемый термином «управление с разомкнутым контуром», страдает несколькими серьезными недостатками. Так, при изменении характеристик привода - исполнительного механизма, изменяется положение руля, - судно будет сбиваться с курса, если рулевой не имеет никакой информации о действительном направлении движения [1].

Если бы рулевой постоянно следил за курсом судна по компасу, сравнивал его с заданным и вращал штурвал так, чтобы уменьшить обнаруженную ошибку, судно примерно выдерживало бы нужный курс. Можно заметить, что в этом случае штурвальный выполняет три основные функции - выявляет отклонения действительного выполнения заданного, принимает решение о коррекции действия и реализует его с помощью штурвала. Эти действия по выявлению и коррекции ошибки, а также по управлению показана как обратная связь от управляемой величины к управляющей. В такой системе фигурирует не только направление движения корабля, которое задается положением штурвала, но и само положение штурвала зависит от этого направления. Взаимозависимость двух величин - положение штурвала и курса судна - определяет концепцию, называемую в инженерной среде обратной связью, а термин «автоматические системы управления» обычно относятся к автоматическим системам, построенным на этой концепции [2].

Основной текст. Все новые суда морского транспортного флота в настоящее время оборудуются системами автоматического управления (САУ) курсом.



САУ курсом судна состоит из прибора управления (ПУ), который обычно называется авторулевым, рулевого привода (РП) с органом, управляющим - рулем, суда как объекта регулирования (ОР), а также внутреннего (ОС1) и внешнего (ОС2) обратных связей (рис. 1).

Прибор управления системы является вычислительным устройством, построенным на электромеханических и электронных элементах и производящими сигналами управления, пропорциональными по величине углу и угловой скорости отклонения судна от заданного курса.

На пульте управления авторулевого размещаются все необходимые органы настройки, контроля и управления системы.

На большинстве современных судов как рулевой привод используются электрогидравлические рулевые машины, обеспечивающие перекадывание руля со скоростью примерно 2,5-3 град / сек [5].

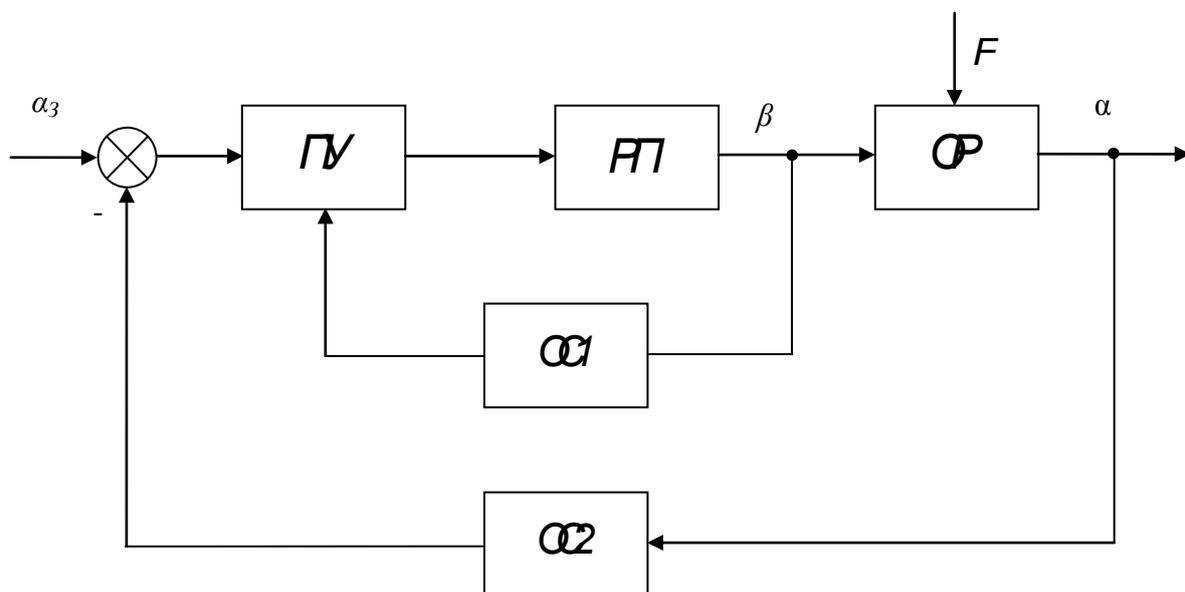


Рисунок 1 - Структурная схема системы автоматического управления курсом судна: α_z - заданный курс судна; β - угол перекадки руля; F - внешние силы, действующие на судно; α - мгновенное значение курса.

При одновременном включении насосов левого и правого бортов скорость перекадки руля увеличивается до 5 град / сек, что положительно влияет на управляемость судна, особенно на малом ходу.

Внутренняя обратная связь в системе осуществляется с помощью устройства, механически связанного с баллером руля и вырабатывает электрический сигнал, пропорциональный углу поворота руля.

Внешняя обратная связь обеспечивается гирокомпасом, который превратит изменение курса судна в угол поворота сельсина-датчика курса, связанного с сельсином-приемником в авторулевом [5].

Все существующие системы автоматического управления курсом судна, независимо от конструкции отдельных звеньев, работают по принципу отклонения, то есть в авторулевом непрерывно сравниваются фактическое и заданное значение курса и вырабатывается сигнал управления. Под действием



этого сигнала рулевой привод переводит руль и возвращает судно к заданному курсу. Сигнал внутреннего отрицательного обратной связи останавливает переключивание руля, а затем поворачивает руль в среднее положение. Сигнал, пропорциональный скорости поворота судна, повышает чувствительность авторулевого при отклонении судна от заданного курса и обеспечивает запрет при возвращении на заданный курс.

Системы автоматического управления курсом удерживают судно на прямом заданном курсе в любую погоду при скорости хода более 5 узлов, а также позволяют изменять заданный курс при введении градусной поправки.

При правильной настройке авторулевого позволяет экономить до 3% ходового времени за счет более точного удержания судна на заданном курсе и уменьшение тормозящего действия корпуса и руля; углы переключки руля при автоматическом управлении на 20-30% меньше, чем при ручном [3].

Судно, как объект управления курсом, можно упрощенно представить инерционным звеном 1 порядка, что имеет уравнение динамики:

$$T \frac{dw}{dt} + W = k_{\delta} \cdot \delta$$

где, w - угловая скорость;

δ - угол переключки руля;

T - постоянная времени, характеризующая инерционность судна;

k_{δ} - коэффициент управляемости, равный отношению угловой скорости на постоянной циркуляции в соответствующий угла переключки руля.

Для связи угловой скорости с мгновенным (текущим) значением курса судна используется простое уравнение:

$$\frac{dKt}{dt} = w.$$

При исследовании систем автоматического управления курсом судна (САУКС) можно считать гирокомпас инерционным звеном с коэффициентом передачи, равным 1, так как его инерционность на порядок меньше, чем в других элементах системы.

В типичных авторулевых применяются пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы, выходной сигнал которых описывается следующим выражением:

$$U = k_1 \Psi + k_2 \frac{d\Psi}{dt} + k_3 \int \Psi dt, \quad (1)$$

где, $\Psi = K_{зад} - K_t$ - угол рыскания;

$K_{зад}$ - заданное значение курса;

K_t - фактическое значение курса;

k_1 k_2 k_3 - коэффициенты закона управления.

Уравнения динамики регулятора преобразуем к виду, более удобному для реализации в ЭВМ, с учетом следующих замечаний:



а) поскольку исполнительные органы обеспечивают преобразование сигнала регулятора в пропорциональный угол кладки руля, то можно считать U_p заданным углом кладки руля $\delta_{зад}$.

б) сигнал производной угла рыскания заменим угловой скоростью:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d(K_{зад} - K_t)}{dt} = -w.$$

Поскольку заданный курс есть величина постоянная, за исключением малого времени поворота задающего штурвала.

в) вместо интеграла от угла рыскания введем новую переменную S .

С учетом этих трех замечаний уравнения регулятора (1) заменим на два уравнения:

$$\begin{cases} \delta_{зад} = k_1 \cdot (K_{зад} - K_t) - k_2 \cdot w + k_3 \cdot S \\ \frac{dS}{dt} = K_t \end{cases}$$

На современных морских судах, в основном, применяют электрогидравлические рулевые машины, в которых скорость перекладки пера руля пропорционально величине смещения управляющего органа, от нейтрального положения. То есть, можно представить рулевую машину идеальным интегрирующим звеном с единичным коэффициентом передачи [4].

Тогда уравнение динамики исполнительных органов (исполнительный механизм авторулевого плюс рулевая машина) будет иметь следующий вид:

$$\frac{d\delta}{dt} = k_{эм} (\delta_{зад} - k_{зз} \cdot \delta),$$

где, $k_{эм}$ - коэффициент передачи исполнительного механизма;

$k_{зз}$ - коэффициент обратной связи (коэффициент передачи рулевого датчика), равный 0,2 - 2,0.

Коэффициент передачи исполнительного механизма (результатирующий коэффициент передачи усилителя и двигателя, охваченных обратной связью через датчик скорости перекладки ДШП) определяется по формуле:

$$k_{эм} = \frac{k_y \cdot k_d}{1 + k_{ДШП} \cdot k_y \cdot k_d},$$

где k_y k_d $k_{ДШП}$ - коэффициенты передачи усилителя, двигателя и датчика скорости перекладки соответственно.

Численное значение $k_{зз}$ обычно равно 0,3 - 0,5, это означает, что сигнал на выходе регулятора, соответствующий 3 градусам заданного переключивание руля, вызовет переключивание руля со скоростью 0,09 - 1,5 град / сек.



Таким образом, для моделирования работы САУКС на ЭВМ используется следующая система дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\delta}{dt} = k_{em} \cdot (k_1 \cdot (K_{зад} - K_t) - k_2 \cdot w + k_3 \cdot \delta), \\ \frac{dw}{dt} = \frac{k_6 \cdot \delta + M_g(t) \cdot w}{T}, \\ \frac{dK_t}{dt} = w, \\ \frac{dS}{dt} = K_t. \end{array} \right.$$

Для решения данной системы уравнений используется метод численной интеграции - метод Эйлера [3]. Согласно этому методу, в правые части уравнений подставляют значения переменных в начальный момент времени и находят значения производных в начальный момент времени. Затем для заданного шага интеграции (малого интервала времени dt) находят приросты переменных в шаге интеграции, умножая значения производных в начальный момент времени на dt . Далее находят значения переменных в начале второго шага интеграции, суммируя полученные приросты с начальными значениями переменных. На втором шаге интеграции в правые части уравнений системы подставляют значения переменных в начале второго шага и находят значения производных в начале второго шага. Затем рассчитывают приросты переменных за второй шаг, умножая найденные значения производных на dt .

Далее приобретают значение переменных в начале третьего шага интеграции суммируя приросты со значениями переменных в начале второго шага и т.д. до конца процесса.

При исследовании систем автоматического управления курсом судна (САУКС) в режиме маневрирования считают отсутствие возмущающих моменты $m_b(t)$ и считают отключенным интегрирующее звено в регуляторе ($k_3 = 0$). Изменяя коэффициент обратной связи $k_{зз}$ и коэффициент при производной k_2 (коэффициент тахогенератора $k_{ТГ}$), получают различные переходные процессы при выводе судна на заданный курс X $K_{зад}$.

Качество переходных процессов в режиме маневрирования оценивается с помощью следующих показателей:

– перерегулирование:

$$\Pi = \frac{K_{max} - K_{зад}}{K_{зад}}$$

– время регулирования T_p – время, в течение которого величина динамической ошибки входит в зону заданной статической ошибки (в



настоящей работе статическая ошибка принята равной 1% от k_3 или 0,3 град)

– интегральная оценка качества переходного процесса:

$$I_1 = \int_0^{T_p} / K_{зад} - K_t / dt,$$

минимум которой соответствует наилучшему переходному процессу и оптимальным настроечным параметров.

При исследовании САУКС в режиме стабилизации на курсе задаются возмущающие моменты $m_b(t)$, имитирующие действие волны на корпус судна. Изменяя коэффициент обратной связи $k_{зз}$, коэффициент при производной k_2 (коэффициент тахогенератора $k_{ТГ}$) и коэффициент при интеграле k_3 получают различные варианты процесса стабилизации [4].

Для оценки качества управления в режиме стабилизации используется интегральный квадратичный критерий, величина которого равна:

$$I_2 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} (\Psi^2 + \alpha^2 \delta^2) dt,$$

где, T_0 - интервал оценки;

δ - угол кладки руля;

α - весовой коэффициент, учитывающий степень влияния на величину потерь скорости 1 град. рыскания и 1 град. переключивания руля.

Заключение и выводы. В работе рассмотрены математические модели работы систем автоматического управления курсом судна и оценки качества управления в разных режимах работы судна.

Литература:

1. Шибяев, А. Г. Обобщение и развитие моделей оптимальной расстановки флота морской судоходной компании [Текст] / А. Г. Шибяев // Весник Одесского государственного морского университета. – Одеса: ОДМУ, Астропринт, 1998. – № 2. – С. 66–72.

2. Zhilenkov A. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology [Text] / A. Zhilenkov, S. Chernyi // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 100. – P. 1247–1252. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.490.

3. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. – 3-е изд., перераб. и доп. – Одесса: Фенікс, 2007. – 328 с.

4. Вагущенко Л. Л. Системы автоматического управления движением судна Текст. / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Одесса: Латстар, 2002/ – 310 с.

5. Васильев К. К. Теория автоматического управления (следающие системы). [Текст]: учебн. пособие / К. К. Васильев. – Ульяновск, 2001. – 98 с.

References:

1. Shibaev, A. G. Generalization and development of models of the optimal layout of the fleet of the maritime shipping company [Text] / A. G. Shibaev // Visnyk of the Odesskogo Sovereign Morsky University. - Odessa: ODMU, Astroprint, 1998. - № 2. - p. 66–72.



2. Zhilenkov A. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology [Text] / A. Zhilenkov, S. Chernyi // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 100. – P. 1247–1252. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.490.
3. Tarovik O.V., Bakharev A.A., Topazh A.G., and others. Simulation model of fleet operation as a tool for analyzing the operational parameters of vessels and substantiating design solutions // Nauch.-tekhn. Sat Grew up mor shipping register. - 2015. - № 38/39. - p. 46 - 52.
4. Vagushchenko L.L., Tsymbal N.N. Automatic ship motion control systems. - 3rd ed., Pererab. and add. - Odessa: Fenix, 2007. - 328 p.
5. Vagushchenko L. L. Automatic ship motion control systems Text. / L. L. Vagushchenko, N.N. Tsymbal. - Ed. 2nd, Pererab. and add. - Odessa: Latstar, 2002 - 310 p.
6. Vasiliev KK The theory of automatic control (tracking systems). [Text]: schol. manual / K. K. Vasilyev. - Ulyanovsk, 2001. - 98 p.

Annotation. *This study addresses the challenge of streamlining ship control systems. The shortcomings of the existing approaches to solving this problem are analyzed. The simulation of an automated course management system was carried out.*

Keywords. *Gyrocompass, course, vessel, autopilot, automated system, model, microprocessor.*

Статья отправлена: 07.12.2018 г.

© Дощенко Г.Г.