

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЯКОСТІ ФІЛЬТРАЦІЇ І ПРОГНОЗУВАННЯ ДВОКОНТУРНОГО І ТРИКОНТУРНОГО АДАПТИВНИХ ЕКСПОНЕНЦІАЛЬНИХ ФІЛЬТРІВ

Вступ. У статті проведено порівняльний аналіз якості фільтрації та прогнозування адаптивних експоненціальних двоконтурного і триконтурного фільтрів. Головна відмінність між дво- і триконтурним фільтрами полягає у кількості контурів фільтрації, які використовуються для оцінки якості фільтрації, та їх програмна реалізація. **Цілі.** Розглянути доцільність використання триконтурного фільтра-предиктора у системах керування у ролі алгоритму обробки інформації, у порівнянні із двоконтурним. **Методологія.** Було застосовано концепції аналізу часових рядів та математичне моделювання в пакеті Matlab. **Результати.** Отримано характеристики середньоквадратичних похибок фільтрації і прогнозу в залежності від кількості кроків, на які здійснюється прогнозування, та кількості кроків, що використовуються для оцінювання якості фільтрації, для двох варіацій фільтрів. **Оригінальність.** Вперше було визначено зв'язок між середньоквадратичними похибками (фільтрації та прогнозу) та наступними параметрами: кількість кроків, на які здійснюється прогнозування; кількість кроків, які алгоритм обробки даних використовує для оцінки якості процесу фільтрації, для дво- та триконтурного алгоритмів фільтрації та прогнозування. Проаналізовано актуальність застосування двох різних алгоритмів адаптації коефіцієнта згладжування в залежності від ресурсів ЕОМ. **Практичне значення.** Здійснено реалізацію запропонованих алгоритмів на мові програмування Matlab, які можуть бути інтегровані в різні автоматизовані системи управління з метою фільтрації та прогнозування значень спотвореного шумами сигналу. Це дослідження дає можливість обрати ефективний алгоритм обробки даних в залежності від поставленої задачі.

Ключові слова: алгоритм обробки даних, експоненціальне згладжування, шум, прогноз, корисний сигнал, адаптація, коефіцієнт згладжування.

Вступ

Дво- та триконтурні алгоритми фільтрації та прогнозування [1, 2] можуть бути застосовані в системах автоматичного керування для визначення корисного сигналу як в каналах вимірювання так і в каналах керування. Найбільш ґрунтовна різниця між ними лежить у ресурсах використання ЕОМ та в принципі реалізації у вигляді скрипту в середовищі, в якому відбувається реалізація даного алгоритму.

Подібно до фільтра, адаптація якого функціонує із використанням МНК [3, 4] якість фільтрації та прогнозування залежать від параметрів фільтрації, що задаються на початку роботи. На відміну від попередньої варіації фільтра дво- і триконтурні фільтри, окрім як від форми сигналу, залежать від двох параметрів, а саме:

m – кількість кроків, на які здійснюється прогнозування;

e_t – кількість кроків, що використовуються алгоритмом для оцінки якості фільтрації.

Постановка проблеми

Мета даного дослідження полягає у визначенні діапазону значень параметрів m і e_t , при встановленні яких, алгоритм обробки інформації показує найкращі результати. Для цього було проведено моделювання в середовищі Matlab, задачею якого було отримання характеристик, що визначають зв'язок якості фільтрації і прогнозування від зміни вищеза-

значених параметрів – $\varepsilon_{RMS-filt}(m, e_t)$ – середньоквадратична похибка фільтрації і $\varepsilon_{RMS-forec}(m, e_t)$ – середньоквадратична похибка прогнозу із урахуванням зміни характеристик вхідного сигналу. Корисний сигнал може бути описаним у вигляді функції:

$$x(k) = K_{max} \cdot \sin\left(\frac{k}{K_f}\right). \quad (1)$$

Протягом досліджень його амплітуда і частота змінювались шляхом зміни K_{max} та K_f . Параметр, що визначав амплітуду шумів, змінювався в часі, стрибкоподібно зростаючи і спадаючи.

Результати досліджень представлені у вигляді просторових графіків залежностей $\varepsilon_{RMS-filt}(m, e_t)$ і $\varepsilon_{RMS-forec}(m, e_t)$.

Аналіз результатів моделювання

1. Залежність похибки фільтрації $\varepsilon_{RMS-filt}(m, e_t)$ та похибки прогнозу $\varepsilon_{RMS-forec}(m, e_t)$ при вхідному сигналі (1) з $K_{max}=1$; $K_f=2$.

Подібно до фільтра, адаптація якого базується на МНК [3], зі зростанням параметра e_t коливання значення похибки фільтрації, що можна спостерігати на ділянці значень e_t від 5 до 20, зменшується, але подальше збільшення даного параметра веде собою зростання значень середньоквадратичної похибки фільтрації. Розглядаючи роботу дво- і триконтурного фільтра варто відзначити різницю величин похибок фільтрації при відносно невеликих значеннях e_t – 1-5.

Порівняно із характеристиками зображеними на рис. 1 а) значення середньоквадратичної похибки на графіках (рис. 1, б)) перевищує приблизно на 25%. Частота появи недопустимо великих значень похибок фільтрації у роботі триконтурного фільтра при різних значеннях параметра m перевищує дане значення у випадку використання двоконтурного фільтра приблизно на 40-50%. Ці факти накладають обмеження на використання триконтурного фільтра за відсутності або недостатні априорної інформації про характер вхідного сигналу.

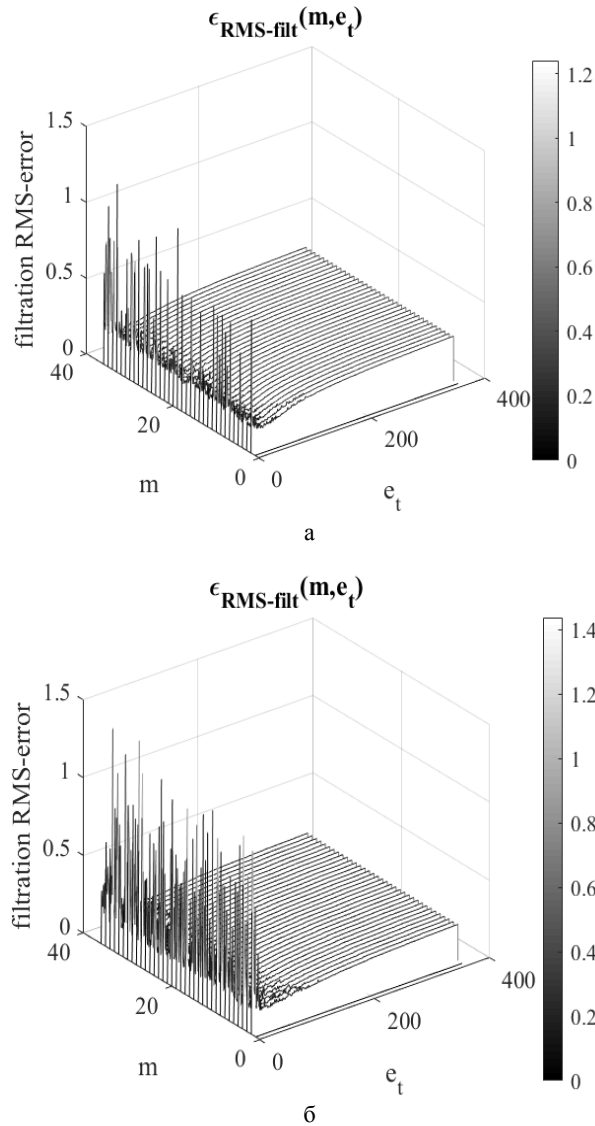


Рис. 1. Залежності середньоквадратичних похибок фільтрації від зміни параметрів m і e_t : а – двоконтурного фільтра; б – триконтурного фільтра

Значення параметра m не впливає на характер залежності $\epsilon_{RMS-filt}(m, e_t)$, але у даному випадку його зміна була використана для збору статистичних даних, таких як частота появи високих значень похибки при різних значеннях параметру e_t .

Характер залежностей, що зображені на рис. 2 визначається зміною параметра m . Можна зробити висновок, що значення параметру e_t не може бути менше 2, незалежно на яку кількість кроків здійснюється прогнозування.

У випадку, якщо фільтр використовується для визначення прогнозу, встановлення значення α_0 (початкове значення коефіцієнту згладжування), що приблизно відповідає рівню шумів, дозволяє значно зменшити час адаптації і втрати корисної інформації. Дане моделювання здійснювалось для 2000 значень i , якщо кількість вимірних значень сигналу збільшується, кривизна зростання характеристик похибки прогнозу, що показані на рис. 2, зменшуватиметься.

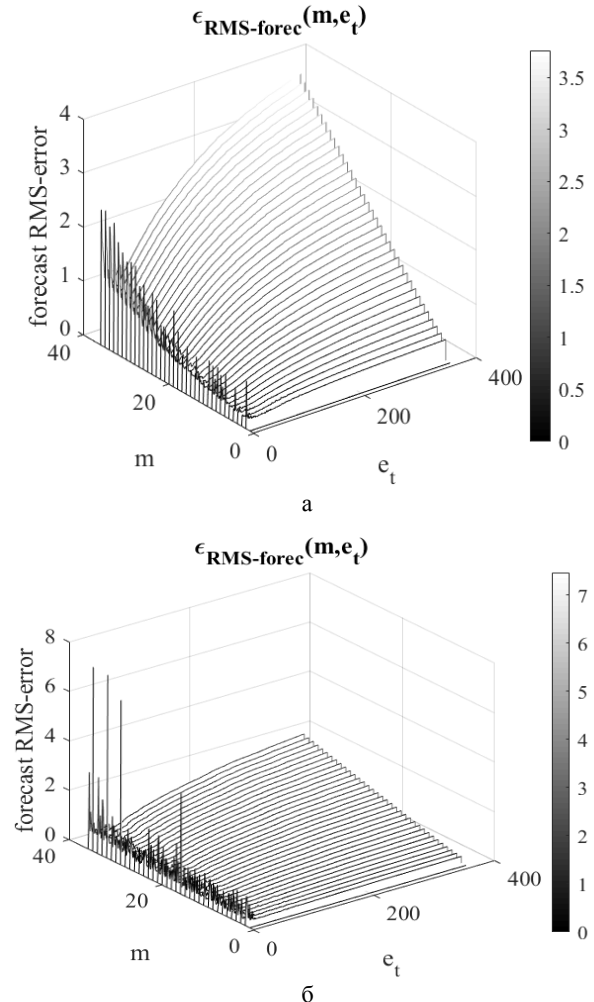


Рис. 2. Залежності середньоквадратичних похибок прогнозу від зміни параметрів m і e_t : а – двоконтурного фільтра; б – триконтурного фільтра

Для використання дво- та триконтурного фільтрів у якості предиктора при зменшенні кількості вимірів сигналу зростає необхідність наявності априорної інформації для забезпечення необхідної якості прогнозування, а саме співвідношення шум-сигнал для визначення α_0 і інформацію, яка б описувала поведінку системи і визначала форму сигналу, що надходить на вхід фільтра.

Триконтурний фільтр потребує значних ресурсів реалізації, зменшуючи середнє значення похибки фільтрації всього на 4.6%, а похибка прогнозу зменшується менше ніж на 1%. Тому його застосування потребує подальших досліджень і оптимізації.

2. Залежність похибки фільтрації $\epsilon_{RMS-filt}(m, e_t)$ та похибки прогнозу $\epsilon_{RMS-forec}(m, e_t)$ при вхідному сигналі (1) з $K_{max}=1$; $K_f=1$.

Даний дослід моделює роботу фільтрів в умовах швидкої, порівняно із попереднім дослідом, зміни корисного сигналу. У даному випадку великі значення похибок фільтрації при відносно малих значеннях параметру e_t (рис. 3) спостерігаються у обох модифікаціях фільтра. Це вказує на те, що принцип роботи триконтурного фільтра в умовах швидкої зміни корисного сигналу визначає якість роботи кожного контуру на основі подвійної умови і запобігає зміні коефіцієнта згладжування у випадку недостатньої кількості інформації про якість згладжування.

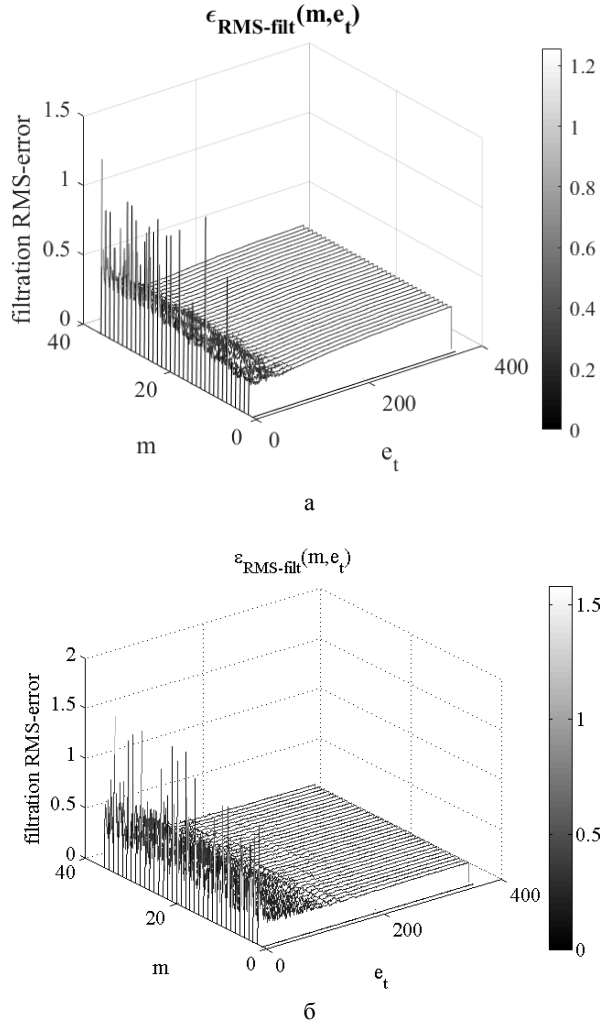


Рис. 3. Залежності середньоквадратичних похибок фільтрації від зміни параметрів m і e_t :
а – двоконтурного фільтра;
б – триконтурного фільтра

Розглядаючи графіки залежностей похибок прогнозу $\epsilon_{RMS-forec}$ (рис. 4) можна визначити, що двоконтурний фільтр, навіть при найменших значеннях параметру e_t зберігає тенденцію зростання похибки прогнозу в залежності від зростання кількості кроків, на які здійснюється визначення прогнозованих значень.

Порівнюючи отримані характеристики дво- і триконтурного фільтрів бачимо, що у роботі останнього спостерігаються критичні величини похибок прогнозу. Це підтверджує неможливість його використання із малими значеннями параметру e_t і зме-

ншує можливість його використання у системах із великими кроками дискретизації вимірювальних пристроїв.

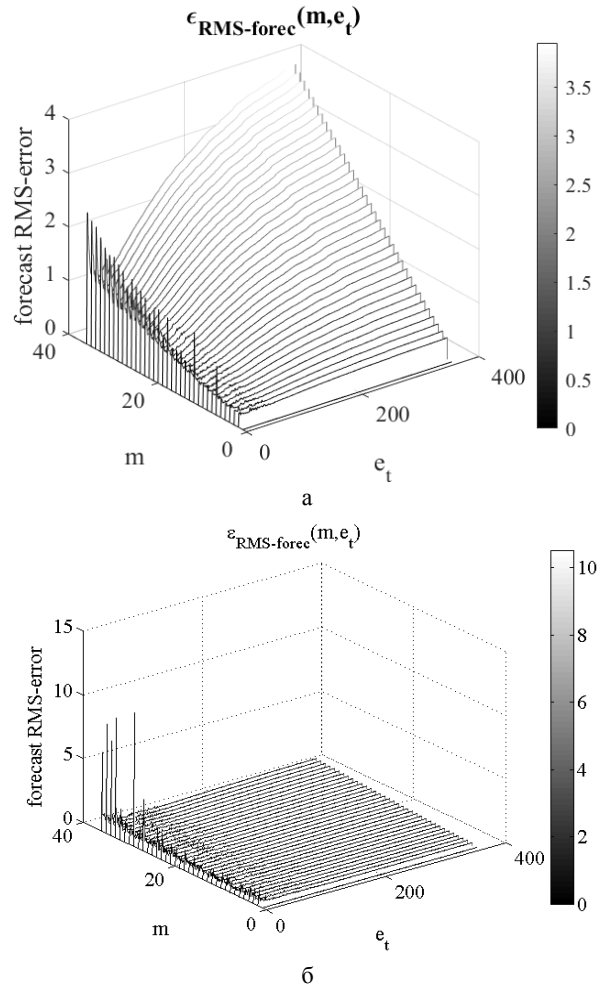


Рис. 4. Залежності середньоквадратичних похибок прогнозу від зміни параметрів m і e_t :
а – двоконтурного фільтра;
б – триконтурного фільтра

3. Залежність похибки фільтрації $\epsilon_{RMS-filt}(m, e_t)$ та прогнозу $\epsilon_{RMS-forec}(m, e_t)$ при вхідному сигналі (1) з $K_{max}=2$; $K_f=2$.

Порівнюючи характеристики зображені на рис. 5 і 6 із попередніми дослідженнями можна зробити висновок, що значення параметру e_t відіграє вирішальну роль у якості фільтрації і прогнозування для даних модифікацій фільтрів. Його значення визначає кількість кроків для оцінювання якості згладжування протягом процесу адаптації до рівня шумів. Підбір даного параметру залежить від апріорних даних про форму корисного сигналу і швидкість його зміни.

Зміна параметру m впливає на якість прогнозу. Чим більший час на який потребується здійснити визначення прогнозованих значень, тим більше значення похибки прогнозу буде спостерігатись. По характеристиках отриманих із вищеписаних експериментів можна зробити висновок, що підбір комбінації параметрів e_t і m зводиться до визначення кількості кроків, що використовуються для оцінки якості фільтрації кожного контуру.

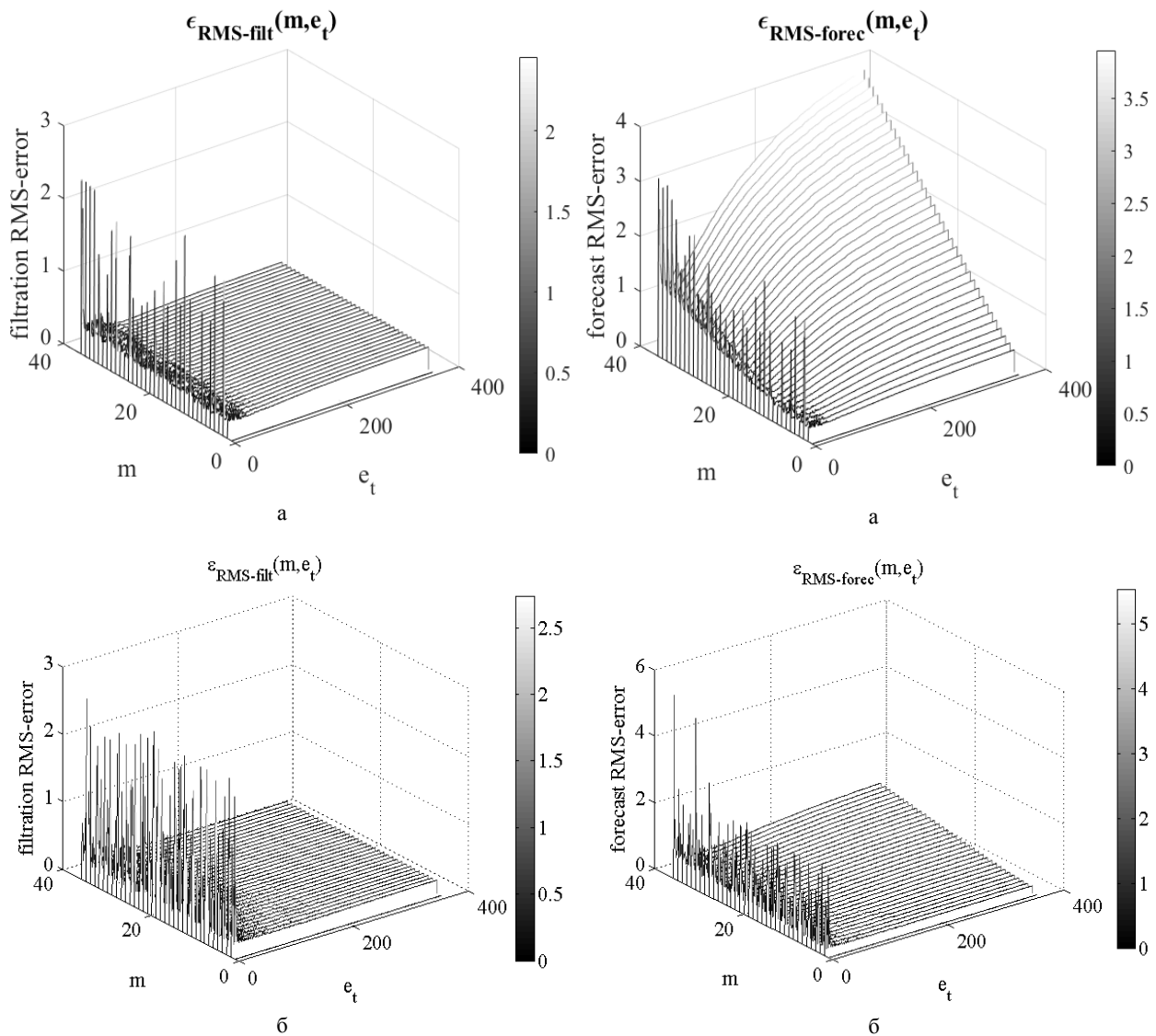


Рис. 5. Залежності середньоквадратичних похибок фільтрації від зміни параметрів m і e_t :
а – двоконтурного фільтра;
б – триконтурного фільтра

Рис. 6. Залежності середньоквадратичних похибок прогнозу від зміни параметрів m і e_t :
а – двоконтурного фільтра;
б – триконтурного фільтра

ВИСНОВКИ

У результаті дослідження було проведено порівняльний аналіз роботи двоконтурного адаптивного фільтра та триконтурного адаптивного фільтра. Дані алгоритми обробки інформації дозволяють визначати корисну складову і прогнозовані значення сигналу.

Їхня програмна реалізація дозволила провести дослідження впливу встановлених параметрів m і e_t на якість фільтрації та прогнозування. За результатами даних досліджень можна зробити наступні висновки:

- використання запропонованих алгоритмів є актуальним в умовах невизначеності або нестачі апріорної інформації про природу досліджуваного об'єкту або процесу і, відповідно, сигналу, який є відображенням протікання того чи іншого процесу;

- підбір параметрів m і e_t є вирішальним фактором для якісної обробки даних за допомогою даних алгоритмів;

- підбір параметра e_t залежить від часу дискретизації наступним чином: зі збільшенням часу дискретизації значення параметру e_t зменшується і навпаки;

- при збільшенні кількості кроків, на які здійснюються визначення прогнозованих значень сигналу, похибка прогнозування зростає у відповідності до наведених характеристик;

- використання триконтурного фільтра-предиктора потребує більшої кількості ресурсів ЕОМ, що призводить до збільшення часу на обробку даних, але дозволяє більш точно оцінити якість роботи кожного контуру фільтрації;

- триконтурний фільтр дозволяє уникнути перехідних процесів під час адаптації коефіцієнта згладжування, але у його роботі має місце перемикання між контурами, що призводить до стрибкоподібних змін значень відфільтрованого сигналу у момент оцінки якості фільтрації кожного із контурів;

- дана програмна реалізація показує, що обробка інформації двоконтурним фільтром-предиктором займає приблизно втричі менше часу, аніж із використанням фільтра із трьома контурами;

- час на обробку даних може змінюватись в залежності від оптимальності програмної реалізації даних алгоритмів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Боряк Б.Р. Аналіз ефективності застосування адаптивного двоконтурного фільтра-екстраполятора в залежності від форми сигналу / Б.Р. Боряк, А.М. Сільвестров // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2017. – Т. 6 (46). – С. 255-259.
2. Боряк Б.Р. Триконтурний адаптивний експоненціальний фільтр-екстраполятор / Б.Р. Боряк, А.М. Сільвестров // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2017. – Т. 5 (45). – С. 6-8.
3. Boriak B. R. Method of brown's exponential filter adaptation by using the method of least squares / B. R. Boriak, A. M. Silvestrov, V. V. Lutsio // Electronics and Control Systems. – 2017. – №54. – С. 27–32.
4. Boriak B. R. Relationships between filter-extrapolator parameters and quality of filtration and forecast / B. R. Boriak. // Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal. – Poltava: PNTU, 2018. – VOL. 4 (50). – PP. 27–32.

Рецензент: д-р техн. наук, д-р техн. наук, доц. О.В. Шефер,
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.
Received (Надійшла) 20.10.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 09.01.2019

Сравнительный анализ качества фильтрации и прогнозирование двухконтурного и трехконтурного адаптивных экспоненциальных фильтров

Б. Р. Боряк

Введение. В статье проведен сравнительный анализ качества фильтрации и прогнозирования адаптивных экспоненциальных двухконтурного и трехконтурного фильтров. Главное отличие между двух- и трехконтурными фильтрами заключается в количестве контуров фильтрации, которые используются для оценки качества фильтрации, а также их программная реализации. **Цели.** Рассмотреть целесообразность использования трехконтурного фильтра-предиктора в системах управления, как алгоритм обработки информации, по сравнению с двухконтурным. **Методология.** Применено концепции анализа временных рядов и математическое моделирование в пакете Matlab. **Результаты.** Получено характеристики среднеквадратических погрешностей фильтрации и прогноза в зависимости от количества шагов, на которые осуществляется прогнозирование, и количества шагов, используемых для оценки качества фильтрации, для двух вариаций фильтров. **Оригинальность.** Впервые определено связь между среднеквадратичными погрешностями (фильтрации и прогноза) и следующими параметрами: количество шагов, на которые осуществляется прогнозирование; количество шагов, которые алгоритм обработки данных использует для оценки качества процесса фильтрации, для двух- и трехконтурного алгоритмов фильтрации и прогнозирования. Проанализировано актуальность применения двух различных алгоритмов адаптации коэффициента сглаживания в зависимости от ресурсов ЭВМ. **Практическое значение.** Осуществлено реализацию предложенных алгоритмов на языке программирования Matlab, которые могут быть интегрированы в различные автоматизированные системы управления с целью фильтрации и прогнозирования значений искаженного шумами сигнала. Это исследование дает возможность выбрать эффективный алгоритм обработки данных в зависимости от поставленной задачи.

Ключевые слова алгоритм обработки данных, экспоненциальное сглаживание, шум, прогноз, полезный сигнал, адаптация, коэффициент сглаживания.

Filtration and prediction quality comparative analysis of two- and three-loop adaptive exponential filters

B. Boriak

Introduction. The article provides a comparative analysis of filtration and prediction quality of the adaptive exponential two-loop and three-loop filters. The main difference between two- and three-loop filters is the number of filtering loops that are used to evaluate the quality of the filtration process, as well as their software implementation. **Aims.** To consider the feasibility of using a three-loop filter-predictor in control systems, as a data processing algorithm, in comparison with two-loop filter. **Methodology.** I applied the concepts of time series analysis and mathematical modeling in the Matlab. **Results.** I obtained the characteristics of filtration and prediction standard errors depending on the number of steps which the forecast is made for and the quantity of steps which the data processing algorithm uses for quality estimation of filtering process for two filters variations. **Originality.** For the first time I have defined the relationships between rms-errors (filtration and forecast) and the following parameters: the number of steps which the forecast is made for, the quantity of steps which the data processing algorithm uses for quality estimation of filtering process for two- and three-loop filtering and prediction algorithms. I analyzed the relevance of applying two different smoothing coefficient adaptation algorithms depending on computer resources. **Practical value.** I have programed the proposed algorithms using Matlab programming language. This software can be integrated into various automated control systems in order to filter and predict the values of the signal distorted by noise. This research provides an opportunity to choose an efficient data processing algorithm, depending on the task.

Keywords: data processing algorithm, exponential smoothing, noise, forecast, original signal, adaptation, smoothing factor.