

The study of the ball mill as a controlled object on the pulp vacuum channel made it possible to describe it using the mathematical expression given in the article. The solution of this expression makes it possible to characterize the change in the mass of the material in the mill over time, provided that a stepwise action is introduced at the entrance - the volume flow of water or ore. A constant value of the mass of material in the mill will clearly characterize the corresponding solid/liquid ratio. It has been found that it is important to study the filtering capabilities of the control object, as control actions on water and disturbing actions on ore can significantly change the vacuum of the pulp in some areas of the mill. The filtering capabilities of the mill can be investigated by its amplitude frequency characteristics, which showed that at low circular frequencies the amplitude frequency characteristics depend on the mode of operation of the mill - the magnitude of the circulating load and the cost of the source ore. Using computer technology, spatial diagrams of the relative oscillations of the mass of material in the mill from the amplitude and frequency of influences at its entrance through the ore and water.

In the course of theoretical research it was determined that the only approach to ensure the required accuracy of determining the solid / liquid ratio in these conditions is to filter the signals before applying to the input of the identification unit of the ratio. Thus, the system of automatic control of the solid/liquid ratio at the entrance to the mill is implemented on microprocessor means. Its operation on the laboratory test bench made on the microcontroller showed high accuracy of stabilization of technological parameter, reliability in various conditions of change of characteristics of input signals.

measurement of the solid/liquid ratio, optimization of the choice of measuring instruments

Одержано (Received) 25.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 03.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 62.505

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.210-215>

С.І. Осадчий, проф., д-р техн. наук, **О.К. Дідик**, доц., канд. техн. наук, **О.М. Сербул**, доц., канд. техн. наук, **В.М. Каліч**, проф., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: didyk_s79@ukr.net

Метод синтезу оптимального багатовимірного фільтру для виділення регулярного сигналу на фоні випадкових перешкод

В даній статті приводиться дослідження можливості застосування комплексування вимірювальної інформації в умовах, коли корисна інформація являє собою вектор регулярних сигналів, а завади вимірювання – багатовимірний стаціонарний випадковий процес.

вимірювання, фільтрація, сигнал, перешкоди, випадковий процес, метод синтезу

Постановка проблеми. Створення сучасних інтелектуальних систем прийняття рішень, систем автоматичного управління рухомими об'єктами потребують високоточної вимірювальної інформації. Джерелом такої інформації є інформаційно-вимірювальні комплекси, якість роботи яких визначається точністю одержання оцінок параметрів, що вимірюються. В свою чергу точність оцінки залежить від рівня виробництва систем даного класу та алгоритмів обробки результатів вимірювання. Причому, значного виграшу можливо досягти при застосуванні нових оптимальних алгоритмів обробки результатів вимірювання [1, 2].

© С.І. Осадчий, О.К. Дідик, О.М. Сербул, В.М. Каліч, 2021

Аналіз основних досліджень і публікацій. Одним з методів підвищення точності оцінки параметрів вимірювання є багатоканальне вимірювання фізичної величини з подальшою оптимальною фільтрацією. Задача визначення структури та параметрів оптимального багатовимірної, багатоканального фільтра отримала назву задачі комплексування [1, 3]. В роботі [1] наведений алгоритм рішення цієї задачі при умові, що і корисний сигнал і перешкода є багатовимірний стаціонарний випадковий процес з нульовим математичним сподіванням. При цьому доведена висока ефективність запропонованого оптимального фільтра. В даній статті пропонується дослідити можливість застосування комплексування в умовах, коли корисна інформація є вектор регулярних сигналів, а перешкода вимірювання – багатовимірний центрований стаціонарний випадковий процес.

Постановка завдання. В термінах роботи [1] сформулюємо задачу синтезу комплексованої системи виділення корисного регулярного сигналу.

Нехай необхідно багатовимірним стаціонарним фільтром найкраще обробити вхідну інформацію про один і той же регулярний сигнал $r(t)$, яку отримують кількома “неідеальними” вимірювачами, а результат передати на систему оцінювання.

Виклад основного матеріалу. Будемо вважати заданою багатоканальну систему вимірювання (рис. 1), яка підключена на вхід багатовимірної системи передачі даних, динаміка якої описується системою лінійних диференційних рівнянь вигляду:

$$Px = Mu + \psi, \quad (1)$$

де x – n -вимірний вектор вихідних координат;

u – m -вимірний вектор управляючих координат;

ψ – n -вимірний вектор збурень з нульовими математичними сподіваннями і відомою дробово-раціональною матрицею спектральних щільностей $S_{\psi\psi}$;

P та M – поліноміальні матриці відповідної розмірності ($\det(P)$ - стійкий).

На вхід вимірювальної системи надходить n -вимірний вектор вимірюваних сигналів $r(t)$, компонентами якого є детерміновані функції. Вектор $r(t)$ надходить до основної групи „неідеальних” вимірювачів (основний канал вимірювання має матрицю передаточних функцій K розмірності $n \times n$). Вектор $\varphi(t)$ – n -вимірний вектор перешкод, які супроводжують вимірювання, що являє собою випадковий стаціонарний процес із нульовим математичним сподіванням і відомою дробово-раціональною матрицею спектральних щільностей $S_{\varphi\varphi}$. Паралельно вектор $r(t)$ вимірюється q додатковими каналами, кожний з яких має відому матрицю передаточних функцій K_i розмірності $v_i \times n$ і v_i -вимірний вектор перешкод вимірювань $\varphi_i(t)$, який являє собою векторний стаціонарний випадковий процес із нульовим математичним сподіванням і відомою дробово-раціональною матрицею спектральних щільностей $S_{\varphi_i\varphi_i}$. Нехай нумерація каналів упорядкована і дотримується умови

$$n \geq v_1 \geq v_2 \geq \dots \geq v_i \geq v_q \geq 1, \quad v = \sum_{i=1}^q v_i. \quad (2)$$

За аналогією з [1], були введені позначення: сигнали на вході i -го вимірювального каналу

$$v_i = L_i r + \varphi_i, \quad (3)$$

де $L_i = [K_i, O_{v_i \times (n-v_i)}]$,

$O_{n \times m}$ – нульова матриця розмірності $n \times m$;
матриця передаточних функцій вимірювачів

$$K_o = [K', L']', \quad L = [L_1', L_2', \dots, L_q']'; \tag{4}$$

вектор шумів вимірювачів

$$\varphi_o = [\varphi', \varphi_1', \dots, \varphi_q']'; \tag{5}$$

матриця передаточних функцій каналів фільтра

$$G_o = [G, G_1, \dots, G_q]_{m \times (n+v)}; \tag{6}$$

матриця бажаних перетворень сигналу $r(t)$

$$\Phi_o = [\Phi K^{-1}, O_{n \times v_1}, \dots, O_{n \times v_q}], \tag{7}$$

в якій матрична передаточна функція Φ визначає зв'язок між вектором на вході основного вимірювача і сигналом на виході ідеальної системи.

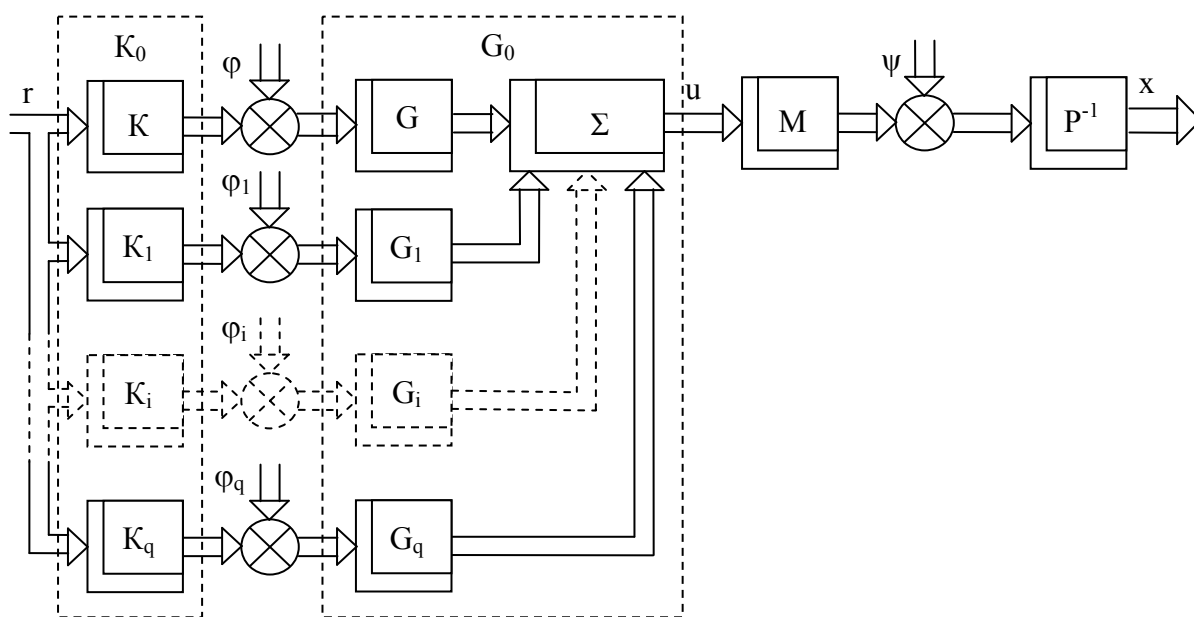


Рисунок 1 – Структурна схема системи вимірювань

Джерело: розроблено авторами

Виходячи з цього, управляючий $u(t)$, вихідний $x(t)$ та бажаний $i(t)$ сигнали системи визначаються рівняннями

$$u = G_o(\rho_o + \varphi_o), \tag{8}$$

$$x = P^{-1}MG_o(\rho_o + \varphi_o) + P^{-1}\psi, \tag{9}$$

$$i = \Phi_o\rho_o, \tag{10}$$

в яких $\rho_o = K_o r$, а помилка в системі, яка являє собою відхилення реального сигналу $x(t)$ від бажаного, має дві складові – регулярну ε та випадкову ζ а саме такі, що

$$\varepsilon = (-\Phi_o + P^{-1}MG_o)\rho_o, \tag{11}$$

$$\zeta = P^{-1}MG_o\varphi_o + P^{-1}\psi. \tag{12}$$

Тоді, інтегральним показником якості роботи системи є сума певним чином зважених інтегральної квадратичної помилки оцінювання регулярного сигналу (11) та дисперсії випадкової складової помилки (12)

$$I_o = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} tr \left\{ A \varepsilon \varepsilon_* + 2\pi\lambda^2 AS'_{\zeta\zeta} \right\} ds, \quad (13)$$

де $tr\{ \}$ - знак знаходження сліду матриці;

"*" - знак Ермітового спряження;

A - вагова матриця, елементи якої узгоджують вагу окремих координат в загальному критерії якості;

λ - коефіцієнт, який визначає обмеження на дисперсію випадкової складової помилки;

$S_{\zeta\zeta}$ - матриця спектральних щільностей вектора ζ ;

"'" - знак транспонування.

Враховуючи прийняті припущення, задача синтезу оптимальної багатовимірної, багатоканальної системи комплексованого оцінювання регулярних сигналів на фоні багатовимірних стаціонарних перешкод полягає в тому, щоб за відомими матрицями M , P , K_o та Φ_o , які характеризують динаміку заданої частини системи, спектром потужності регулярного сигналу $\rho_o\rho_o^*$ і матрицями спектральних щільностей збурень $S_{\psi\psi}'$ та шумів вимірювачів $S_{\varphi_o\varphi_o}'$, знайти таку стійку та фізично реалізуєму матрицю передаточних функцій оптимального фільтра G_o , щоб функціонал якості (13) досягав мінімуму.

Припустимо, що сигнали φ_o та ψ некорельовані, в такому разі для розв'язання поставленої задачі розглянемо окремо доданки підінтегрального виразу функціоналу (13)

$$A \varepsilon \varepsilon_* = A \left[(-\Phi_o + P^{-1}MG_o) \rho_o \rho_o^* (-\Phi_o^* + G_o^* M_* P_*^{-1}) \right] = A \Phi_o \rho_o \rho_o^* \Phi_o^* - \quad (14)$$

$$- A \Phi_o \rho_o \rho_o^* G_o^* M_* P_*^{-1} - AP^{-1}MG_o \rho_o \rho_o^* \Phi_o^* + AP^{-1}MG_o \rho_o \rho_o^* G_o^* M_* P_*^{-1};$$

$$2\pi\lambda^2 AS'_{\zeta\zeta} = 2\pi\lambda^2 AP^{-1}MG_o S'_{\varphi_o\varphi_o} G_o^* M_* P_*^{-1} + 2\pi\lambda^2 AP^{-1}S'_{\psi\psi} P_*^{-1}. \quad (15)$$

В результаті підстановки виразів (14), (15) у функціонал якості (13) маємо

$$I_o = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} tr \left\{ A \Phi_o \rho_o \rho_o^* \Phi_o^* - A \Phi_o \rho_o \rho_o^* G_o^* M_* P_*^{-1} - \quad (16)$$

$$- AP^{-1}MG_o \rho_o \rho_o^* \Phi_o^* + AP^{-1}MG_o \rho_o \rho_o^* G_o^* M_* P_*^{-1} + \right.$$

$$\left. + 2\pi\lambda^2 AP^{-1}MG_o S'_{\varphi_o\varphi_o} G_o^* M_* P_*^{-1} + 2\pi\lambda^2 AP^{-1}S'_{\psi\psi} P_*^{-1} \right\} ds.$$

Мінімізація функціоналу (16) виконувалась методом Вінера-Колмогорова. Згідно з процедурою методу знайдена перша варіація функціоналу (16)

$$\delta I_o = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} tr \left\{ \delta G_o^* \left[-M_* P_*^{-1} A \Phi_o \rho_o \rho_o^* + M_* P_*^{-1} AP^{-1}MG_o \rho_o \rho_o^* + \right. \quad (17)$$

$$\left. + 2\pi\lambda^2 M_* P_*^{-1} AP^{-1}MG_o S'_{\varphi_o\varphi_o} \right] + \left[-\rho_o \rho_o^* \Phi_o^* AP^{-1}M + \right.$$

$$\left. + \rho_o \rho_o^* G_o^* M_* P_*^{-1} AP^{-1}M + 2\pi\lambda^2 S'_{\varphi_o\varphi_o} G_o^* M_* P_*^{-1} AP^{-1}M \right] \delta G_o \right\} ds,$$

де δG_0 – аналітична лише в правій півплощині комплексної змінної s варіація функції G_0 .

Введемо позначення:

$$\Gamma_* \Gamma = M_* P_*^{-1} A P^{-1} M; \quad (18)$$

$$D D_* = \rho_0 \rho_{0*} + 2\pi \lambda^2 S'_{\varphi_0 \varphi_0}, \quad (19)$$

$$N = N_0 + N_+ + N_- = \Gamma_*^{-1} M_* P_*^{-1} A \Phi_0 \rho_0 \rho_{0*} D_*^{-1}, \quad (20)$$

де Γ і D – матриці, одержані в результаті факторизації відповідних виразів, аналітичні лише в правій півплощині (ППП) комплексної змінної s ;

Γ_* і D_* – матриці, аналітичні лише в лівій півплощині (ЛПП);

N_0 – матриця, одержана в результаті сепарації [4] виразу (20), всі елементи якої – поліноми аргументу s ;

N_+ – матриця, всі елементи якої – правильні дроби аргументу s , що мають полюса тільки в ЛПП;

N_- – матриця, всі елементи якої – правильні дроби аргументу s , що мають полюси тільки в ППП.

З урахуванням виразів (18-20) варіація (17) набула вигляду:

$$\begin{aligned} \delta I_0 = & \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr} \{ \delta G_{0*} \Gamma_* [\Gamma G_0 D - (N_0 + N_+ + N_-)] D_* + \\ & + D [D_* G_{0*} \Gamma_* - (N_0 + N_+ + N_-)_*] \Gamma \delta G_0 \} ds. \end{aligned} \quad (21)$$

В результаті умова, при якій варіація (21) тотожно рівна нулю, визначається наступним чином:

$$G_0 = \Gamma^{-1} (N_0 + N_+) D^{-1}. \quad (22)$$

Висновки. Таким чином, одержано новий алгоритм синтезу комплектованої оптимальної системи виділення регулярного сигналу на фоні багатовимірної стаціонарної випадкової перешкоди, який дозволяє знайти структуру і параметри багатовимірного оптимального фільтра з урахуванням динаміки системи передачі інформації.

Список літератури

1. Блохин Л.Н. Оптимальные системы стабилизации. К.: Техника, 1982. 144 с.
2. Азарсков В.Н., Блохин Л.Н. и др. Робастные методы оценивания идентификации и адаптивного управления. К.: НАУ, 2004. 500 с.
3. Технологии конструирования современных конкурентоспособных комплексов управления стохастическим движением объектов: монография / Л.Н. Блохин, С.И. Осадчий, А.К. Дидык, Г.И. Рудюк. Кировоград: Лисенко В.Ф., 2015. 284 с.
4. Блохин Л.М., Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління: підручник. К.: НАУ, 2003. 208 с.

References

1. Blohin, L.N. (1982). *Optimalnye sistemy stabilizatsii [Optimal stabilization systems]*. Kyiv: Tehnika [in Russian].
2. Azarskov, V.N., Blohin L.N. et al (2004). *Robastnye metody otsenivaniia identifikatsii i adaptivnogo upravleniia [Robust estimation methods for identification and adaptive control]*. Kyiv: NAU [in Russian].

3. Blohin, L.N., Osadchiy, S.I., Didyk, A.K. & Rudiuk, G.I. (2015). *Tehnologii konstuirovaniia sovremennyh konkurentnosposobnyh kompleksov upravleniia stohasticheskim dvizheniem obektov* [Technologies for designing modern competitive control systems for stochastic movement of objects]. Kirovograd: Lysenko V.F. [in Russian].
4. Blohin, L.N. & Burychenko, M.U. (2003). *Statystychna dynamika system ypravlinnia* [Statistical dynamics of control systems]. Kyiv: NAU [in Ukrainian].

Serhii Osadchiy, Prof., DSc., **Oleksandr Didyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Serbul**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Kalich**, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Method of Synthesis of an Optimal Multidimensional Filter for Extracting a Regular Signal Against a Background of Random Noise

In terms of [1] we formulate the problem of synthesis of a complex system of allocation of a useful regular signal. Suppose that a multidimensional stationary filter best processes the input information about the same regular signal $r(t)$, which is obtained by several "non-ideal" meters, and the result is transmitted to the evaluation system.

In this article, a multi-channel measurement system, which is connected to the input of a multidimensional data transmission system, the dynamics of which is described by a system of linear differential equations. The input of the measuring system receives an n -dimensional vector of measured signals $r(t)$, the components of which are deterministic functions. The vector $r(t)$ belongs to the main group of "non-ideal" meters. Measurements are accompanied by interference, which is a random stationary process with zero mathematical expectation and a known fractional-rational matrix of spectral densities. An integral indicator of the quality of the system is the sum of the weighted integral quadratic error of the regular signal estimation and the variance of the random component of the error.

Thus, a new algorithm for the synthesis of a complete optimal regular signal extraction system against the background of a multidimensional stationary random interference is obtained, which allows to find the structure and parameters of a multidimensional optimal filter taking into account the dynamics of the information transmission system.

measurement, filtering, signal, noise, random process, synthesis method

Одержано (Received) 25.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 03.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021