

УДК 62-531

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ И ПРЕДОТВРАЩЕНИИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПО ПРИЧИНЕ «ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА», ПОРОЖДАЕМЫХ ТРЕКАМИ БИФУРКАЦИОННОЙ ПАМЯТИ У НЕУСТОЙЧИВЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ

М.И.Фейгин

Волжская государственная академия водного транспорта, Россия, Нижний Новгород

Аннотация. В работе введен в рассмотрение показатель эффективности управления. В процессе выполнения штатных маневров этот показатель определяется после очередной перекладки руля, запоминается и сравнивается с предыдущим. При спаде управляемости осуществляется ее восстановление путем автоматической коррекции угла перекладки руля.

Ключевые слова: управляемость, эффект бифуркационной памяти, критический угол, показатель эффективности управления.

Анализируя транспортные катастрофы можно выделить случаи, когда в процессе выполнения штатных маневров имеет место потеря управляемости и происходит столкновение или посадка на мель судов, столкновение подлодки с дном, столкновение самолета с поверхностью земли или моря. Одной из причин подобных случаев у судов является изменение путевых условий, приводящие к увеличению критического угла перекладки руля. Подобные ситуации достаточно хорошо исследованы.

Наряду с этим в ряде случаев причины катастроф связывают с «человеческим фактором». Но если человеческий фактор имел место у летчика высочайшей квалификации генерала Абакидзе, это говорит о возможном существовании неизвестных ранее динамических особенностей поведения высокоманевренных управляемых систем.

Исследованиями динамики «проектно» неустойчивых на прямом курсе судов установлена возможность резкого спада управляемости при изменении внешних условий, вызванного эффектом бифуркационной памяти и, в частности, зарождения треков бифуркационной памяти [1-4]. Если при выполнении штатного маневра координаты состояния судна оказываются в окрестности трека, то при увеличении критического угла всего на 15-20% максимальное отклонение траектории судна может увеличиться в несколько раз [4-5].

В работе введен в рассмотрение показатель эффективности управления. В процессе выполнения штатных маневров этот показатель определяется после очередной перекладки руля, запоминается и сравнивается с предыдущим. При спаде управляемости осуществляется ее восстановление путем автоматической коррекции угла перекладки руля.

Рождение треков бифуркационной памяти

Для описания движения судна принимаем следующую систему уравнений в безразмерной форме [6]:

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= a\omega + b\beta + s_1 U, \\ \dot{\beta} &= c\omega + d\beta + h\beta|\beta| + s_2 U, \\ \dot{\psi} &= \omega, \\ \dot{x} &= \cos(\psi - \beta), \\ \dot{y} &= \sin(\psi - \beta). \end{aligned} \quad 1)$$

Здесь x, y – координаты центра тяжести судна, ψ – угол курса, ω – угловая скорость, β – угол дрейфа между линейной скоростью центра тяжести и продольной осью симметрии судна, U – параметр управления, равный углу отклонения пера руля. Путь, проходимый судном за единицу безразмерного времени, равен длине корпуса. Фазовое пространство системы (1) пятимерно. Однако изучаемые характерные особенности динамического поведения определяются двумя координатами – ω, β .

Рассмотрим эволюцию фазового портрета и бифуркационные ситуации в зависимости от параметра U . При $U = 0$ всегда существует решение, соответствующее режиму движения судна прямым курсом $\omega_* = 0, \beta_* = 0$. Если значение

$$\Delta = ad - bc > 0,$$

указанное решение единственное типа устойчивого узла. При $\Delta = 0$ рождаются еще две особые точки – устойчивый узел и седло. Решение $\omega_* = 0, \beta_* = 0$ для случая $U = 0$ сохраняется, но становится неустойчивым. Высокоманевренные суда, как правило, являются неустойчивыми на прямом курсе ($\Delta < 0$). Для них в зависимости от параметра U возможны два варианта стационарных решений. Если отклонение руля меньше так называемого критического $U_{кр}$ (или бифуркационного U_{bif}) значения

$$|U| < U_{bif} = \frac{\Delta^2}{4|\Delta_0 ah|}, \quad \Delta_0 = as_2 - cs_1, \quad (2)$$

то уравнения (1) определяют три особые точки: две устойчивых типа узел и неустойчивую седлового типа. При $|U| = U_{bif}$ происходит слияние седла с одним из узлов

$$\beta_*^0 = -\frac{\Delta}{2ah} \operatorname{sgn}(U), \quad \omega_*^0 = -\frac{b}{a} \beta_*^0 - \frac{s_1 U_{bif}}{a} \operatorname{sgn}(U). \quad (3)$$

Вырожденная особая точка (3) исчезает с дальнейшим ростом $|U|$. Если $|U| > U_{bif}$, то существует единственная особая точка, соответствующая устойчивому узлу (рис.1).

$$\beta^0 = \left| \frac{\Delta}{2ah} \right| \operatorname{sgn}(k)(1 + \sqrt{1 + |k|}), \quad \omega^0 = -\frac{b}{a} \beta^0 - \frac{s_1 U_{bif}}{a} k, \quad (4)$$

$$k = \frac{U}{U_{bif}} > 1.$$

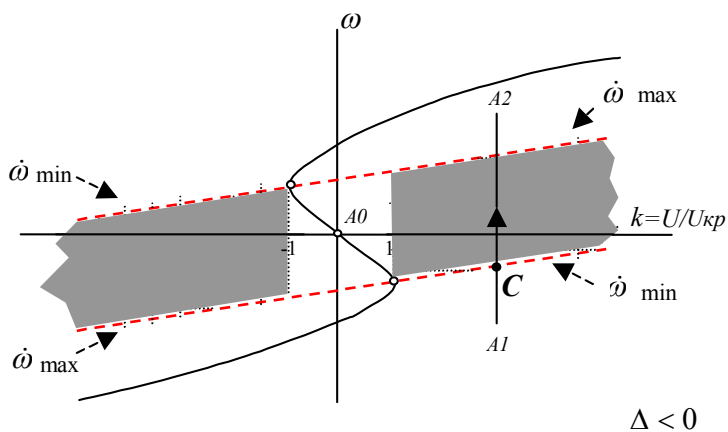


Рис.1 Потеря управляемости при маневрировании

Рассмотрим штатный маневр, состоящий из трех последовательных переключений руля U_1, U_2, U_3 с одного борта на другой. Во всех случаях угол переключения $|U_i| > U_{bif}$. Первая переключенка $U_1 > U_{bif}$ производится на участке прямолинейного движения, соответствующего состоянию $\omega_1 = \beta_1 = 0$. Когда угловая скорость $\omega(t)$ достигнет некоторого значения $\omega_2 > 0$, происходит следующее отклонение руля $U_2 < -U_{bif}$ для одерживания судна и поворота его в обратную сторону. Заключительная переключенка $U_3 > U_{bif}$, необходимая для восстановления курса судна, происходит при $\omega(t) = \omega_3 < 0$. При начальных условиях $\omega_1 = \beta_1 = 0$ маневр однозначно определяется пятью параметрами: $U_1, \omega_2, U_2, \omega_3, U_3$.

Исследование проводилось с учетом конечной скорости переключенки руля (рис.2,5). Система дифференциальных уравнений (1) дополнялась еще одним уравнением, моделирующим работу рулевого привода ($0.2 < |R| < 0.7$)

$$\begin{aligned} \dot{U} &= RU_i / |U_i|, \quad \text{если } |U(t)| < |U_i|, \\ \dot{U} &= 0, \quad \text{если } |U(t)| > |U_i|. \end{aligned} \quad (5)$$

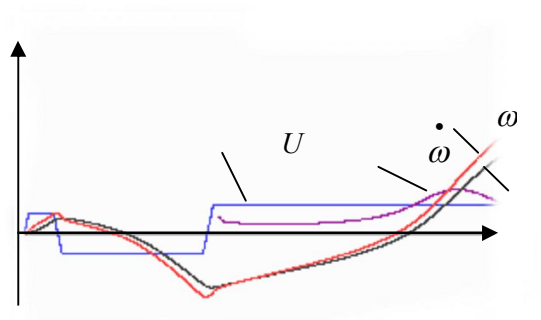


Рис.2

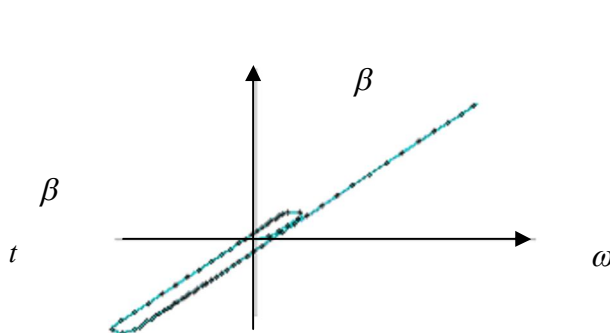


Рис.3

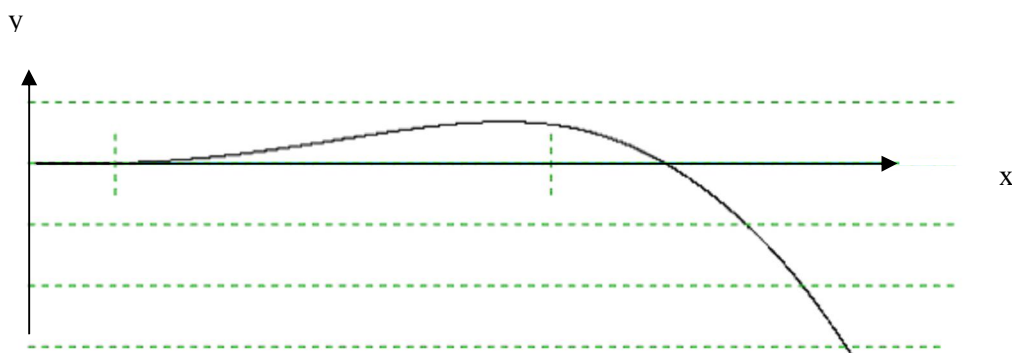


Рис.4

Для существования состояний судна с экстремальными значениями углового ускорения на третьем участке фазовой траектории достаточно, чтобы этот участок проходил через фазовое пятно, пересекая треки бифуркационной памяти (на рис. 1 он помечен токами $A_1 A_2$). Это произойдет, если определяющее момент третьей перекладки руля значение ω_3 удовлетворяет условию $\omega_3 < \omega_c$, где ω_c – координата расположенного на фазовой траектории центра пятна – точки C .

Опуская соответствующие математические выкладки, приведем окончательный результат анализа рассматриваемого маневра судна. Наиболее существенный параметр управления ω_3 , который «переключает» маневр на третий участок должен удовлетворять условию

$$\omega_3 < \omega_c = -\frac{b(ad - bc)}{2a^2h} + \frac{s_1}{a + d} \left(U_2 - \frac{d}{a} U_3 \right). \quad (6)$$

Как показало моделирование, два параметра U_1, U_2 , определяющие начальную стадию маневра, могут задаваться одинаковыми для всей группы рассматриваемых судов. Были приняты следующие значения: $U_1 / U_{bif} = -U_2 / U_{bif} = 1.1$. Параметр ω_2 , определяющий момент второй перекладки руля при выполнении условия $\omega(t) = \omega_2$, выбирался в диапазоне $0.035 < \omega_2 < 0.12$. Интервалы значений параметра ω_3 удовлетворяли условию (6).

В качестве конкретных моделей принимались типы судов, для которых известны коэффициенты уравнений (1). Ниже изложены результаты исследования неустойчивого судна, динамические коэффициенты которого приведены в [6]:

$$a = -4.55, \quad b = 5.51, \quad s_1 = 1.26, \quad c = 0.683, \quad d = -0.476, \quad h = -2.27, \quad s_2 = 0.124.$$

Для указанных выше коэффициентов критический угол перекладки руля, определяемый по соотношению (2), равен

$$U_{bif} = 0.0433.$$

На рис.2-4 приведены результаты моделирования для судна с динамическими коэффициентами (6) при $\omega_3 = -0.14$, $U_3 / U_{bif} = 1.6$, $R=0.2$. На приведенном на рис.2 участке кривой $\dot{\omega}(t)$ отчетливо видно существование течек минимума и максимума. На рис. 3 приведена фазовая траектория с нанесением отметок времени через постоянные интервалы (стробоскопические метки). На ней четко видны участки сгущения и разрежения этих меток, что вызвано существованием экстремумов углового ускорения на рассматриваемом участке траектории. Траектория центра тяжести судна $y(x)$ приведена на рис. 4. Значения координат x , при которых происходит перекладка руля и переход судна с одного участка маневра на следующий, помечены пунктиром. На третьем участке маневра происходит резкий спад управляемости и аварийный уход судна из допустимой зоны маневрирования.

Прогнозирование и автоматическая коррекция угла перекладки руля

Для осуществления прогнозирования в процессе маневрирования периодически определяется показатель управляемости как функция углового ускорения и некоторых параметров p

$$PU_i = F(\dot{\omega}, p)$$

На рис.7 приведены значения показателей PU_1 , PU_2 и PU_3 . Спад управляемости $SU_{i,i+1}$ имеет место, если отношение предыдущего показателя к последующему

$$SU_{i,i+1} = ABS(PU_i / PU_{i+1}) > 1$$

В рассмотренном выше маневре $SU_{12} = 0.202$, $SU_{23} = 3.765$. Следовательно, произошел спад управляемости почти в четыре раза. Для ее восстановления во столько же раз автоматически увеличивается угол перекладки руля. На рис.5-7 приведены результаты моделирования рассматриваемого маневра с автоматической коррекцией угла перекладки руля.

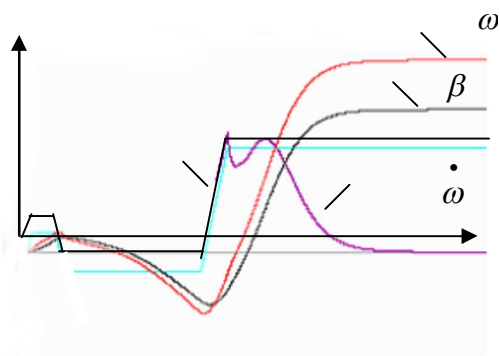


Рис.5

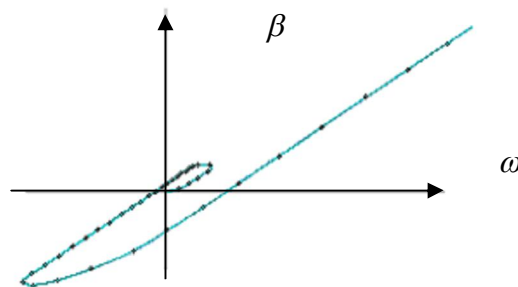


Рис.6

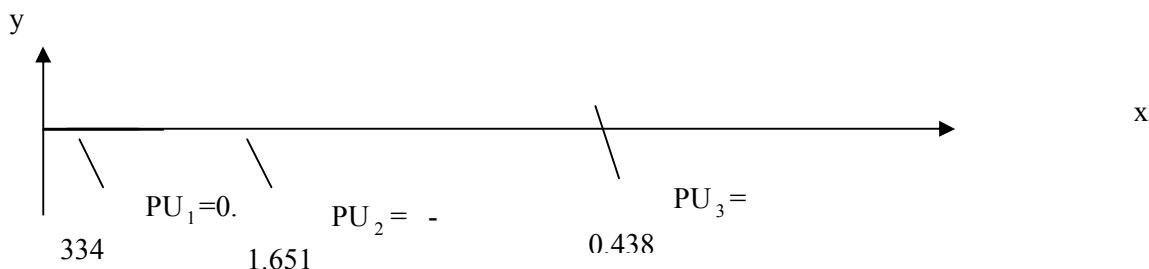


Рис.7

В заключение отметим, что многократные успешные проведения штатных маневров могут привести к «автоматизму» их выполнения и стать одной из причин «человеческого фактора» в катастрофах судов, подводных лодок и самолетов.

Литература

1. Feigin M.I. Effects of bifurcation memory in the controlled dynamical systems. Progr. in nonlinear science. Int. conf. Dedicated to the 100th Anniver. of A.A.And ronov. N- Novgorod, Russia, 2002, 40-53

2. Фейгин М.И., Каган М.А. Универсальная характеристика показателя потери управляемости судов, вызванной эффектом бифуркационной памяти. Вестник ВГАВТ, серия «Моделирование и оптимизация сложных систем», 2002, вып.1. 8-13

3. Фейгин М.И. К определению косвенным методом критического угла перекладки руля в натуральных условиях // Вестник ВГАВТ, Межвузовская серия «Моделирование и оптимизация сложных систем», 2004, вып.9, 9-14

4. M.I.Feigin, Kagan M.A. Emergencies as a manifestation of the effect of bifurcation memory in controlled unstable systems // International Journal of Bifurcation and Chaos. World Scientific Publishing Company, Vol.14, No.7 (2004).2439-2447.

5. Фейгин М.И. К прогнозированию аварийных ситуаций при автоматизации судовождения, порождаемых нелинейным эффектом бифуркационной памяти // Тезисы докладов VII Международного семинара «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления». М.ИПУ им. Трапезникова РАН, 2004, 184-186.

6. Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля - Л.: Судостроение, 1973.

Поступила: 12.06.09.