

Керування п'єзоелектричною компенсацією вимірювальної камери за допомогою нестационарного фільтра Калмана

В.П. Савчук, І.М. Глушко

Одеський національний політехнічний університет

м. Одеса, пр. Шевченка, 1, тел. 22-34-74

E. mail: postmaster@opi.odessa.ua

Розглядається задача нестационарної фільтрації відгуку складної коливальної системи на зміну амплітуди і фази сигналу її збудження. Рішення цієї задачі зводиться до мінімізації функціонала втрат, що залежить від стану системи, за допомогою фільтра Калмана. У результаті поліпшується якість керування п'єзоелектричною компенсацією коливань унаслідок зменшення впливу перехідних процесів.

ВСТУП

Метод п'єзоелектричної компенсації має широке поширення при градуюванні гідрофонів у діапазоні частот 0,1...1000 Гц [1]. Як правило, цей метод реалізується в камерах малого об'єму, характерний розмір яких менше довжини звукової хвилі у вільному просторі. Камера, показана на рис.1, являє собою два коаксіальних п'єзоелектричних циліндри 1,2, торці яких закриті кришками. Між циліндрами існує пружний зв'язок. Усередині камери, заповненою водою 3, розміщується випробуваний гідрофон 4. В одну з кришок умонтований допоміжний випромінювач 5. Цей випромінювач створює в камері перемінний тиск на заданій частоті, що викликає радіальні коливання внутрішнього циліндра 2 – нуль-індикатора. Коливання нуль-індикатора компенсуються п'єзоелектричною силою випромінювача 1 – нуль-органа. Обидва випромінювачі збуджується спільним генератором 6, що дозволяє змінювати в блоці 7 відносну фазу й амплітуду двох сигналів, а, отже, сил, що діють на нуль-орган. Моменту компенсації відповідає перетворення в нуль амплітуди коливань нуль-індикатора. У цей момент вимірюється електрична напруга на виході випробуваного гідрофона пристроєм 10. Тиск у камері розраховується по обмірюваній електричній напрузі збудження нуль-органа в момент компенсації і сталої камери, знайденої в режимі компенсації відомого тиску при її атестації.

Для автоматизації процесу вимірів використовується контур зворотного негативного зв'язку (на рис.1 показаний пунктирною лінією), що складається з пристрою порівняння 8 і блоку формування сигналів керування 9, який реалізує алгоритм регулювання по відхиленню. Об'єкт керування являє собою складну електромеханічну коливальну систему, що має кілька резонансних частот. Навіть у тому випадку, коли ці частоти лежать удалені від робочого діапа-

зону частот, при зміні амплітуди чи фази коливань нуль-органа з'являються перехідні процеси, що вносять збурення в систему керування компенсацією. Для зниження цих збурень був використаний лінійно-квадратичний гауссів регулятор (LQG-регулятор), що складається з лінійно-квадратичного оптимального регулятора (LQ-регулятор) по стану системи і фільтра Калмана, який дає оцінку цього стану.

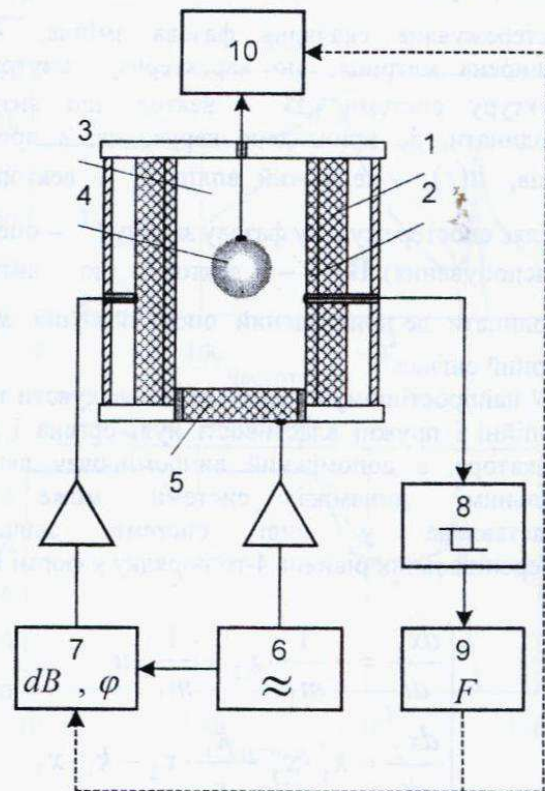


Рис. 1. Схема градуювання гідрофонів методом п'єзоелектричної компенсації камери малого об'єму.

1. АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ

Об'єктом керування в нашому випадку є електромеханічна система, що складається з трьох пружно зв'язаних коливальних підсистем. У робочій області частот і на резонансних частотах модель системи можна представити у вигляді еквівалентної лінійної системи з зосередженими параметрами [2].

Простір станів системи формується з фазових змінних, що представляють еквівалентні механічні переміщення (напруги) і швидкості (струми) її елементів. Об'єкт керування відноситься до класу систем з багатьма входами та одним виходом (MISO). Перший вхід системи (нуль-орган) є керованим, другий вхід (допоміжний випромінювач) є опорним і "заморожується" гармонійним сигналом робочої частоти. Спостерігається тільки одна фазова змінна – відгук нуль-індикатора. Слід зазначити, що вимірник цієї змінної сам має інерційність і пружність. Тому підпростір його станів включено в розширений простір станів об'єкта керування. Динаміка об'єкта керування в просторі станів характеризується наступними матричними рівняннями [3]:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}(t) &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}(t) + \mathbf{B} \cdot u(t) + \mathbf{B}_0 \cdot s(t), \\ y(t) &= \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{X}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

де $\mathbf{X}(t)$ – вектор фазових змінних, що характеризують стан у момент часу t , $y(t)$ – спостережувана скалярна фазова змінна, \mathbf{A} – розширена матриця, що характеризує внутрішню структуру системи, \mathbf{B} – вектор, що визначає координати, де прикладене керування, в просторі станів, $u(t)$ – керуючий вплив, \mathbf{C} – вектор, що виділяє спостережувану фазову змінну (T – операція транспонування), \mathbf{B}_0 – вектор, що визначає координати, де прикладений опорний вплив, $s(t)$ – опорний сигнал.

У найпростішому випадку, якщо врахувати тільки інерційні і пружні властивості нуль-органа і нуль-індикатора, а допоміжний випромінювач вважати ідеальним, динаміка системи може бути представлена у виді системи звичайних диференціальних рівнянь 4-го порядку у формі Коші:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\frac{1}{m_1} \cdot x_2 + \frac{1}{m_1} \cdot u \\ \frac{dx_2}{dt} = k_1 \cdot x_1 - \frac{k_1}{r_1} \cdot x_2 - k_1 \cdot x_3 \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{1}{m_2} \cdot x_2 - \frac{1}{m_2} \cdot x_4 \\ \frac{dx_4}{dt} = k_2 \cdot x_3 - \frac{k_2}{r_2} \cdot x_2 + \frac{1}{m_2} \cdot s \end{cases} \quad (2)$$

де x_1, x_3 – фазові змінні, що визначають швидкість інерційних елементів (m_1, m_2 – їхні еквівалентні маси) нуль-органа і нуль-індикатора, x_2, x_4 – фазові змінні, що визначають переміщення пружних

елементів (k_1, k_2 – їхні еквівалентні коефіцієнти пружності) нуль-органа і нуль-індикатора, r_1, r_2 – опір дисипативних елементів нуль-органа і нуль-індикатора.

Задача поліпшення якості керування полягає в такій корекції керуючого впливу, що дозволяє усунути вплив перехідних процесів у момент зміни амплітуди чи фази гармонійного сигналу, який подається на вхід нуль-органа. Рішення цієї задачі зводиться до мінімізації функціонала втрат, що залежить від стану системи:

$$J = \int_0^{\infty} \left(\sigma \cdot \mathbf{X}^T \mathbf{X} + \tilde{u}^T \tilde{u} \right) dt, \quad (3)$$

де σ – ваговий коефіцієнт, що визначає значимість помилки спостереження за станом перехідного процесу, \tilde{u} – сигнал керування перехідним процесом (у даному випадку вага помилки керування передбачається рівною одиниці).

Оптимальна стратегія регулювання визначається сигналом керування

$$u^*(t) = u(t) - \mathbf{L} \cdot \mathbf{X}(t), \quad (4)$$

де \mathbf{L} – матриця коефіцієнтів зворотного зв'язку LQ-регулятора, яка мінімізує функціонал

$$j = \int_0^{\infty} \left(\sigma \cdot y^2 + \tilde{u}^T \tilde{u} \right) dt. \quad (5)$$

Оптимальна оцінка змінних стану при випадкових умовах забезпечується фільтром Калмана. У результаті замкнута система керування, що усуває вплив перехідних процесів, визначається наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{X}(t) \\ \hat{\mathbf{X}}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{L} & \mathbf{B} \cdot \mathbf{L} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A} - \mathbf{G} \cdot \mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}(t) \\ \hat{\mathbf{X}}(t) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_0 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} s(t) + \begin{bmatrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \xi(t) + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{G} \end{bmatrix} \eta(t) \end{aligned} \quad (6)$$

де $\hat{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{X}(t) - \tilde{\mathbf{X}}(t)$, $\tilde{\mathbf{X}}(t)$ – оцінка фазових змінних фільтром Калмана, \mathbf{G} – матриця коефіцієнтів зворотного зв'язку фільтра Калмана, $\xi(t), \eta(t)$ – шум, що діє на нуль-орган і нуль-індикатор відповідно.

Оптимальна система з замкнутим контуром показана на рис. 2.

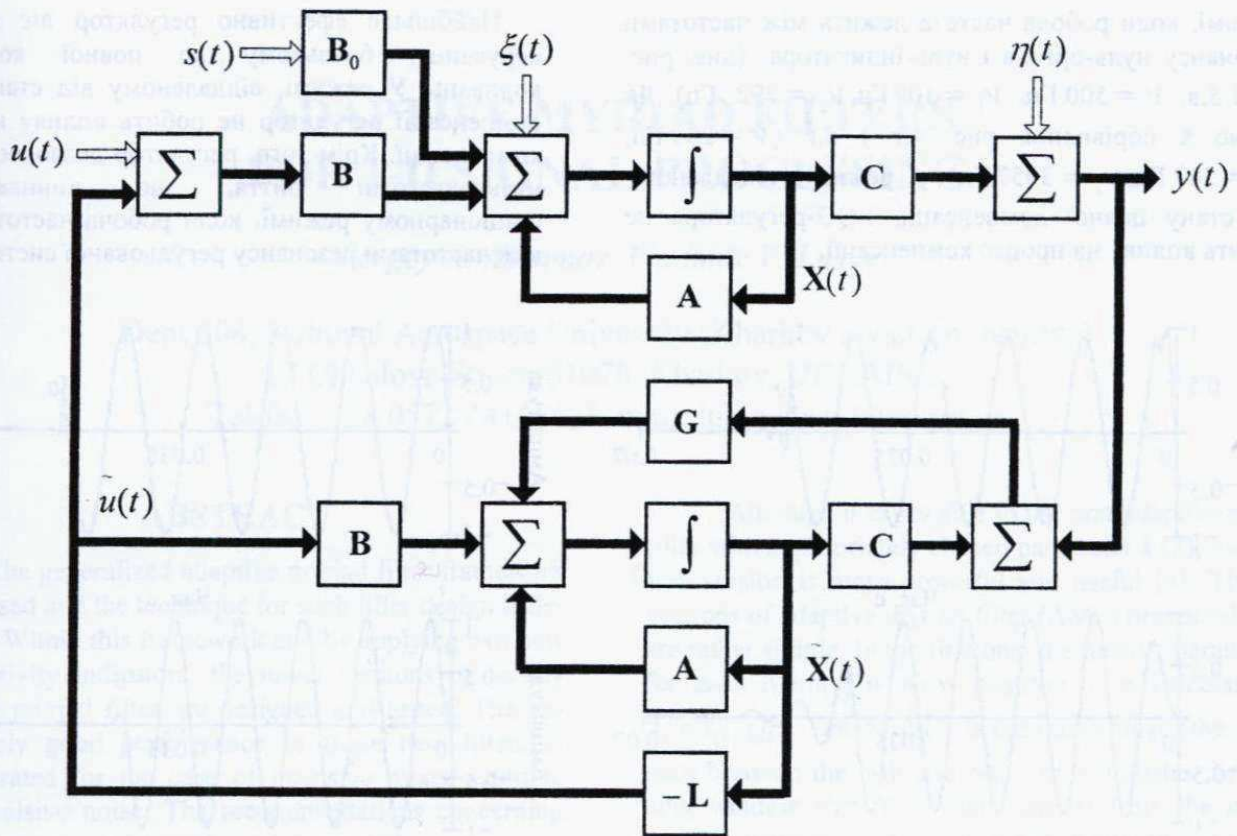


Рис. 2. Блок-схема замкнутої системи керування компенсацією камери малого об'єму.

2. РЕЗУЛЬТАТ МОДЕЛЮВАННЯ

Моделювання керування камерою проводилося для системи, динаміка якої характеризується співвідношеннями (2). АФЧХ розімкнутої системи показана на рис. 3, а, в. Резонансна частота нуля-органа $\nu_1 = 547$ Гц, нуль-індикатора $\nu_2 = 3957$ Гц, їх добротності $Q_1 \approx 4.6$ і $Q_2 \approx 6.4$. На рис. 3, б зображена АЧХ тієї ж системи, але з контуром зворотного зв'язку по стану, підключеному до входу керування. ФЧХ замкнутої і розімкнутої систем практично ідентичні. З порівняння представлених даних видно, що LQG-регулятор усуває низькочастотний полюс системи, практично не змінюючи її фазових властивостей. У даному випадку значимість помилки спостереження $\sigma = 10$.

На рис. 4, а і 5, а зображені відгуки системи при компенсації, проведеної на частоті $\nu = 100$ Гц. У момент часу t_0 зовнішнім керуючим сигналом система переводилася в режим повної компенсації зміною фази сигналу керування на -90° . Видно, що LQG-регулятор послабляє перехідний процес, що виникає при стрибку фази сигналу керування. Як видно з рис. 4, б і 5, б ($\nu = 120$ Гц, $\nu_1 = 164$ Гц, $\nu_2 = 1189$ Гц) ефект застосування LQG-регулятора зростає при наближенні робочої частоти до частоти резонансу системи. Більш того, LQG-регулятора усуває також низькочастотні биття, що виникають при роботі камери в стаціонарному

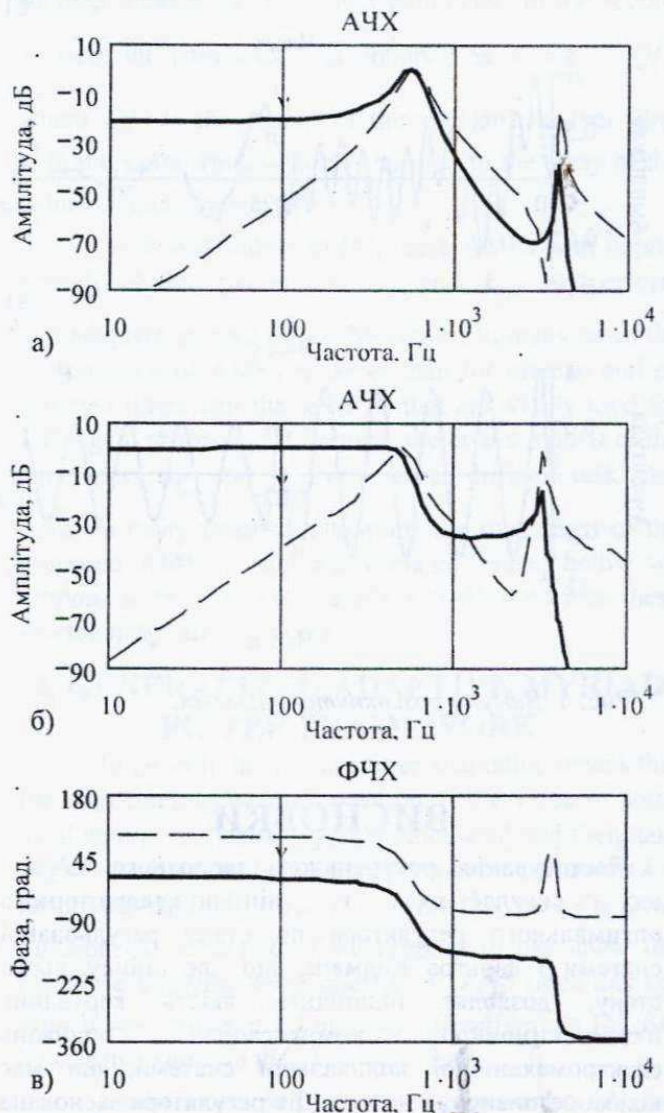


Рис. 3. АФЧХ (а, в) розімкнутої і АЧХ (б) замкнутої систем: — вхід керування, --- опорний

режимі, коли робоча частота лежить між частотами резонансу нуль-органа і нуль-індикатора (див. рис. 4, в і 5, в, $\nu = 500$ Гц, $\nu_1 = 109$ Гц, $\nu_2 = 792$ Гц). Як видно з порівняння рис. 4, г і 5, г ($\nu = 200$ Гц, $\nu_1 = 547$ Гц, $\nu_2 = 3957$ Гц) у режимі, віддаленому від стану повної компенсації, LQG-регулятора не робить впливу на процес компенсації.

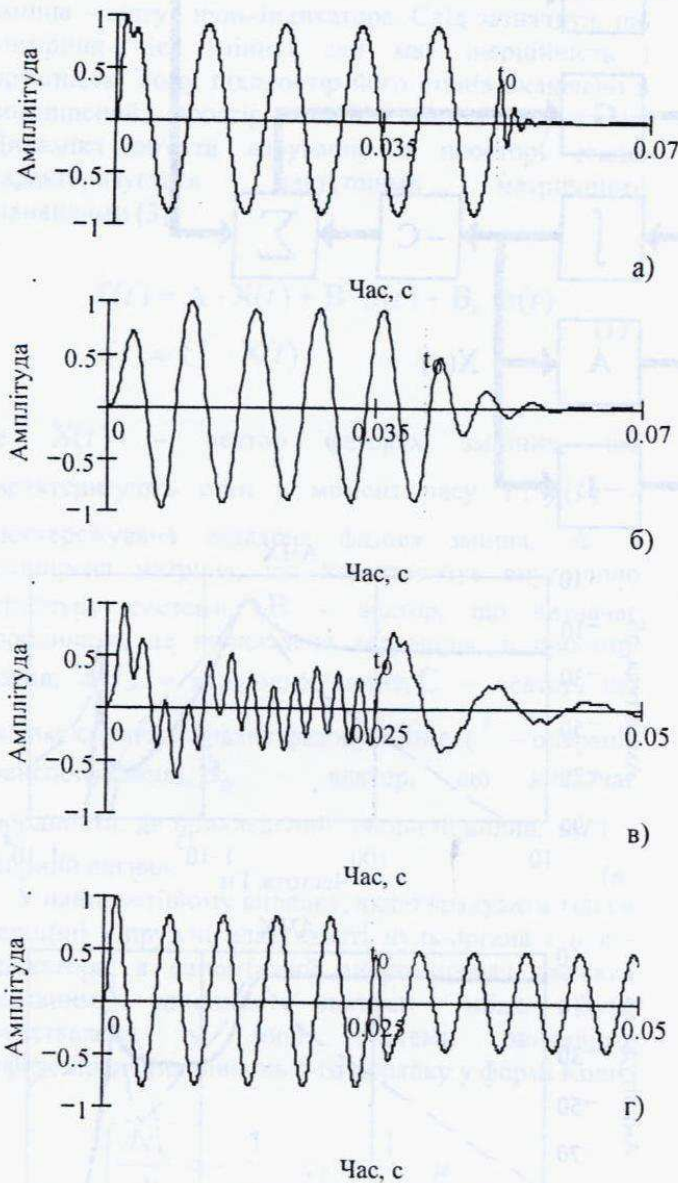


Рис. 4. Відгуки розімкнутої системи.

Найбільше ефективно регулятор діє в режимі керування, близькому до повної компенсації коливань. У режимі, віддаленому від стану повної компенсації регулятор не робить впливу на процес компенсації. Крім того, регулятор дозволяє усувати низькочастотні биття, що виникають в стаціонарному режимі, коли робоча частота лежить між частотами резонансу регульованої системи.

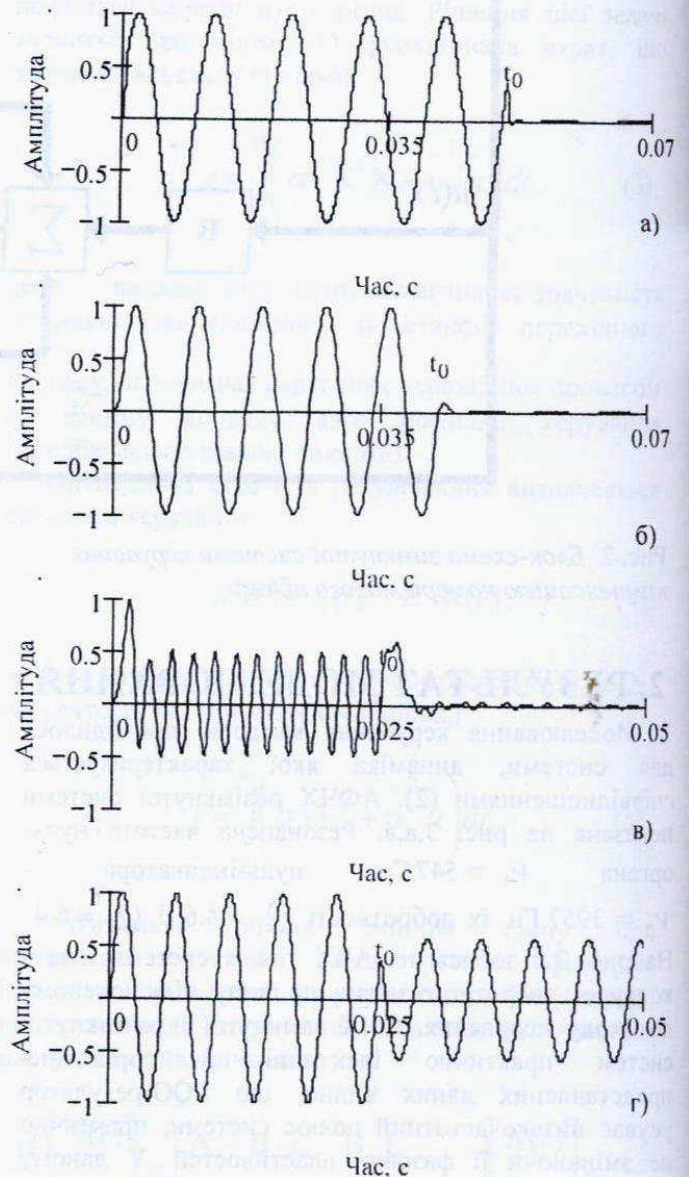


Рис. 5. Відгуки замкнутої системи.

ВИСНОВКИ

Застосування рекурсивного зворотного зв'язку, що складається з лінійно-квадратичного оптимального регулятора по стану регульованої системи і фільтра Калмана, що дає оцінку цього стану, дозволяє підвищити якість керування п'єзоелектричною компенсацією коливань електромеханічної коливальної системи, що має кілька резонансних частот. Дія регулятора заснована на зниженні впливу перехідних процесів, що виникають у момент зміни амплітуди чи фази гармонійного сигналу на вході керування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Справочник по гидроакустике/ А. П. Евтютов, А. Е. Колесников, Е. А. Корепин и др. Л.: Судостроение, 1988. 522 с.
2. Маццола К. Дж., Бердуэлл Дж. Д., Атанс М. Регулировка излучаемого давления с помощью обратной связи, зависящей от состояния системы.//Подводная акустика и обработка сигналов/Под ред.Л. Бьёрне. М.: Мир, 1979. С. 251-255.
3. Браммер К, Зиффлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. М.: Наука, 1982. 200 с.