УДК 681.586

Михайленко В.С.
ОГАХ – ОНМА

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА С НАБЛЮДАТЕЛЕМ ПРИ НАХОЖДЕНИИ ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Значительную часть рейса современные морские суда проводят в режиме автоматического управления движением по заданному курсу. Ошибки на этом этапе приводят к отклонениям от линии маршрута, возникновению риска выхода судна за границы безопасной зоны или фарватера, увеличению проходимого пути, снижению ресурса рулевой машины, перерасходу топлива и т.д. Это, в свою очередь, влияет на технико - экономические показатели рейса, уменьшая его прибыль и снижая надежность работы оборудования. Эффективность управления курсом зависит, от того, насколько полно и оперативно в модели управления осуществляется учет внешних воздействий и изменений динамики самого судна (параметрических возмущений) [1].

Стохастичность и непрогнозируемость данных воздействий т.е. их неопределенность, а также большая инерционность самого судна, усложняют решение этой проблемы традиционными методами теории управления [2], особенно в сложных погодных условиях. В этой связи привлечение новых теорий и методов управления для повышения эффективности и безопасности управления движением морских судов оправданно и своевременно [3 – 7].

Вопросам управляемости судов на курсе, которую обеспечивает авторулевой, посвящено большое количество исследований. Так, в работе [3] отмечается, что судно является сложным многосвязным объектом управления с существенно нелинейной динамикой, подверженной неконтролируемым возмущениям. Используемый в большинстве судовых авторулевых, ПИД-регулятор позволяет удовлетворительно управлять судном лишь в определенных режимах (удержание на заданном прямом курсе в тихую погоду, небольшие циркуляции и др.) и к тому же требует ручной настройки коэффициентов управления. Для решения проблемы ручной настройки были разработаны и внедрены адаптивные авторулевые [3], однако используемые в них эталонные модели судна также оказываются адекватными объекту управления лишь для какого-то определенного режима плавания. В столь сложных для классической теории управления условиях рядом исследователей [7] было предложено применить методы теории оптимального управления.

Следовательно, возникает задача определения оптимальных значений настроек ПИД-регулятора в условиях действия на объект неопределенных или неконтролируемых возмущений.

В настоящей работе ставится **цель** оценить работоспособность модальной САР с наблюдателем и проанализировать ее возможность эффективно решать задачу управления движением судна. Таким образом, *предметом исследования* является анализ эффективности адаптивной модальной САР с наблюдателем при нахождении объекта (судна) в условиях неопределенности.

При этом необходимо *решить следующие задачи*:

1. Произвести расчет значений параметров модального ПИД-регулятора для объекта в виде инерционного звена второго порядка;
2. Определить значения коэффициентов наблюдателя;
3. Рассчитать значение корректирующего элемента в САР;
4. Провести анализ спроектированной САР на устойчивость при влиянии сигнальных воздействий (изменение задания) и параметрического возмущения (изменение значений передаточной функции объекта на 10 – 50 %).

Известно, что объект управления в пространстве состояний описывается векторно-матричными уравнениями вида:

$$\dot{X}(t) = A\,X(t) + B\,U(t), \tag{1}$$

$$Y(t) = C\,X(t), \tag{2}$$

где A, B, C – матрицы коэффициентов размерности ($n \times n$), ($n \times m$), ($r \times n$) соответственно; m – число входов; r – число выходов; $U(t)$ – вектор-функция управляющих воздействий размерности m; $X(t)$ – вектор-функция переменных состояния размерности n (n – порядок объекта управления); $Y(t)$ – вектор-функция выходных сигналов размерности r. Случай r=m=1 соответствует одномерному объекту. Для одномерных систем переход от передаточной функции вида

$$W(s) = \frac{b_{n-1}s^{n-1} + \ldots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \ldots + a_1 s + a_0},$$

к представлению в переменных состояниях может быть осуществлен по формулам:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \ldots & -a_{n-1} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad C = [b_0; b_1; \ldots; b_{n-1}].$$

Для объекта, заданного уравнениями состояния (1, 2), управление по состоянию описывается выражением $u(t)$ = -$KX(t)$, где K – вектор коэффициентов обратной связи.

Таким образом, система, замкнутая регулятором, приводится к следующему виду:

$$\frac{dX(t)}{dt}=(A-BK)X(t).$$

Дж. Аккерманом [7] была предложена формула для нахождения коэффициентов K:

$$K=[0..0...0...1]\cdot[B..AB..AB^2...A^{n-1}B]^{-1}\times[A^n...\beta_{n-1}A^{n-1}...\beta_1A...\beta_0],$$

где βi – коэффициенты характеристического полинома матрицы (A–BK). Задача модального синтеза сводится к выбору желаемых корней характеристического полинома замкнутой системы, при которых обеспечиваются заданные параметры переходного процесса.

Метод модального управления предполагает, что все компоненты вектора состояния X могут быть измерены. Однако на практике некоторые компоненты могут быть неизвестны по ряду причин: измерительных приборов может быть недостаточно; некоторые компоненты вектора X могут не иметь физического смысла и т.д.

Однако если система является наблюдаемой, то все компоненты вектора X могут быть восстановлены по наблюдениям вектора Y. Система, описываемая матрицами A и C, является наблюдаемой, когда существует конечное время T такое, что начальное состояние $X(0)$ может быть определено в результате наблюдения выходной переменной $y(t)$.

Наблюдаемость системы описывается условием:

$$rank[C;..CA;..CA^2;....CA^{n-1}]^T=n.$$

Для системы с одним входом и одним выходом матрица управляемости имеет вид:

$$[C;..CA;..CA^2;...CA^{n-1}]^T.$$

Если детерминант этой матрицы отличен от нуля, то система наблюдаема.

Для того чтобы узнать все компоненты вектора состояния объекта, можно использовать его модель:

$$\frac{dX'(t)}{dt}=AX'(t)+BU(t),$$

где $X'(t)$ – оценка состояния объекта. Если начальное состояние объекта и модели совпадают и модель адекватна объекту, то можно полагать в любой момент времени, что $X'(t) = X(t)$.

Практически добиться полной адекватности объекта и модели невозможно. Поэтому на практике стремятся к выполнению условия:

$$\lim_{t \longrightarrow \infty} X'(t) = X(t).$$

Подобным свойством обладают асимптотические наблюдающие устройства, которые используют обратную связь по ошибке восстановления вектора состояния, так что работа наблюдающего устройства описывается уравнением:

$$\frac{dX'(t)}{dt} = AX'(t) + BU(t) + N(Y - CX'(t)), \tag{3}$$

где $\boldsymbol{N}$ – матрица параметров наблюдающего устройства. Общий вид системы управления с наблюдателем показан на рис. 1.

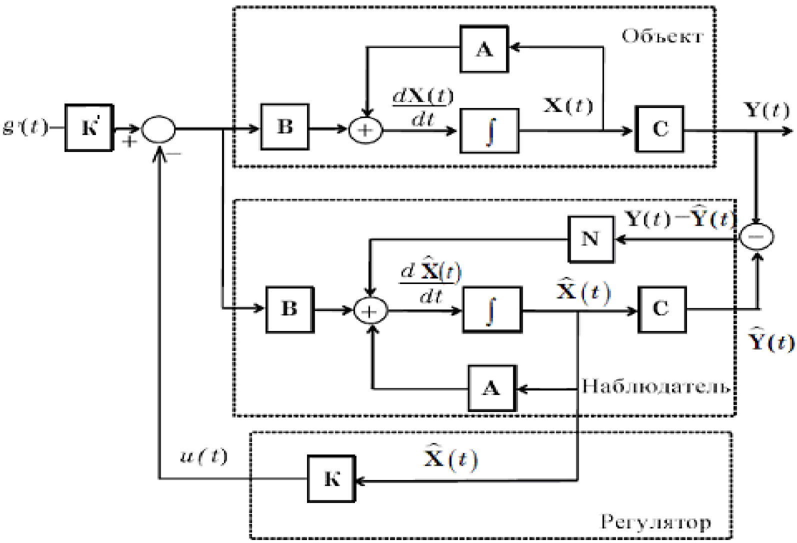

Рис. 1. Структура системы управления с наблюдателем

Параметры наблюдателя (N) (3) и параметры регулятора (K) могут рассчитываться независимо. Процессы в наблюдателе должны протекать более быстро, чем переходный процесс в системе. Установлено, что наблюдатель должен обладать быстродействием, в 2 – 4 раза превышающим быстродействие системы [7]. Следует заметить, что метод модального управления не гарантирует равенство установившейся ошибки нулю. Для обеспечения равенства задающего воздействия и выходного сигнала системы в установившемся режиме вводится масштабирующий коэффициент или корректирующее устройство k_0. Для анализа области устойчивости модального регулятора с наблюдателем рассчитывают настройки (K) и параметры наблюдателя (N) с помощью программы MatLab [8]. В качестве исследуемого объекта принимаем инерционное звено второго порядка вида: W = 10/ $12s^2 + 8s + 5$.

Используя операторы программы MatLab получим:

$$A = \begin{bmatrix} -0{,}67.....-0{,}42 \\ 1..............0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C = [0......0{,}83].$$

Желаемые полюса (предполагающие апериодический процесс) заданы вектором P = [-0,33 -0.55]. В пакете MatLab имеется функция acker, с помощью которой можно обеспечить желаемое расположение полюсов одномерной системы (в соответствии с формулой Аккермана): k = acker (A,B,P), где A и B – матрицы системы; P – вектор, задающий желаемое расположение полюсов системы. Расчеты указывают, что $K_{1,2} = 0{,}17$.

Таким образом, управление сформировано в виде:

$$U(t) = -KX(t) = -\ [0{,}17\ 0{,}17] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = -0{,}17\, x_1(t) - 0{,}17\, x_2(t).$$

Для определения значения корректирующего устройства k_0 запишем уравнение состояния в виде:

$$\begin{bmatrix} x'_1(t) \\ x'_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0{,}67.....-0{,}42 \\ 1..............0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} [\, u + k_0 g]. \qquad (5)$$

Подставляя в (5) уравнение (4) получим:

$$\begin{bmatrix} x'_1(t) \\ x'_2(t) \end{bmatrix} = [-0{,}84x_1 - 0{,}59x_2 + k_0 g]; \qquad (6)$$

$$y = CX = [0\ 0{,}83] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0{,}83\, x_2.$$

В установившемся режиме $x'_1 = x'_2 = x_1 = 0$ и выполняется условие $y = g = 1$, следовательно, из (4) следует, что $k_0 = 0{,}59$. На данное значение умножается сигнал задания.

Описанная выше функция acker может быть применена и для расчета коэффициентов обратных связей наблюдателя (N) исследуемой системы. Для этого надо транспонировать матрицу A и заменить B на C^T: N= acker(A',C',P). Программа выводит следующие значения: N = [0, 42; 4,01].

Для апробации полученных значений проведен компьютерный эксперимент в программе MatLab (Simulink) (рис. 2) с учетом рекомендаций рис. 1.

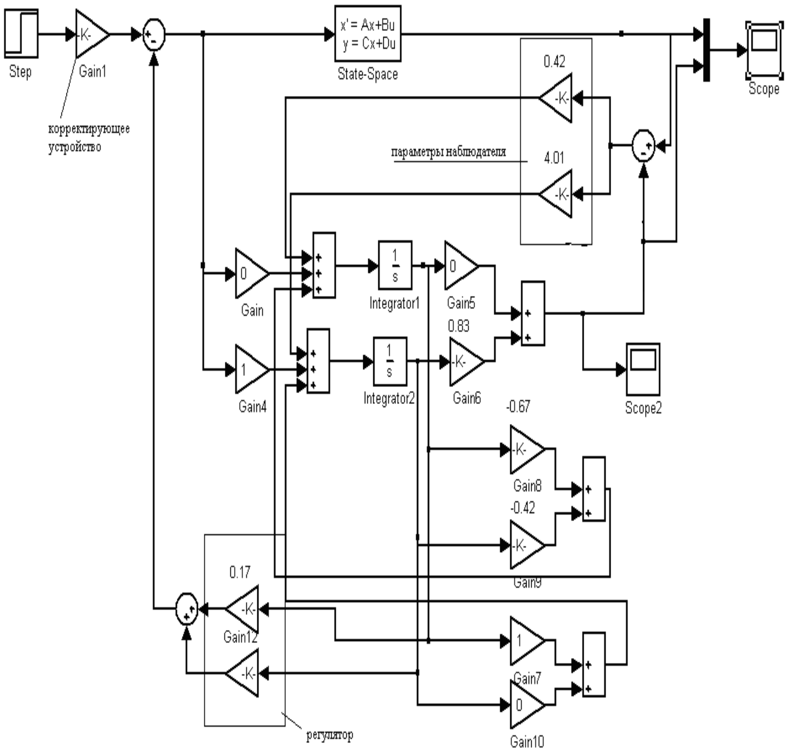

Рис.2. Модальный регулятор с наблюдателем и объектом второго порядка

Переходный процесс на выходе объекта показан на рис. 3.

Как видно из рис. 3 процесс является апериодическим, со временем регулирования $T_р$ = 9 с, что полностью соответствует ожидаемым условиям.

Для проведения анализа эффективности модальной САР с наблюдателем при управлении объектом в неопределенных условиях *проведен компьютерный эксперимент* в программе MatLab (Simulink), связанный с изменением значений параметров объекта (коэффициента усиления и постоянной времени в передаточной функции) в диапазоне 10 %. Новая передаточная функция объекта будет иметь вид:

$W(s) = 9/(11s^2 + 7s + 4)$. Или в виде пространства состояний:

$$A = \begin{bmatrix} -0{,}64 \ldots -0{,}36 \\ 1 \ldots\ldots\ldots 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 0 \ldots 0{,}82 \end{bmatrix}.$$

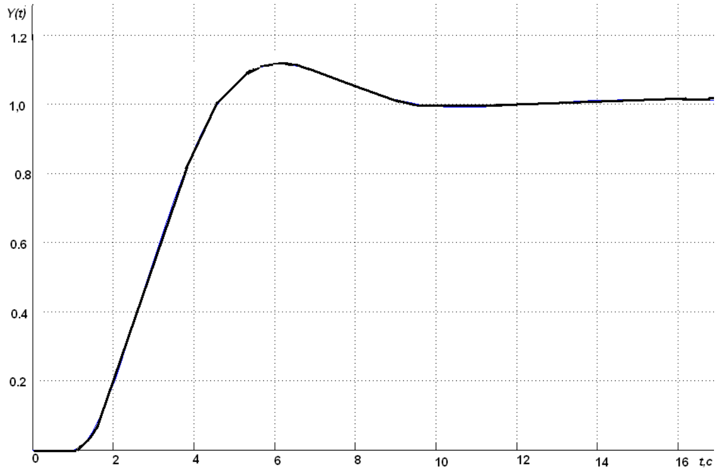

Рис. 3. Переходный процесс регулирования по каналу задания

Подставив данные значения в схему (см. рис. 2) без изменения значений параметров регулятора и наблюдателя получен переходный процесс, показанный на рис. 4.

Проверка САР на устойчивость при влиянии сигнальных воздействий в виде увеличения задания регулятору с 1 до 10, продемонстрировала способность регулятора компенсировать данное воздействие без наличия остаточной ошибки.

Заключение: Как видно из рис. 4, процесс обладает статической ошибкой (0,1) в пределах допустимой нормы. Дальнейшие исследования показали, что при увеличении значений параметра объекта до 50 %, наблюдается рост остаточной ошибки на 20 %, что указывает на необходимость перенастройки значений параметров ПИД-регулятора и наблюдателя. Также регулятор успешно компенсирует сигнальные воздействия. Таким образом, модальная САР с наблюдателем может быть эффективно использована в системах адаптивного управления при варьировании значений параметров объекта в пределах 10 %. А выход значений параметров объекта за установленный диапазон приводит к увеличению статической ошибки и необходимости пересчета значений настроечных параметров.

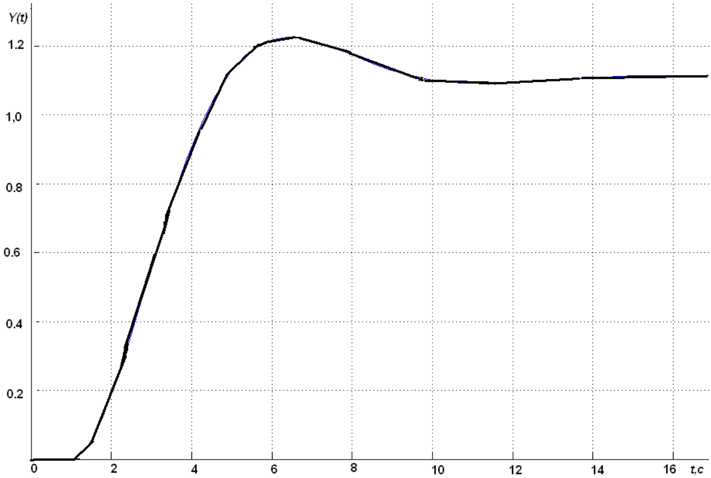

Рис. 4. Переходный процесс при изменении значений параметров объекта на 10 %

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подпорин С.А. Синтез гибридной системы управления движением судна на курсе: сб. науч. тр. – Севастополь, 2010. – Вып. 111. – С. 126 – 130.

2.Ротач В.Я. Теория автоматического управления. − М.: МЭИ, 2008 – 396 с.

3. Fossen T.I. Guidance and Control of Ocean Vehicles / T.I. Fossen. – New-York: John Wiley & Sons, 1994. – 494 p.

4. Подпорин С.А. Повышение эффективности автоматического управления движением судна на курсе в условиях волнения / С.А. Подпорин // Сб. науч. тр. СВМИ им. П.С. Нахимова. – Севастополь: СВМИ, 2008. – Вып. 1 (14). – С. 192 – 197.

5. Богданов В.И. Оптимизация параметров судового ПИД-регулятора с помощью генетического алгоритма/ В.И. Богданов, С.А. Подпорин// Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. – Севастополь, 2004. – Вып. 7. – С. 184 – 189.

6. Подпорин С.А. Интеллектуальный подход к настройке судового авторулевого / С.А. Подпорин // Сб. научн. тр. СВМИ им. П.С. Нахимова. – Севастополь: СВМИ, 2008. – Вып. 2 (15). – С. 9 – 15.

7. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. - М: Лаборатория базовых знаний, 2002. - 832 с.

8. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 778 с.