

використанням PDM-систем призводить до необхідності зміни ряду організаційних положень стандартів щодо розв'язання задач технічної підготовки виробництва (наприклад, щодо позначень геометричних моделей тощо).

Стрімке поширення 3D CAD/CAM-систем для розв'язання задач технічної підготовки виробництва обумовлене їхніми перевагами в порівнянні з креслярськими (2D) системами, головними з яких є:

– зменшення кількості помилок за рахунок можливості завчасного погодження в середовищі 3D CAD-систем геометрії та розмірів тривимірних моделей деталей і складальних одиниць (імітація процесів виготовлення) і адекватності креслення відповідної моделі;

– скорочення термінів проектування і підготовки виробництва за рахунок високої наочності 3D-моделей у порівнянні з кресленнями, що призводить до легшого і правильного їхнього сприйняття фахівцями і скорочення термінів узгодження.

Водночас, геометричні моделі є джерелом інформації для систем розрахунків, відпрацювання на технологічність, систем проектування КП і розв'язання інших задач, що у цьому випадку вирішуються значно швидше, ніж при використанні 2D-систем.

Аналіз засобів розв'язання задач технічної підготовки виробництва показує неадаптованість найбільш функціонально розвинутих закордонних CAD/CAM/CAE-систем до умов вітчизняного ринку, що виражається, в першу чергу, у відсутності підтримки вимог ЄСКД, ЄСТД та інших систем стандартів при проектуванні графічної КД і ТД, засобів автоматичного формування специфікацій на основі структури моделі складання і інших моментів.

На вітчизняних науковців та фахівців чекає велика праця з інтеграції та розвитку створених раніше вітчизняних автоматизованих систем САПР-ТП та САП в середовище сучасних інтегрованих інформаційних систем.

Стаття надійшла до редакції 21.06.02.

УДК 62.501.12

Л.М. Блохін, д-р техн. наук, проф.,  
С.В. Держак, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,  
Ю.В. Петрова, асп.

## АНАЛІЗ І ОПТИМІЗАЦІЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ЗІ ЗБУРЮЮЧИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ПЕРВИННОЇ ІНФОРМАЦІЇ

*Запропоновано новітні засіб та алгоритми аналізу якості вимірювальної системи зі збурюючими джерелами інформації.*

Багато сучасних первинних вимірювачів (датчиків) у силу технологічних особливостей можуть сприймати як корисну не тільки інформацію, що зацікавлює дослідника, але й іншу – з близькими динамічними характеристиками. У такому випадку ряд положень теорії оптимальних фільтрів вимагає суттєвої корекції. Н. Вінером закладено основи теорії оптимальних фільтрів і технічної кібернетики, що до останніх років принципово не змінилися. Однак необхідне урахування додаткових джерел первинної інформації, по динамічним властивостям близької, але не корельованої, з цікавлячими складовими вхідних сигналів. Це порушує питання про доцільність модернізації відомих підходів до синтезу оптимальних фільтрів. Основні причини сприйняття сучасними датчиками додаткової первинної інформації – їх нова фізична природа, технології виготовлення і дії.

Як початковий етап робіт з активізації методів оптимальних фільтрів розглянемо деякі задачі аналізу з метою виявлення рівнів можливого впливу додаткових джерел інформації на точність вимірів і доцільних алгоритмів аналізу розімкнутих систем у зазначеній ситуації. Урахування можливостей сучасних обчислювальних засобів дозволяє не робити різниці між непе-

первними і цифровими системами. Тому розглядаються задачі аналізу неперервних систем, у яких принципово досяжні вищі можливі рівні точності вимірів і які істотно прозоріші і наочні для оцінювання ефектів від застосування різних процедур фільтрації.

На початку нагадаємо основні моменти задач аналізу і синтезу оптимального фільтра в багатомірній вимірювально-перетворюючій системі у традиційній постановці (рис. 1).

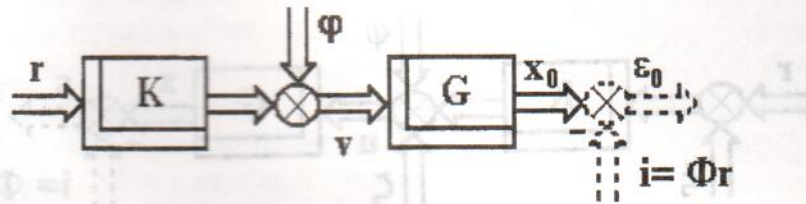


Рис. 1. Структурна схема оптимальної вимірювальної системи

Блок первинних вимірювачів, який має відому матрицю передаточних функцій  $K$ . Синтезований за відомим алгоритмом [1] багатовимірний оптимальний фільтр має оптимальну матрицю передаточних функцій  $G$ . Через  $\Phi$  позначена матриця передаточних функцій бажаного перетворення  $n$ -вимірному вектору програмних сигналів  $r$  у  $n$ -вимірний вектор бажаних сигналів  $i$ ; через  $v$  –  $m$ -вимірний вектор вихідних сигналів блоку первинних вимірювачів, що включають вектор перешкод вимірів  $\phi$ ; через  $x_0$  –  $n$ -вимірний вектор вихідних сигналів вимірювальної системи; через  $\epsilon_0$  –  $n$ -вимірний вектор помилок вимірів. Матриці  $S_{rr}, S_{r\phi}, S_{\phi r}$  спектральних і взаємних спектральних щільностей центрованих випадкових сигналів  $r$  і  $\phi$  покладаються відомими.

Як показник точності (при синтезі – функціонал) вимірювальної системи прийнятий вираз такого вигляду:

$$e = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr}(S'_{\epsilon_0 \epsilon_0} R) ds, \quad (1)$$

де  $\text{tr}$  – слід матриці;  $S_{\epsilon_0 \epsilon_0}$  – матриця спектральних щільностей помилок вимірів; « ' » – знак транспонування;  $R$  – у загальному випадку поліноміальна позитивно-визначена симетрична вагова матриця;  $s = j\omega$  – аргумент у Фур'є-перетворенні.

Оптимальна структура  $G$  вибирається за допомогою алгоритму синтезу [1]:

$$G = \Gamma^{-1}(T_0 + T_+)D^{-1}, \quad (2)$$

де  $\Gamma$  – результат факторизації матриці  $R$ ;  $D$  – результат факторизації виразу:

$$DD^* = KS'_{rr}K^* + KS'_{r\phi} + S'_{r\phi}K^* + S'_{\phi\phi},$$

« \* » – знак ермітового спряження;  $T_0 + T_+$  – результат сепарації виразу:

$$T = T_0 + T_+ + T_- = \Gamma^{-1}R\Phi(S'_{rr}K^* + S'_{r\phi})D^{-1}.$$

Матриця  $S'_{\epsilon_0 \epsilon_0}$  у функціоналі (1) має вигляд:

$$S'_{\epsilon_0 \epsilon_0} = (-\Phi + GK)S'_{rr}(-\Phi + K.G^*) + (-\Phi + GK)S'_{r\phi}G^* + GS'_{r\phi}(-\Phi + K.G^*) + GS'_{\phi\phi}G^*. \quad (3)$$

При традиційному підході до аналізу точності розглянутої системи, знаючи матрицю  $G$ , необхідно лише підставити вирази (2) і (3) у показник (1), обчислити і дослідити мінливість значення  $e_{\min}$  у функції варійованих параметрів типу «шум/сигнал».

Постановку задачі аналізу зобразимо в такий засіб. Нехай існує оптимальна система вимірів (рис. 1). Урахуємо, що на входи блоку вимірів надходить сума векторів програмних сигналів  $r$  і деяких додаткових сигналів  $\xi$  (рис. 2), що є  $n$ -вимірні центровані випадкові процеси з відомими матрицями спектральних щільностей  $S_{rr}$  і  $S_{\xi\xi}$ . Сигнали  $r$  і  $\xi$  близькі по динамічним характе-

ристикам, але не корельовані між собою. Крім того, на виході блоку первинних вимірювачів з'являється додаткова випадкова перешкода  $\zeta$  (відомі її матриці спектральних і взаємних спектральних щільностей). Позитивний вплив на факт підвищення якості обробки інформації може робити і урахування корельованості програмних сигналів, і перешкод між собою. На рис. 2 показана структурна схема такої системи.

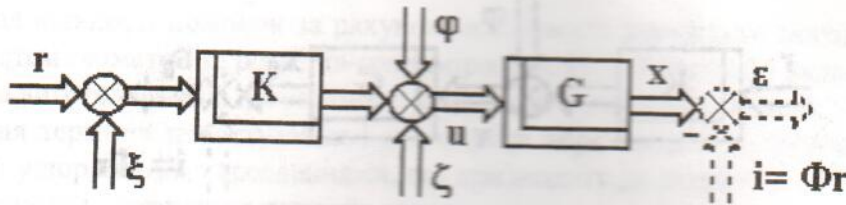


Рис. 2. Структурна схема вимірювальної системи з урахуванням додаткової вхідної інформації

Вихід блоку первинних вимірювачів у системі позначимо через  $u$ , вихід системи – через  $x$ , а вектор помилок вимірів – через  $\varepsilon$ . Вважаємо також, що сигнал  $\xi$  можна одержати з деякого первинного вектора сигналів  $\xi_0$  за допомогою деякого формуючого фільтра, що має матрицю передаточних функцій  $L$ . У цьому випадку Фур'є-образ вектора помилок системи можна записати, як

$$\varepsilon = i - x = (\Phi - GK)r - GKL\xi_0 - G(\varphi + \zeta),$$

а за допомогою теореми Вінера–Хінчина матрицю спектральних щільностей вектора помилок системи можна записати у вигляді:

$$S'_{\varepsilon\varepsilon} = (\Phi - GK)S'_{rr}(\Phi - K.G.) - (\Phi - GK)(S'_{\varphi\varphi} + S'_{\zeta\zeta})G - G(S'_{\varphi\varphi} + S'_{\zeta\zeta})(\Phi - K.G.) + GKLS'_{\xi_0\xi_0}L.K.G. + G(S'_{\varphi\varphi} + S'_{\zeta\zeta} + S'_{\varphi\zeta} + S'_{\zeta\varphi})G + GKL(S'_{\varphi_0\xi_0} + S'_{\zeta_0\xi_0})G + G(S'_{\xi_0\varphi} + S'_{\xi_0\zeta})L.K.G. \quad (4)$$

(1) Порівнюючи між собою матриці (3) і (4), знайдемо матрицю спектральних щільностей перевищення  $\Delta$  вектора помилок  $\varepsilon$  над нормативним вектором  $\varepsilon_0$ :

$$S'_{\Delta\Delta} = S'_{\varepsilon\varepsilon} - S'_{\varepsilon_0\varepsilon_0} = -(\Phi - GK)S'_{rr}G - GS'_{r\zeta}(\Phi - K.G.) + GKLS'_{\xi_0\xi_0}L.K.G. + G(S'_{\varphi\zeta} + S'_{\zeta\varphi} + S'_{\zeta\zeta})G + GKL(S'_{\varphi_0\xi_0} + S'_{\zeta_0\xi_0})G + G(S'_{\xi_0\varphi} + S'_{\xi_0\zeta})L.K.G. \quad (5)$$

Очевидно, що точніший показник вимірів (1) у цьому випадку (рис. 2) істотно нижчий ніж такі ж показники для системи (див. рис. 1), а при наявності нульових коренів у знаменниках елементів матриць  $S'_{rr}$ ,  $S'_{\xi\xi}$  і в ряді інших випадків може взагалі спрямовуватися в нескінченність. Потрібно шукати шляхи, методи й алгоритми оптимізації обробки інформації для системи вимірів з обліком додаткової вхідної інформації.

Як перший крок у виконанні процесу обробки сигналів у досліджуваній системі, можна розглядати задачу синтезу такого фізично реалізованого формуючого фільтра  $L$  (моделі ланки корекції системи, яка показана на рис. 2), при якому буде мінімальне підвищення величини показника якості (1) для другої системи в порівнянні з таким же показником якості, але для першої.

Використовуючи процедуру методу Вінера–Колмогорова, для виразів (1) і (5), одержимо оптимальну структуру формуючого фільтра, яку можна визначити за алгоритмом

$$L_0 = \Gamma_0^{-1}(\Gamma_0 + T_+)D_0^{-1}, \quad (6)$$

$$\text{де } \Gamma_0^* \Gamma_0 = K.G.R.GK; D_0 D_0^* = S'_{\xi_0\xi_0}; T = T_0 + T_+ + T_- = \Gamma_0^{-1}K.G.RG(S'_{\xi_0\varphi} + S'_{\xi_0\zeta})D_0^{-1}.$$

З алгоритму (6) видно, що вибір такого сигналу  $\xi$ , при якому мінімізується дисперсія сигналу  $\Delta$ , можливий у випадку, коли сигнал  $\xi_0$  корельований із сигналами  $\varphi$  і  $\zeta$ .

Обчислюючи інтеграл (1) з урахуванням матриці (5), можна побачити, що величина  $e_{\Delta \min}$  залежить від міри корельованості сигналів, динаміки сигналів  $\xi$ ,  $\zeta$  і особливо від наявності нульових полюсів у матрицях спектральних щільностей сигналів.

Проілюструємо сказане щодо впливу на якість системи взаємної корельованості програмних сигналів і перешкод на простому прикладі. Побудуємо поверхні якості системи з оптимальним фільтром  $G$  (див. рис. 1) і без нього (при  $G=1$ ), як функцію співвідношення «шум/сигнал»  $\gamma$  і коефіцієнта взаємної кореляції  $\mu$  сигналів  $r$  і  $\phi$  при таких вихідних даних:

$$K = \frac{k}{Ts+1};$$

$$S_{\pi} = \frac{\sigma_r^2}{\pi} \frac{1}{|ts+1|^2};$$

$$S_{\phi\phi} = \frac{\sigma_{\phi}^2}{\pi} \frac{1}{|vs+1|^2};$$

$$\gamma = \frac{\sigma_{\phi}}{\sigma_r};$$

$$S_{r\phi} = \mu \frac{\sigma_r \sigma_{\phi}}{\pi} \frac{1}{(-ts+1)(vs+1)};$$

$$S_{\phi r} = \mu \frac{\sigma_r \sigma_{\phi}}{\pi} \frac{1}{(ts+1)(-vs+1)};$$

$$k=10; T=1c; \tau=10c; v=0,001c; s=j\omega.$$

Оцінимо вплив зазначених варійованих параметрів  $\gamma$  і  $\mu$  на якість обох досліджуваних систем. Вважаємо, що коефіцієнт кореляції змінюється в інтервалі від  $-1$  до  $1$ , а співвідношення «шум/сигнал» – в інтервалі від  $10^{-3}$  до  $10^0$ . Розрахунок показника якості оптимальної і неоптимальної систем виконуємо за алгоритмами (2), (3). Після розрахунку відносного показника якості оптимальної (табл. 1) і неоптимальної (табл. 2) систем отримані таблиці зміни показника якості систем залежно від коефіцієнта взаємної кореляції  $\mu$  і співвідношення «шум/сигнал»  $\gamma$  [2]. На підставі цих даних побудовані поверхні якості (відносної дисперсії помилки) оптимальної (2) і неоптимальної (1) систем залежно від зміни значень коефіцієнта взаємної кореляції і співвідношення «шум/сигнал» (рис. 3).

Таблиця 1

Відносна дисперсія похибки оптимальної системи  $\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_r^2} \times 10^4$ 

$\gamma\mu$	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.001	0.02	0.018	0.017	0.016	0.016	0.015	0.014	0.014	0.014	0.014	0.013
0.01	0.03	0.026	0.025	0.025	0.024	0.024	0.023	0.023	0.022	0.02	0.02
0.10	0.69	0.73	0.67	0.61	0.56	0.50	0.44	0.39	0.33	0.28	0.22
1.0	8.70	8.77	8.76	8.63	8.40	8.07	7.65	7.16	6.58	5.93	5.19

Таблиця 2

Відносна дисперсія похибки неоптимальної системи  $\frac{\sigma_n}{\sigma_r^2}$ 

$\gamma\mu$	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.001	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.01	0.0195	0.0194	0.0194	0.0193	0.0192	0.0192	0.019	0.019	0.019	0.018	0.017
0.10	1.033	1.032	1.031	1.03	1.03	1.029	1.029	1.028	1.027	1.026	1.025
1.0	100.3	100.3	100.23	100.22	100.21	100.21	100.2	100.2	100.19	100.1	100.1

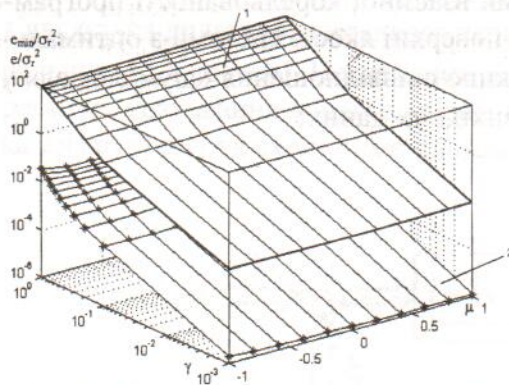


Рис. 3. Поверхні якості оптимальної (2) та неоптимальної (1) систем

У результаті аналізу отриманих поверхонь зроблено висновок, що при неоптимальній системі коефіцієнт взаємної кореляції практично не впливає на якість системи, а при оптимальній системі – впливає на якість системи істотніше. При сильній позитивній кореляції між корисним сигналом і перешкодою якість системи збільшується на 50 % в порівнянні із ситуацією, коли кореляція відсутня.

**Висновок.** На даний час багато задач фільтрації необхідно розглядати у нових (наприклад, у пропонуваніх) постановках. У зв'язку з прогресом у технологіях виробництва первинних вимірювачів актуальний і доцільний пошук шляхів і алгоритмів активізації обробки інформації у високоточних вимірювальних системах.

### Список літератури

1. Блохин Л.Н., Кадышев И.К., Трифонов-Богданов П.П. Основы навигации и пилотажно-навигационные комплексы: Учеб. для вузов ГА/ Под ред. Л.Н. Блохина. – М.: ВТ, 1993. – 244 с.
2. Блохин Л.Н. Активизированная оптимальная фильтрация в задачах высокоточного управления и биомедицинской диагностики//Кибернетика и вычислительная техника. – 2001. – Вып. 130. – С. 39–48.

Стаття надійшла до редакції 30.03.02.

УДК 519.21

**В.Г. Капишон,**

**М.Т. Корнійчук,** д-р техн. наук, проф.,

**І.К. Совтус,** канд. техн. наук, доц.,

**В.Д. Тетерятник,** доц.,

**М.О. Шутко,** д-р техн. наук, проф.

### КЕРУВАННЯ РИЗИКОМ У МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ СКЛАДНИХ ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ

*Розглянуто модель оптимізації складних лінійних систем на етапі їх розробки та проектування за критерієм витрат на забезпечення від ризику відмов системи з урахуванням керування ризиком для можливості його варіювання. На основі модифікації невизначених множників розроблено метод і моделі, що дозволяють оптимізувати витрати на побудову системи заданої якості з допустимими рівнями ризику відмов.*

Функціональна надійність складної системи не збігається з її технічною надійністю [1], оскільки на сьогодні немає загальної методики визначення такої надійності. Широке розповсюдження складних і надскладних систем у повсякденному житті вимагає зменшення ризику відмови функціонування цих систем. Дослідження функціональної надійності систем викликає неабиякі труднощі хоча б через відсутність загальноприйнятого означення ризику чи чіткого відокремлення поняття власне ризику від його характеристик. Тому будемо використовувати трактування ризику, наведене в роботі [2], і обмежимося складними системами, що перебувають на етапі розробки і створення та мають відносно просту, лінійну структуру процесу свого функціонування.

Задача оптимізації за критерієм ризику відмов системи при обмежених грошових витратах на створення цієї системи розв'язана теоретично, практично вона може бути незастосовною. Використавши фіксовані кошти, можна досягти лише певного, нехай навіть і оптимального, рівня забезпечення від ризику. Але споживача цікавить певний рівень гарантії безпечного вико-