

Глазунов И.Е., к.т.н. (ОАО НПК «КГЗА им. Г.Петровского»)  
 Билак Н.В., Вовк В.Г., Литвинова О.В. (НАУ, Украина)

## СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ФИЛЬТРА-НАБЛЮДАТЕЛЯ В НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

*В работе приводится алгоритм и результаты выбора оптимальной структуры фильтра-наблюдателя выходного состояния реально существующего измерителя курса корабля. В процессе синтеза используется необходимая навигационная информация, полученная по результатам динамической аттестации исследуемой системы измерений.*

Необходимость решения задач оптимальной фильтрации полезных сигналов измерительных систем на фоне помех всегда возникает, например, в навигационных комплексах. Существуют такие ситуации, когда происходит не прямое, а косвенное измерение интересующих параметров в навигационных комплексах, причем параметры могут быть зашумлены как помехами задания программы, так и ее измерения. Последние носят стохастический характер и приводят к различным пространственным стохастическим отклонениям объекта от траектории и в ориентации. Успешное решение проблем максимизации [1] качества (точности) процессов навигации и управления движением объектов возможно лишь при условии создания на основе синтеза соответствующих оптимальных структур средств коррекции, например, фильтров-наблюдателей, для исследуемых изделий.

Методы [2] многомерной линейной оптимальной фильтрации позволяют находить наилучшие по точности структуры фильтров для решения разных задач навигационных измерений. Полученная уточненная навигационная информация может использоваться в дальнейшем для формирования законов замкнутого управления подвижным объектом, а также для ее отображения, контроля и восстановления качества управления объектом.

По результатам динамической аттестации измерителя курса водного подвижного объекта на стенде - имитаторе угловой «качки» корабля, близкой к натурной, возникающей в крейсерском движении «тяжелого» корабля, получены характеристики входа-выхода исследуемого тракта: спектральные и взаимные спектральные плотности сигналов курса (рысканья платформы стенда), выходные сигналы измерителя курса (акселерометра), которые в дальнейшем необходимы для решения таких задач:

- структурной идентификации моделей динамики системы (тракта) «входной курсовой сигнал платформы стенда  $\psi$  – выходной сигнал акселерометра  $\xi$  навигационной системы»;
- синтеза оптимальной структуры фильтра-наблюдателя курса корабля.

По результатам структурной идентификации исследуемого тракта получены спектральные плотности программного сигнала (истинного курса)  $S_{\pi}$  суммарной (приведенной на выход измерительного тракта « $\psi$ - $\xi$ ») помехи  $S_{\varphi\varphi}$ , а также частотная характеристика (передаточная функция) исследуемого тракта  $K(s)$ . После анализа полученных зависимостей и их редуцирования возможно записать более простые аналитические зависимости:

$$S_{\pi} = \frac{5}{\pi} \left| \frac{1}{(1,33^2 s^2 + 2 \cdot 0,2 \cdot 1,33s + 1)(0,09s + 1)} \right|^2, \text{ [град}^2 \cdot \text{с]}; \quad (1)$$

$$S_{\varphi\varphi} = \frac{0,018}{\pi} \frac{1}{|1,07s + 1|^2}, \text{ [В}^2 \cdot \text{с]}. \quad (2)$$

$$K_{\xi}(s) = 0,038(1,07s+1), \text{ [В/град]}; \quad (3)$$

Для наглядности представим ЛЧАХ и ЛФЧХ результатов структурной идентификации исследуемого тракта « $\psi$ - $\xi$ » –  $S_{\pi}$ ,  $S_{\phi\phi}$  и  $K(s)$  на рис. 1, 2, 3 соответственно.

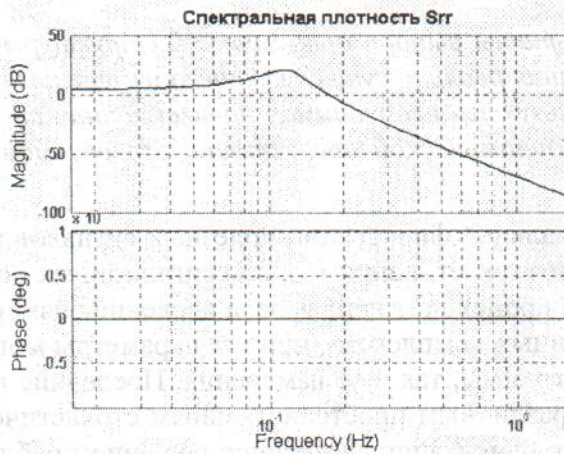


Рис. 1. Спектральной плотности программного сигнала (истинного курса)  $S_{\pi}$



Рис. 2. Спектральной плотности суммарной помехи тракта  $S_{\phi\phi}$

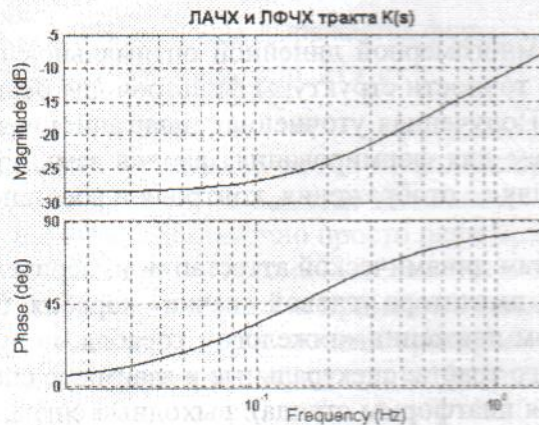


Рис. 3. Логарифмические частотные характеристики исследуемого тракта  $K(s)$ .

Как следует из модели (3) и рисунка (рис. 3), передаточная функция исследуемого тракта является «форсажное» (дифференцирующее) звено, при этом измеритель до частоты 0,1 Гц работает как усилительное звено, выше этой частоты как дифференциатор, т.е. реализует форсаж.

По результатам структурной идентификации исследуемого измерителя курса проведем синтез оптимальной структуры его фильтра-наблюдателя, и оценим какую точность можно получить в синтезируемой системе.

Задачу выбора оптимальной структуры фильтра-наблюдателя для исследуемого изделия решим как задачу винеровской оптимальной фильтрации. Для этого опишем известный [2] алгоритм фильтрации. Структурная схема системы фильтрации представлена на рис. 4.

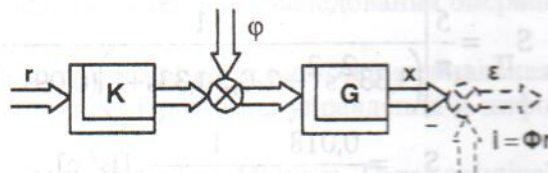


Рис. 4. Структурная схема системы фильтрации.

Здесь  $K$  – уже известная по результатам структурной идентификации матрица передаточных функций измерителя (3) вектора программных сигналов  $r$  (1), а модель динамики вектора сигналов помех  $\Phi$  (суммарной помехи) уже ранее определена по выражениям (2). Векторы  $r$  и  $\Phi$  – центрированные случайные процессы с известными спектральными и взаимными спектральными плотностями  $S_{rr}$ ,  $S_{r\Phi}$ ,  $S_{\Phi r}$  и  $S_{\Phi\Phi}$ . Функция  $\Phi$  желаемого преобразования входных сигналов  $r$  в выходной  $\hat{x}$  (в данном случае  $\Phi=E_n$ ). Здесь вектор  $\hat{x}$  – наилучшая точностная оценка вектора  $\xi$ ; сигнал  $\varepsilon$  –  $n$ -мерный вектор случайных ошибок измерений,  $G$  – искомая матрица передаточных функций фильтра-наблюдателя.

Как функционал системы используется показатель вида

$$e = M[\varepsilon'(t)R\varepsilon(t)] = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr}(S'_{\varepsilon\varepsilon} R) ds, \tag{4}$$

где  $S'_{\varepsilon\varepsilon}$  – транспонированная матрица спектральных плотностей ошибки системы;  $R$  – весовая положительно-определенная симметрическая матрица,  $tr$  – след матрицы,  $M$  – знак математического ожидания.

Как известно [2], алгоритм выбора оптимальной структуры  $G$  следующий:

$$G = \Gamma^{-1}(T_0 + T_+)D^{-1}, \tag{5}$$

где

$$\Gamma_*\Gamma = R; \quad DD_* = KS'_{rr}K_* + KS'_{\Phi r} + S'_{r\Phi}K_* + S'_{\Phi\Phi}; \tag{6}$$

$$T = T_0 + T_+ + T_- = \Gamma\Phi(S'_{rr}K_* + S'_{r\Phi})D_*^{-1}; \tag{7}$$

где  $\Gamma$  и  $D$  – результаты винеровской факторизации,  $T_0 + T_+ + T_-$  – результаты винеровской сепарации.

Вычисленная на компьютере по алгоритму (5)-(7) оптимальная структура фильтра-наблюдателя имеет вид

$$G = 11,23 \frac{(1,07s+1)(0,24s+1)(0,22^2s^2+2\cdot0,7\cdot0,22s+1)(0,03s+1)}{(1,27^2s^2+2\cdot0,5\cdot1,27s+1)(0,27^2s^2+2\cdot0,7\cdot0,27s+1)(0,05s+1)}, \text{ [град/В]} \tag{8}$$

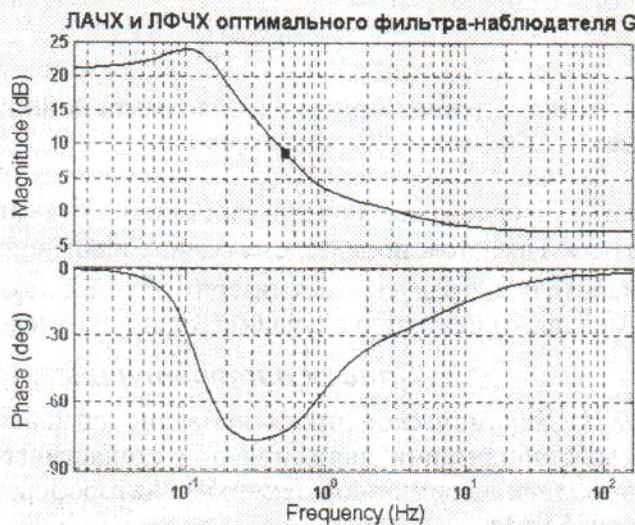


Рис. 5. Логарифмические частотные характеристики оптимального фильтра-наблюдателя.

На рисунке (рис. 5) показаны ЛАЧХ и ЛФЧХ оптимального фильтра-наблюдателя G. Аппроксимировав графическую зависимость (рис.5), составим редуцированную передаточную функцию фильтра как

$$G \approx 11,23 \left| \frac{1,6^2 s^2 + 2 \cdot 1,6s + 1}{0,16^2 s^2 + 2 \cdot 0,6 \cdot 0,16s + 1} \right|^2, \text{ [град/В]} \quad (9)$$

Учитывая формулу (9), вычислим относительную дисперсию сигнала ошибки тракта «r – ξ» по выражению для функционала качества вида (4) для синтезируемой системы. В результате получим

$$\eta = \frac{e}{\sigma_r^2} = 0,163, \quad (10)$$

где  $\sigma_r^2$  – среднеквадратическое отклонение программного сигнала.

Анализируя качество (точность) тракта без фильтра-наблюдателя, запишем выражение модели динамики ошибки измерений в тракте с учетом особенности передаточной функции измерителя K (3), который осуществляет преобразование входной величины ( [град] ) в выходную величину ( [В] ). Тогда с учетом введения коэффициента передачи  $K_{0\xi}$  в передаточной функции измерителя спектральная плотность ошибки измерения будет вычисляться по формуле

$$S_{\varepsilon_1 \varepsilon_1} = |K_\xi(s) - K_{0\xi}|^2 S_{\Gamma} + S_{\varphi\varphi}, \text{ [В}^2 \cdot \text{с]}, \quad (11)$$

а функционал качества в этом случае будет иметь вид

$$e_1 = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} S_{\varepsilon_1 \varepsilon_1} ds, \text{ [В}^2] \quad (12)$$

Вычисления производились с помощью компьютерной техники. Вычисленное на основании исходных данных (11) и интеграла (12) значение дисперсии сигнала  $\varepsilon_1$  отнесем к дисперсии полезного сигнала r и получим соотношение вида

$$\eta_1 = \frac{e_1}{K_{0\xi}^2 \sigma_r^2} = 1,19. \quad (13)$$

Сравнивая оценки (10) и (13), получим коэффициент эффективности (уменьшения) дисперсии ошибки измерений в тракте с оптимальным фильтром

$$\frac{\eta_1}{\eta} = 7,3.$$

Таким образом, проведенная модернизация тракта понижает дисперсию ошибки измерений в 7,3 раза.

#### **Вывод:**

Синтезирован и предложены модели динамики оптимального фильтра-наблюдателя в тракте «ψ – ξ». При этом произведена оценка наилучшего коэффициента перевода показаний измерителя в «градусы». Реализация оптимального фильтра-наблюдателя почти на порядок уменьшит дисперсию случайной ошибки измерения курса корабля.

#### **Список литературы:**

1. Блохин Л.Н. Динамическое проектирование оптимальных произвольных структур комплексов стабилизации движения при стохастических эксплуатационных воздействиях (на примерах авиационной техники). Автореферат докторской диссертации. – К.: КИИГА, 1985. – 34 с.
2. Блохин Л.М., Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління. – Підручник для ВНЗ. – К.: НАУ, 2003. – 214 с.