

УДК 629.12 – 531.3

М.И. Фейгин

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ УПРАВЛЯЕМОСТИ СУДНА ПРИ ВЕТРЕ

Предлагаемый подход можно применять при использовании диаграммы в качестве исходной составляющей интеллектуального алгоритма авторулевого для дальнейшего точного установления параметров управления в натуральных условиях, а также в прогнозировании случаев потери управляемости судном при ветре.

Ключевые слова: движение судна, ветровое воздействие, расчет диаграммы управляемости.

Проблема управляемости судна при ветре включает несколько направлений, прежде всего это теоретическое исследование зарождаемости диаграммы управляемости при переходе от безветрия к слабому ветру и ее эволюции по мере увеличения скорости ветра. Существенное значение здесь имеет бифуркационный подход к установлению типов стационарных решений (движение в прямолинейном направлении, циркуляция, ветровые автоколебания) и условий их сосуществования и устойчивости. Другое направление связано с построением и исследованием диаграммы управляемости, включающим решение достаточно сложной системы трансцендентных уравнений [1, 2].

Не менее важной представляется прикладная сторона проблемы. Она включает подходы к приближенному построению диаграммы и применению знаний общей качественной картины поведения судна при ветре к конкретному судну в изменяющихся условиях плавания. Другими словами, необходимо разработать надежный интеллектуальный алгоритм авторулевого, способный адаптироваться к условиям и выполнять необходимые маневры [3].

Диаграмма управляемости судна при ветре определена как зависимость угла курса ψ установившихся движений судна в прямолинейном направлении от угла перекладки руля U при определенном отношении скорости истинного ветра V_i к скорости судна. Типичная диаграмма управляемости при $V_i > 1$ приведена на рис.1. Координаты критических точек, выделенных кружками, обозначены $U_j^{kr}, \psi_j^{kr}, j=1,2,\dots,6$. Точки пересечения диаграммы с осью ординат обозначены $\psi_1^0, \psi_2^0, \dots, \psi_7^0$. При любом V_i строго попутному ветру соответствует $\psi = 0, 2\pi$, а встречному – $\psi = \pi$. Следовательно, три точки остаются неизменными:

$$\psi_1^0 = 0, \quad \psi_4^0 = \pi, \quad \psi_7^0 = 2\pi. \quad (1)$$

При определении других точек пересечения будем полагать симметричными по отношению к критическим точкам участки диаграммы управляемости, расположенные слева и справа от оси ординат, а расположенные в верхней и нижней половине диаграммы – зеркально симметричными относительно горизонтальной линии $\psi = \pi$. Тогда координаты остальных четырех точек пересечения диаграммы с осью ординат равны

$$\begin{aligned} \psi_2^0 &= 2\psi_1^{kr}, & \psi_3^0 &= 2\psi_3^{kr} - \pi, \\ \psi_5^0 &= 2\pi - \psi_3^0, & \psi_6^0 &= 2\pi - \psi_2^0. \end{aligned} \quad (2)$$

Если известны координаты точек U_j^{kr}, ψ_j^{kr} , определенные или методом исследования исходной системы уравнений движения судна при ветре или в результате натуральных испытаний, процедуру построения диаграммы управляемости можно существенно упростить. Рассматриваемый далее подход применим при использовании диаграммы в качестве интеллек-

туальной составляющей алгоритма авторулевого, а также в прогнозировании случаев потери управляемости судном при ветре.

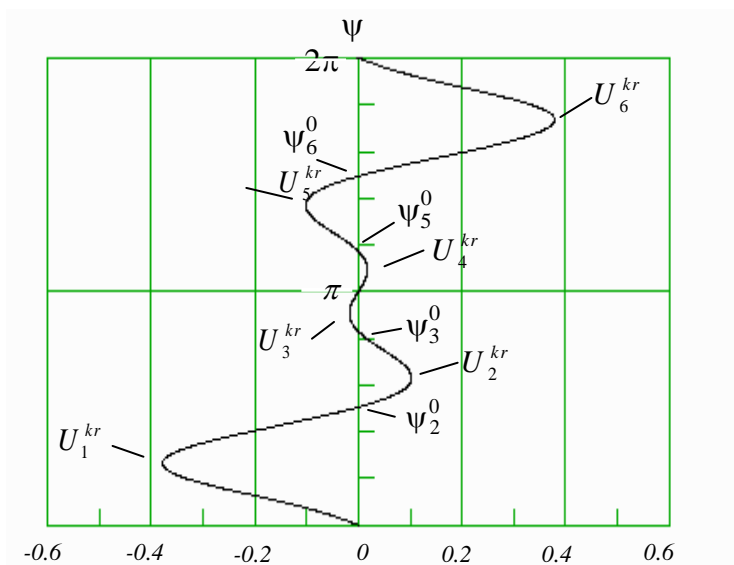


Рис. 1

1. Интерполяционная формула. Для любого из участков диаграммы в качестве интерполяционной формулы принимаем синусоиду с показателем степени $a > 1$. Вершина синусоиды совпадает с критической точкой

$$U = U_i^{kr} \sin^a \left(\frac{\pi(\psi - \psi_i^0)}{\psi_{i+1}^0 - \psi_i^0} \right). \quad (3)$$

При увеличении a участок диаграммы в окрестности критической точки сужается сильнее. Достаточно хорошее приближение к точно построенным диаграммам получается при $a = 1.5$. Это видно из приведенных на рис. 2 диаграмм управляемости неустойчивого в безветрии судна. Значения скорости ветра выбиралось с целью иллюстрации частичной потери управляемости в интервалах угла курса прямолинейного движения судна, когда критический угол поворота руля становится равным максимально допустимому.

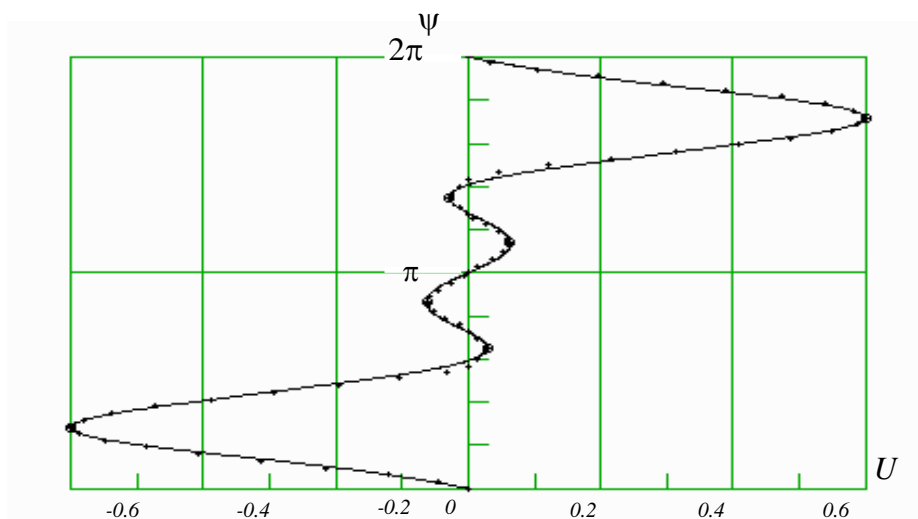


Рис. 2

Таким образом, построение диаграммы по формулам (1)–(2) не представляет сложности, если для каждого значения V_i известны соответствующие критические точки.

2. Расчет критических точек. Следующий шаг – это упрощение расчетов критических точек. Будем полагать, что путем решения соответствующей системы уравнений или в процессе натурных измерений получены координаты критических значений для трех скоростей истинного ветра V_{i1} , V_{i2} , V_{i3} .

$$U_{1j}, \psi_{1j}, U_{2j}, \psi_{2j}, U_{3j}, \psi_{3j} \quad (j=1, 2, \dots, 6). \quad (4)$$

Тогда для расчета критических точек на всем интервале V_i можно воспользоваться интерполяционной формулой Лагранжа для полинома второй степени

$$U_j(V_i) = f_1(V_i)U_{1j} + f_2(V_i)U_{2j} + f_3(V_i)U_{13}, \quad (3)$$

$$\psi_j(V_i) = f_1(V_i)\psi_{1j} + f_2(V_i)\psi_{2j} + f_3(V_i)\psi_{13}, \quad (4)$$

$$f_1(V_i) = \frac{(V_i - V_{i2})(V_i - V_{i3})}{(V_{i1} - V_{i2})(V_{i1} - V_{i3})}, \quad (5)$$

$$f_2(V_i) = \frac{(V_i - V_{i1})(V_i - V_{i3})}{(V_{i2} - V_{i1})(V_{i2} - V_{i3})}, \quad (6)$$

$$f_3(V_i) = \frac{(V_i - V_{i1})(V_i - V_{i2})}{(V_{i3} - V_{i1})(V_{i3} - V_{i2})}. \quad (7)$$

Результаты строго аналитических зависимостей и расчета по интерполяционным формулам (3)–(6) приведены на рис. 3 и рис. 4.

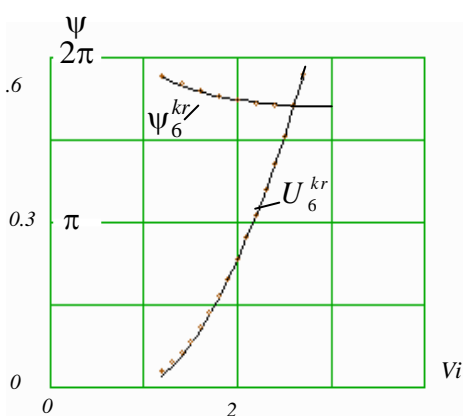


Рис. 3

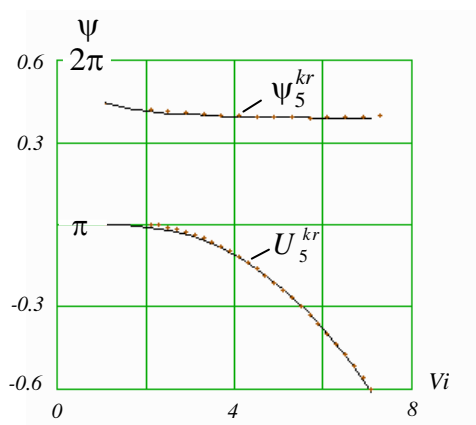


Рис. 4

3. К прогнозированию потери управляемости. Как видно из рис. 3 и рис. 4, значения ψ_6^{kr} и ψ_5^{kr} (следовательно, и симметричные им ψ_1^{kr} и ψ_2^{kr}) с ростом V_i и приближением к ситуации потери управляемости практически не изменяются.

Таким образом, в соответствии с (1) можно считать неизменными значения ψ_2^0 и ψ_6^0 . Будем полагать, что указанные опорные точки для наиболее существенных участков диаграммы известны. Тогда приближенная формула (2) участка диаграммы позволяет оценивать величину соответствующего критического угла путем периодических измерений в натуральных условиях установившихся значений углов курса ψ и перекладки руля U :

$$U_1^{kr} \approx U / \sin^a \left(\frac{\pi \psi}{\psi_2^0} \right). \quad (8)$$

По степени приближения U_1^{kr} к предельному значению U_{\max} можно судить о приближении потенциально аварийной ситуации потери управляемости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 04-01-00815.

Библиографический список

1. **Фейгин, М.И.** Зарождение и эволюция диаграммы управляемости судна при ветре // Вестник ВГАВТ. Межвузовская серия: Моделирование и оптимизация сложных систем. 2005. Вып. 14. С. 9–17.
2. **Фейгин, М.И.** К построению диаграммы управляемости судна при ветре в натуральных условиях / М.И. Фейгин, А.В. Попов // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления: тез. докл. IX Международного семинара. – М.: ИПУ РАН. 2006. С. 134–146.

Дата поступления
в редакцию 15.10.2010

M.I. Feigin

COMPUTATION OF THE CONTROLLABILITY DIAGRAM FOR A SHIP SUBJECT TO THE ACTION OF A WIND

We propose a method to approximately compute the controllability diagram for a ship subject to the action of a wind. This approximate controllability diagram is then used as the input in the self-learning algorithm that in-situ defines the parameters for safe ship auto-piloting. The abovementioned approach is also effective in forecasting controllability loss of a ship.

Key words: ship motion, wind influence, computation of controllability diagram.