ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О СИНТЕЗЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ СУДНА НА ТРАЕКТОРИИ

А. И. Доценко, Ю. А. Косирати

Орджоникидзе

Комплексная автоматизация судовождения выдвинула ряд нерешенных задач, например, создание системы, обеспечивающей систематическую проводку судов в узкостях. Безопасность проводки судов — основное требование при этой системе. Современные авторулевые, как известно, не справляются с этим требованием, так как они управляют только курсом судна и не реагируют на его дрейф под действием ветра, течений и пр. До недавнего времени не было прибора, который мог бы в течение длительного времени измерять величины боковых смещений судна с заданной траектории. В настоящее время такой прибор, выполненный в виде приставки к судовому радиолокатору, создается в Сибирском физико-техническом институте им. В. Д. Кузнецова. Данный прибор будет давать с достаточной для практики точностью информацию о боковых и продольных перемещениях судна. Таким образом, появляется возможность создания системы стабилизации центра масс судна на заданной траектории. Рассмотрим принцип построения этой системы.

Уравнения движения судна без учета влияния крена имеют следующий вид [1]:

$$\begin{aligned}
&\frac{L}{v}\frac{d\beta}{dt} + q_{21}\beta + r_{21}\omega + s_{21}\alpha = 0;\\
&\frac{L}{v}\frac{d\omega}{dt} + q_{31}\beta + r_{31}\omega + s_{31}\alpha = 0;\\
&\frac{L}{v}\frac{d\psi}{dt} = \omega;\\
&\frac{L}{v}\frac{dY}{dt} = \psi + \beta,
\end{aligned} \tag{1}$$

где ψ и β — углы рыскания и дрейфа;

ω — угловая скорость вращения судна относительно вертикальной оси;

v — скорость хода судна;
α — угол перекладки руля направления;
L — длина судна по ватерлинии;
Y — относительное боковое смещение судна с траектории, определяемое из абсолютного смещения y с помощью выражения $y = Y \cdot L$.

Введя обозначение

$$p = p_1 \frac{L}{v} = \frac{L}{v} \frac{d}{dt}, \tag{2}$$

преобразуем систему уравнений (1) к следующему виду:

$$\begin{aligned} (p + q'_{21})\, pV + \left[(r_{21} + 1) + q'_{21}\right] p\psi &= -S_{21}\alpha + S_{22}f; \\ q_{31} pV + (p^2 + r_{31}p + q_{31})\, \psi &= -S_{31}\alpha + S_{32}f. \end{aligned} \tag{3}$$

Следует подчеркнуть, что в этих уравнениях оператор p, формально заменяющий знак дифференцирования, согласно выражению (2), является одновременно функцией скорости судна v.

Передаточные функции судна по углу рыскания и боковому смещению легко находим из системы уравнений (3):

$$\begin{aligned} W^{\alpha}_{\psi}(p) &= \frac{k_{\alpha}(T\psi p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)\, p}; \\ W^{\alpha}_{Y}(p) &= \frac{k_{\alpha}(T_{1y} p + 1)(T_{2y} p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)\, p^2}; \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} W^{f}_{\psi}(p) &= \frac{k_f(T'_{\psi} p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)\, p}; \\ W^{f}_{Y}(p) &= \frac{k_f(T'_{1y} p + 1)(T'_{2y} p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)\, p^2}. \end{aligned} \tag{5}$$

Здесь $W^{\alpha}_{\psi}(p)$ и $W^{\alpha}_{Y}(p)$ — передаточные функции по управляющему, а $W^{f}_{\psi}(p)$ и $W^{f}_{Y}(p)$ — по возмущающему воздействиям.

Управление движением центра масс судна происходит под действием сил и моментов, создаваемых рулем направления. Но руль направления воздействует в первую очередь на угловые перемещения судна относительно вертикальной оси. Боковые перемещения можно считать следствием угловых отклонений. В связи с этим структурную схему судна можно изобразить в виде двух последовательно соединенных динамических звеньев, первое из которых характеризует движение судна вокруг центра масс, а второе — движение центра масс (рис. 1). Передаточную функцию второго звена $\overline{W}_Y(p)$ находим как отношение передаточных функций судна по боковому смещению $W^{\alpha}_{Y}(p)$ и по углу рыскания $W^{\alpha}_{\psi}(p)$

$$\overline{W}_Y(p) = \frac{Y}{\psi} = \frac{Y_{\alpha}}{\alpha_{\psi}} = \frac{W^{\alpha}_{Y}(p)}{W^{\alpha}_{\psi}(p)} = \frac{k_y(T_{1y} p + 1)(T_{2y} p + 1)}{p(T_{\psi} p + 1)}. \tag{6}$$

Такое представление структурной схемы судна позволяет выбрать структуру системы управления движением центра масс судна, состоящей из трех контуров (рис. 1). Внутренний контур — рулевой привод — управляет работой руля в соответствии с сигналами управления, поступающими с регулятора. Второй контур управляет угловыми переме-

щениями судна относительно центра тяжести (углом рыскания). Структура этих двух внутренних контуров ничем не отличается от структуры обычных авторулевых, управляющих углом курса судна. И наконец, третий контур — контур управления движением центра масс судна — состоит из той части объекта, которая характеризует движение центра масс в функции от угла рыскания, а также из чувствительных элементов и функциональных преобразователей, дающих информацию о смещении судна с заданной траектории и вырабатывающих необходимые законы управления.

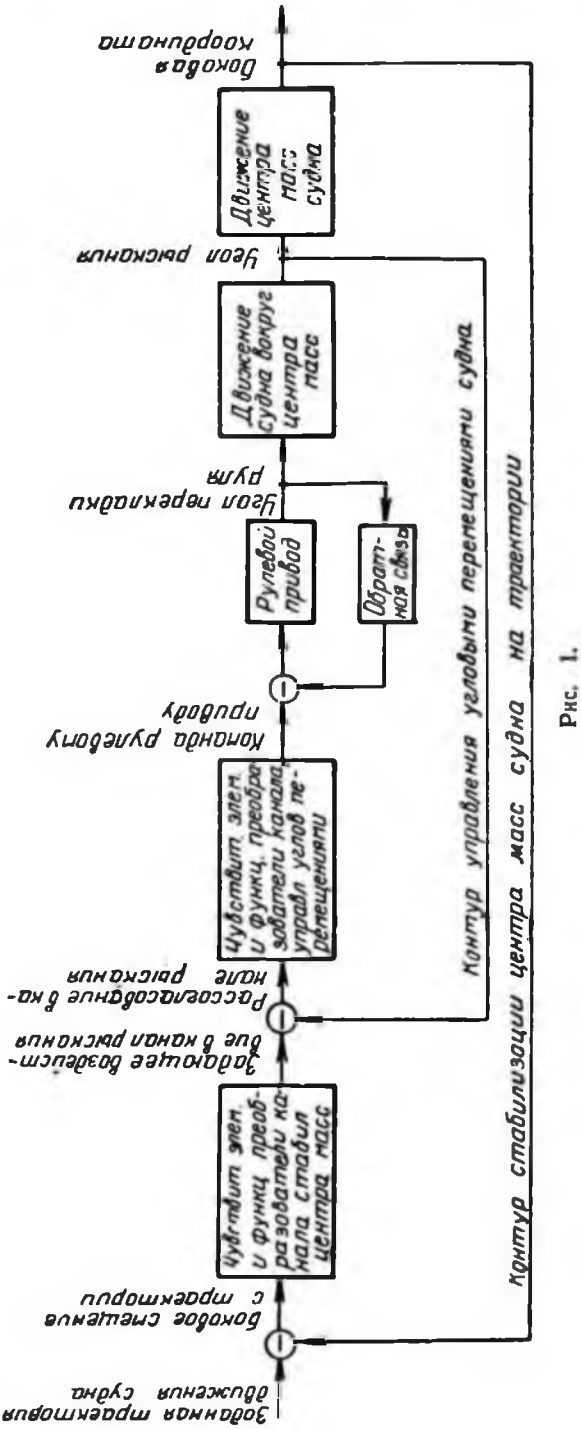

Рис. 1.

Важной особенностью этой схемы является то, что задающее воздействие в контур управления углом рыскания, являвшееся в обычных авторулевых постоянной уставкой, изменяется в функции от бокового смещения судна, т. е. станет случайной функцией времени. В связи с этим второй контур будет работать в следящем режиме и при выборе его динамических характеристик необходимо это учитывать.

Структурная схема системы автоматического управления центром масс судна изображена на рис. 2. Здесь $W_{\kappa}^{V}(p)$ и $W_{\kappa}^{\varphi}(p)$ — передаточные функции чувствительных элементов и функциональных преобразователей соответственно каналов стабилизации центра масс и управления углом рыскания. $\bar{W}_{V}^{f}(p)$ — передаточная функция возмущения, воздействующего непосредственно на боковую координату судна, без учета возмущения, воздействующего

на угол рыскания. Она может быть определена с помощью следующей зависимости:

$$\overline{W}^{l}_{Y}(p) = W^{l}_{Y}(p) - W^{l}_{\psi}(p)\,\overline{W}_{Y}(p). \tag{7}$$

Передаточная функция системы по возмущающему воздействию запишем в следующем виде:

$$\Phi_b(p) = \frac{W^{l}_{Y} - W^{l}_{\psi}W^{\psi}_{k}W_{p}W^{a}_{Y} + W^{\psi}_{k}W_{p}W^{l}_{Y}W^{a}_{\psi}}{1 + W^{\psi}_{k}W_{p}W^{a}_{\psi} + W^{Y}_{k}W^{\psi}_{k}W_{p}W^{a}_{Y}}. \tag{8}$$

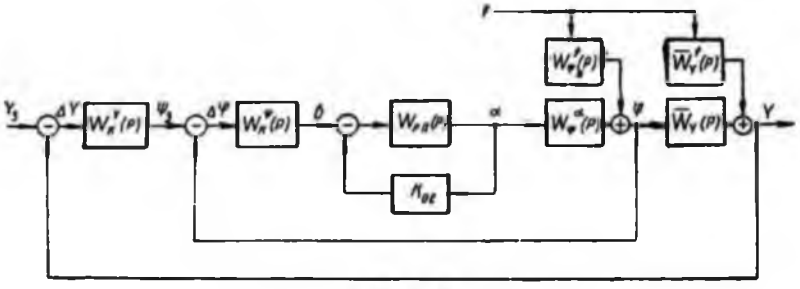

Рис. 2.

Теперь легко получить условие инвариантности выходной координаты по отношению к внешнему возмущению

$$W^{l}_{Y} - W^{\psi}_{k}W_{p}(W^{a}_{Y}W^{l}_{\psi} - W^{a}_{\psi}W^{l}_{Y}) \equiv 0. \tag{9}$$

Передаточную функцию корректирующего устройства $W^{\psi}_{k}(p)$, удовлетворяющего условию абсолютной инвариантности, находим из условия (9)

$$W^{\psi}_{k}(p) = k^{\psi}_{k}(T^{\psi}_{k1}p + 1)(T^{\psi}_{k2}p + 1). \tag{10}$$

Из выражения (10) видно, что условие абсолютной инвариантности в этой системе недостижимо, так как порядок числителя в передаточной функции $W^{\psi}_{k}(p)$ выше порядка знаменателя. Однако при некоторых допущениях инвариантность до ε здесь может быть осуществлена. Если пренебречь инвариантностью элементов рулевого привода, условие инвариантности (10) примет вид

$$W^{\psi}_{k}(p) = k^{\psi}_{k}(T^{\psi}_{k1}p + 1)(T^{\psi}_{k2}p + 1). \tag{11}$$

На судне действуют всевозможные возмущающие воздействия (ветер, волнение, течения и пр.), влияние которых весьма сложно и многогранно. Учесть их трудно, а порой и невозможно. Однако некоторые из возмущений, например ветер, могут быть измерены, и информация о них может помочь системе управления отфильтровывать хотя бы часть возмущающих воздействий. В этой связи целесообразно введение в систему дополнительного канала распространения возмущения — через звено с передаточной функцией $W^{l}_{k}(p)$ (рис. 3). Передаточная функция по возмущению полученной таким образом комбинированной системы управления судном запишется следующим образом:

$$\Phi_b(p) = \frac{W^{l}_{Y} + W^{l}_{Y}W^{\psi}_{k}W^{a}_{\psi}W_{p} - W^{l}_{\psi}W^{\psi}_{k}W^{a}_{Y}W_{p} + W^{\psi}_{k}W^{l}_{k}W^{a}_{Y}W_{p}}{1 + W^{\psi}_{k}W^{a}_{\psi}W_{p} + W^{Y}_{k}W^{\psi}_{k}W^{a}_{Y}W_{p}}. \tag{12}$$

Из условия инвариантности боковой координаты по отношению к возмущению

$$W^{l}_{Y}+(W^{l}_{Y}W^{a}_{\psi}-W^{l}_{\psi}W^{a}_{Y})\,W^{\psi}_{k}W_{p}+W^{\psi}_{k}W_{p}W^{a}_{Y}W^{l}_{k}\equiv 0 \qquad (13)$$

определится передаточная функция корректирующего устройства $W^{l}_{k}(p)$, удовлетворяющего этому условию:

$$W^{l}_{k}(p)=\frac{W^{a}_{Y}W^{l}_{\psi}-W^{l}_{Y}W^{a}_{\psi}}{W^{a}_{Y}}-\frac{W^{l}_{Y}}{W^{\psi}_{k}W^{a}_{Y}W_{p}}=W_{k1}(p)-W_{k2}(p). \qquad (14)$$

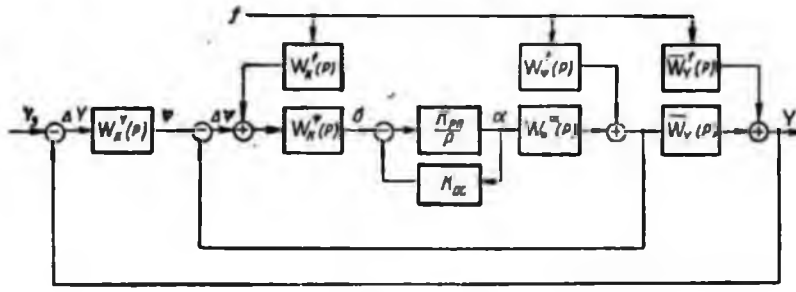

Рис. 3.

Передаточную функцию $W^{l}_{k}(p)$, как это видно из (14), можно представить в виде суммы двух слагаемых $W_{k1}(p)$ и $W_{k2}(p)$. Первое слагаемое с учетом выражений (4) и (5) после преобразований запишется

$$W_{k1}(p)=\frac{K_{k1}(T_{k1}p+1)(T'_{k1}p+1)}{(T_{1}p+1)(T_{2}p+1)(T_{1y}p+1)(T_{2y}p+1)}. \qquad (15)$$

Реализация такого звена не представляет никаких трудностей, так как порядок знаменателя выше порядка числителя. Для второго слагаемого передаточная функция примет вид

$$W_{k2}(p)=\frac{k'_{k2}(T'_{1y}p+1)(T'_{2y}p+1)}{(T_{1y}p+1)(T_{2y}p+1)W_{p}W^{\psi}_{k}}. \qquad (16)$$

Выполнения условия абсолютной инвариантности можно было бы достичь, если бы точку приложения выходного сигнала корректирующего устройства $W_{k2}(p)$ можно было перенести на выход рулевого привода, т. е. непосредственно на руль судна. В этом случае в передаточной функции (16) исчезнут члены $W_{p}(p)$ и $W^{\psi}_{k}(p)$ и она станет реализуемой. Однако для этого корректирующее устройство должно иметь свою силовую часть, способную воздействовать на руль, что нереально. Если пренебречь инерционностью элементов рулевого привода и считать, что

$$W_{p}(p)\cong\frac{k_{pn}}{p+k_{pn}k_{oc}}=\frac{k_{p}}{T_{p}p+1}, \qquad (17)$$

а также не учитывать инерционности корректирующего устройства в канале курса

$$W^{\psi}_{k}(p)=k^{\psi}_{k}(T^{\psi}_{k}p+1), \qquad (18)$$

передаточная функция (16) примет вид

$$W_{k2}(p) = \frac{k_{k2}(T'_{1y}p+1)(T'_{2y}p+1)(T_{\rho}p+1)}{(T_{1y}p+1)(T_{2y}p+1)(T^{\psi}_{k}p+1)}. \qquad (19)$$

Здесь порядок числителя не превышает порядка знаменателя, поэтому такая связь может быть реализована.

ВЫВОДЫ

1. Для судна с одним органом управления условие абсолютной инвариантности по отношению ко всем возмущениям физически не реализуемо.

2. По отношению к возмущениям, поддающимся измерению, условие абсолютной инвариантности может быть выполнено, если корректирующий контур по возмущению будет иметь собственную силовую часть для воздействия на руль направления или на дополнительный орган управления. Этим, дополнительным, органом управления могут быть, в частности, подруливающие устройства.

3. Замена в выражениях (11) и (16) идеальных дифференциаторов реальными, обладающими достаточно малой инерционностью, позволяет приближенно, но вполне достаточно для практики, выполнить условие инвариантности.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Басин. Теория устойчивости на курсе и поворотливости судна. Гостехиздат. М.-Л., 1949.

2. Современные методы проектирования систем автоматического управления (под ред. Б. Н. Петрова и др.). Изд-во «Машиностроение», 1967.

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ ВЫБОРА ШКАЛЫ РАБОЧИХ ЧАСТОТ

Ю. П. Жураковский, В. И. Сапрыкин

Киев

Для обеспечения надежной и достоверной передачи многочастотных сигналов в частотных и частотно-временных системах передачи дискретной информации большое значение имеет выбор шкалы рабочих частот.

Рассмотрим выбор шкалы частот с учетом действия сосредоточенных помех, имея в виду следующее.

1. Задана ширина полосы пропускания канала связи $\Delta F = f_в - f_н$, где $f_в$ — верхняя, $f_н$ — нижняя частота, причем в этой полосе ΔF и должна быть обеспечена передача частотных сигналов.

2. Задана ширина полосы пропускания Δf частотных избирателей.

3. Исключено влияние второй и третьей гармоник передаваемых частот, а также комбинационных частот вида $f_j \pm f_n$; $2f_j \pm f_n$, где $j \neq n$, f_j, f_n — рабочие частоты. Опасность появления помех данного вида возникает при одновременной передаче двух частотных сигналов в одной посылке и при значительной нелинейности тракта передачи.

4. Учтено, что в рабочей полосе канала связи некоторые частоты f_t уже использованы ранее для других целей.

При разработке алгоритма выбора шкалы рабочих частот руководствовались следующими эвристическими соображениями. Если разделить заданную полосу пропускания канала связи на два диапазона

$$\text{I} — f_н \div 0{,}5f_в;$$

$$\text{II} — 0{,}5f_в \div f_в,$$