

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

БОРЯК БОГДАН РАДИСЛАВОВИЧ



УДК 004.67:519.218.82]:681.5(043.3)

**НОНІУСНИЙ АДАПТИВНИЙ ФІЛЬТР-ПРЕДИКТОР –
КОМПЕНСАТОР ЗАПІЗНЕННЯ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

05.13.03 – Системи і процеси керування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття

наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматики і електроприводу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор,
Сільвестров Антон Миколайович,
Національний технічний університет
України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», м. Київ,
професор кафедри теоретичної
електротехніки.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
Синєглазов Віктор Михайлович,
Національний авіаційний університет,
м. Київ,
завідувач кафедри авіаційних комп'ютерно-
інтегрованих комплексів;

доктор технічних наук, професор,
Кошовий Микола Дмитрович,
Національний аерокосмічний університет ім.
М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний
інститут", м. Харків,
завідувач кафедри інтелектуальних
вимірювальних систем та інженерії якості.

Захист відбудеться «10» жовтня 2019 року о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.03 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058 Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корп. 1, ауд. 1.001.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058 Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий «___» вересня 2019 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої
ради Д 26.062.03



Н. С. Кузьменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Наявність запізнювання в об'єктах керування значно ускладнює можливість реалізації оптимальних регуляторів, які повинні працювати з випередженням вектору стану об'єкта керування. В оптимальному регуляторі для об'єкта з запізненням враховується передісторія зміни станів об'єкта. При реалізації оптимального регулятора для об'єктів з запізненням в його структурі з'являється динамічна модель об'єкта, за допомогою якої здійснюється формування випереджених координат. Для цифрової реалізації оптимального регулятора формування випередження вектору стану здійснюється циклічно за дискретними рівняннями, які описують динаміку об'єкта. Якщо модель об'єкта є надто спрощеною або динаміка реального об'єкта внаслідок його природної нестационарності значно відрізняється від моделі, то формування прогнозованих координат відбувається зі значними похибками. На формування прогнозованих координат значним чином впливають шуми, які мають місце в каналах керування і вимірювання та можуть мати нестационарний характер. Тому, актуальною і своєчасною залишається розробка адаптивних алгоритмів обробки інформації, які дадуть можливість здійснити формування керуючого впливу в системах на основі об'єктивних даних про поточний стан об'єкта керування.

У даній роботі пропонується метод обробки інформації, який дозволяє значно зменшити спотворення сигналу, що несе корисну інформацію в каналах вимірювань і керування, а також дозволяє визначити прогнозоване значення корисного сигналу з поєднання нестационарного шуму і сигналу. Використання значень прогнозованого сигналу дає змогу оцінити стан системи в наступний момент часу, на основі чого, компенсувати запізнення і сформувати оптимальний керуючий вплив.

Особливість структури фільтруючого пристрою полягає в тому, що він має бути інтегрований у системи автоматичного керування і працювати в режимі реального часу з мінімальними витратами ресурсів обчислювальної техніки, а також мати можливість підлаштовуватись до зміни характеристик спотворень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких представлено в дисертації, проводились протягом 2015–2018 рр., згідно з планами наукових досліджень кафедри автоматики і електроприводу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка та в рамках Держбюджетної науково-дослідної роботи «Методи та засоби структурно-параметричної ідентифікації електротехнічних систем технологічної лінії із виробництва вітчизняного кабелю з полімерною ізоляцією на надвисокі напруги» (№ ДР–0116U003716).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є покращення функціонування систем автоматичного керування (САК), зменшення часу перехідних процесів, підвищення точності вихідної величини системи керування технологічними процесами (ТП) шляхом створення методу обробки інформації (сигналу), який визначає рисну складову сигналу та його

прогнозовані значення в каналах вимірювання інформації та каналах керування в умовах невизначеності та неповноти апріорної інформації.

Даний метод повинен забезпечувати не лише фільтрацію корисного сигналу без похибки слідування, позбавляючи його від високочастотних шумів, а і знаходити прогнозовані значення сигналу. Це дасть змогу компенсувати запізнення в системах автоматичного керування технологічним процесом.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- дослідити системи автоматичного керування об'єктами із запізненням та проаналізувати існуючі методи компенсації запізнення;
- розробити алгоритм фільтрації сигналу за умов зміни параметрів шумів і корисного сигналу;
- удосконалити алгоритм обробки сигналу з урахуванням недоліків існуючих алгоритмів;
- дослідити алгоритм обробки інформації з урахуванням різного характеру вхідного сигналу та характеру спотворень;
- реалізувати фільтр-предиктор за допомогою технічних засобів у вигляді окремого пристрою або програмного коду, що може бути записаний у пристрої керування або вимірювання;
- провести експерименти з інтеграції розробленого фільтра-предиктора в автоматизовані системи управління технологічними процесами відповідно до науково-дослідної роботи «Методи та засоби структурно-параметричної ідентифікації електротехнічних систем технологічної лінії із виробництва вітчизняного кабелю з полімерною ізоляцією на надвисокі напруги» та в робототехнічні комплекси.

Об'єкт дослідження – процес керування та отримання даних про технологічні параметри системи керування об'єктами із запізненням та систем, вимірювальні елементи яких піддаються випадковим спотворенням.

Предмет дослідження – методи, моделі та алгоритми цифрової обробки сигналів в системах керування.

Методи досліджень. Дисертаційні задачі вирішувалися з використанням загальних методів теорії автоматичного керування для опису систем автоматичного керування, їх елементів для їх подальшого дослідження; методів математичного моделювання систем для створення моделей процесів обробки даних; експериментальних методів для оцінювання результатів роботи розроблених моделей і методів; методи математичної статистики для аналізу достовірності отриманих результатів дослідження та встановлення взаємозв'язків між параметрами системи; для візуалізації результатів застосовувалися методи комп'ютерної графіки.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розроблено модель фільтрації на основі ноніусного нарощування структури, яка функціонує з використанням подвійного експоненціального згладжування Р. Брауна, що на відміну від класичного подвійного експоненціального згладжування дозволяє усунути затримки, які мають місце

при фільтрації сигналу інерційним фільтром, забезпечує високу якість фільтрації та дозволяє визначити прогнозовані значення сигналів в режимі реального часу;

– вперше розроблено метод адаптації параметрів фільтра-предиктора з використанням апроксимації сигналу за методом найменших квадратів, що, на відміну від методів адаптації параметрів фільтрації подвійного експоненціального згладжування, не потребує апріорної інформації про тренд сигналу;

– вперше розроблено диференційний метод адаптації параметрів фільтра-предиктора з використанням двох та трьох ноніусних структур фільтрації, які функціонують із різними значеннями коефіцієнтів згладжування i , на відміну від класичних методів адаптації, не потребують апріорної інформації про характер корисного сигналу та амплітуди шумів, забезпечують високу якість фільтрації та вищу швидкість адаптації у порівнянні із методом адаптації із використанням методу найменших квадратів;

– набула подальшого розвитку модель експоненціального згладжування як методу фільтрації та прогнозування значень сигналу, представленого у вигляді часового ряду.

Практичне значення одержаних результатів. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень розроблено модель обробки інформації по визначенню корисного сигналу із сигналу, спотвореного високочастотними шумами, на основі експоненціального фільтра із компенсацією похибок слідування. Дану модель реалізовано в середовищах Matlab і Simulink. Комп'ютерний аналіз отриманої структури підтверджує її прездатність.

Розроблено алгоритм адаптації до рівня шумів із використанням МНК і одного контуру фільтрації, який забезпечує високу швидкодію протягом процесу обробки сигналу. Даний адаптивний фільтр-предиктор реалізовано у вигляді програми із використання мови програмування Matlab.

Розроблено алгоритми адаптації фільтра до рівня шумів, що застосовують два і три контури паралельної обробки сигналу із різними параметрами фільтрації, що забезпечує зміну параметру фільтрації залежно від зміни амплітуди шумів, а також визначення прогнозованих значень сигналів. Дані модифікації адаптивних фільтрів-предикторів реалізовано у вигляді програми із використання мови програмування Matlab і в середовищі програмування мікроконтролерів Arduino IDE.

Удосконалено та оптимізовано алгоритми адаптації параметрів фільтрації шляхом проведення комп'ютерного статистичного аналізу залежності похибок фільтрації та прогнозування від параметрів фільтра і корисного сигналу та за допомогою проведення експериментів по впровадженню комбінованих методів адаптації параметрів фільтра-предиктора.

Проведено порівняльний аналіз обраного фільтра з існуючими аналогами, за результатами якого середнє значення середньоквадратичної похибки (СКП) фільтрації розробленого фільтра зменшилось від 1.6 до 2.2 разів залежно від модифікації фільтра.

Проведене моделювання інтеграції адаптивного двоконтурного фільтра-предиктора в САК об'єктом із запізненням в середовищі Simulink, що дозволило позбавитись спотворень керуючого сигналу і зменшити похибку вихідної координати від 40 % до 70 %, залежно від характеру вхідного керуючого сигналу та рівня шумів.

Проведено дослідження можливості інтеграції фільтра-предиктора в системи детермінації навколишнього середовища промисловими роботами. За результатами експерименту час повороту серводвигуна рухомої ланки промислового робота зменшився на величину від 13 % до 33 %, при цьому похибка відслідковування відстані до поверхні зменшилась на 21 %.

Результати роботи використано під час виконання держбюджетної науково-дослідної роботи «Методи та засоби структурно-параметричної ідентифікації електротехнічних систем технологічної лінії із виробництва вітчизняного кабелю з полімерною ізоляцією на надвисокі напруги» (№ ДР–0116U003716).

Результати роботи впроваджено в навчальний процес Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» на кафедрі теоретичної електротехніки та Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка на кафедрі автоматики і електроприводу.

Особистий внесок здобувача. Усі положення, що виносяться на захист, отримано автором особисто. У публікаціях у співавторстві особистий внесок здобувача полягає в наступному: у [1] – розробка ноніусної структури включення фільтруючих одиниць, реалізація даної моделі у середовищі Simulink та з допомогою мови програмування Matlab, дослідження впливу параметрів елементів ноніусної структури на якість фільтрації та прогнозу; в [2] – розробка принципу адаптації коефіцієнта згладжування в залежності від рівня шумів за допомогою методу найменших квадратів, реалізація алгоритму обробки інформації у вигляді скрипту на мові програмування Matlab; в [3] – розробка методу адаптації параметрів фільтрації з використанням двох контурів фільтрації, а також дослідження особливостей застосування даного алгоритму обробки сигналів при різних формах сигналів, реалізація даної моделі у середовищі Simulink та з допомогою мови програмування Matlab; в [4] – опис методу адаптації параметрів фільтрації з використанням трьох контурів фільтрації, визначення особливостей структури та реалізація даної моделі за допомогою мови програмування Matlab; в [5] – дослідження можливості інтеграції фільтра-предиктора в контур керування процесом нанесення ізоляції на струмопровідну жилу з метою компенсації запізнення.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні, методологічні положення та результати досліджень були представлені і схвалені на міжнародних та всеукраїнських наукових, науково-практичних та науково-технічних конференціях: Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» (Полтава, 5 листопада, 2015 р.); VIII Всеукраїнській науково-практичній

конференції «Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки» (Полтава, грудень 2015 р.); VI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації», (Київ, квітень 2016 р.); 68 науковій конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, травень 2016 р.); II Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» (Полтава, 17 листопада 2016 р.); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки» (Полтава, 7–9 грудня 2016 р.); 69 науковій конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, квітень–травень 2017 р.); VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації» (Київ, квітень 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Kondratyuk Innovations XX – XXI» до 120-ої річниці з дня народження Юрія Кондратюка (Олександра Шаргея) (Полтава, травень 2017 р.); XXIV Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика» (Київ, 13–15 вересня 2017 р.); III Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» (Полтава, 4 грудня 2017 р.); X Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки» (Полтава, 6–8 грудня 2017 р.); Всеукраїнській конференції-семінарі молодих вчених «Explore Science – XXI» (Полтава, 28 березня 2018 р.); X Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації» (Полтава, 12–13 квітня 2018 р.); XXV Міжнародній конференції з автоматичного управління «AUTOMATICS – 2018» (Львів, 18–19 вересня 2018 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» (Полтава, 20 листопада 2018 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 19 наукових праць, серед яких 7 статей у наукових фахових виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз даних (Index Copernicus, General Impact Factor, Ulrich's Periodicals Directory), 12 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації становить 181 сторінку, з яких 19 сторінок містять додатки. Основна частина викладена на 151 сторінці друкованого тексту, містить 72 рисунка, 3 таблиці. Список використаних джерел містить 114 найменувань, які викладені на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дослідження з точки зору важливості визначення корисної складової сигналів керування та сигналів вимірювальних пристроїв, що описують стан об'єкта керування, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено предмет і об'єкт дослідження, викладено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів. Наведено інформацію щодо апробації результатів роботи, кількості публікацій, структури та обсягу роботи, розкрито особистий внесок здобувача.

У **першому розділі «Аналіз задач автоматизації процесів керування об'єктами із запізненням»** проведено аналіз особливостей керування об'єктами із запізненням (технологічними процесами (ТП)), а також існуючих методів компенсації запізнення. Аналіз проводився з точки зору багаторівневої декомпозиції системи керування як ієрархічної системи, що дало можливість здійснити формалізовану постановку задачі. Аналіз показав, що існуючі методи компенсації запізнення можуть ефективно функціонувати лише за умов можливості розрахунку значень запізнення, опису об'єкту у вигляді математичної моделі, з урахуванням його особливостей, наявності прогнозованих значень сигналів, що описують стан ТП. Лише високоточні вимірювальні пристрої здатні забезпечити високий рівень якості даних, що описують стан параметрів технологічного процесу, але дані засоби потребують значних економічних ресурсів. У більшості випадків дані про стан ТП можуть надходити від вимірювальних пристроїв із шумами, на основі яких формується опис стану системи. Запізнення в САК зумовлене часом, необхідним для переміщення речовини або енергії з місця подання збурення на вхід до місця вимірювання вихідної величини або здатністю системи до акумуляції речовини або енергії. Воно також може бути спричинене обробкою даних вимірювальним пристроєм за рахунок їхнього усереднення. Результати аналізу вказують на необхідність детального розгляду методів обробки інформації, які застосовуються в САК ТП для визначення корисної складової сигналів вимірювальних пристроїв.

Розглянуто існуючі методи фільтрації та прогнозування, серед яких фільтрація Калмана, Вінера, адаптивні алгоритми фільтрації та прогнозування, що використовують метод найменших квадратів та метод експоненціального згладжування. Для ефективного застосування більшості з них є необхідність наявності апріорної інформації про особливості протікання ТП. За умови відсутності або нестачі апріорної інформації їхня реалізація значно ускладнюється або унеможливується.

На підставі проведеного аналітичного огляду виявлено необхідність створення адаптивного фільтра-предиктора, який може працювати в режимі реального часу для обробки даних, що надходять від вимірювальних пристроїв системи керування ТП або в каналах керування за наявності спотворень сигналів, дозволяє отримати прогнозовані значення сигналів в умовах зміни параметрів шумів. Здійснено формалізовану постановку задачі, визначено зміст та етапи розв'язання поставлених задач для досягнення мети.

У другому розділі «Розробка структури адаптивного багаторівневого, багатокаскадного фільтра-екстраполятора» обґрунтовано вибір алгоритму обробки інформації як найпростішої ланки фільтрації та прогнозування. Запропоновано використовувати метод експоненціального згладжування, як такий, що потребує мінімальну кількість апріорної інформації про особливості ТП і є фільтром низьких частот (ФНЧ). Базова модель фільтрації і прогнозування розглядалась як неперервна ланка, яка може бути описана як передавальною функцією, так і у дискретній формі за допомогою різницевого рівняння:

$$\hat{x}(k) = \alpha \cdot x(k) + (1 - \alpha) \cdot \hat{x}(k - 1), \quad (1)$$

де $\hat{x}(k)$ – згладжене значення сигналу k -го кроку; α – коефіцієнт згладжування (ваговий коефіцієнт фільтрації); $x(k)$ – значення суми сигналу і шумів на вході алгоритму обробки даних (вхідний сигнал) на k -му кроці; $(1 - \alpha)$ – другий член ряду нескінченної геометричної прогресії в моделі Брауна, що є ваговим коефіцієнтом другої складової відфільтрованого значення сигналу; $\hat{x}(k - 1)$ – згладжене значення сигналу на $(k-1)$ кроці.

У процесі дослідження можливості використання даної моделі фільтрації визначено необхідність використання подвійного експоненціального згладжування Р. Брауна (послідовне підключення двох фільтруючих ланок), що дозволяє підвищити ступінь згладжування високочастотних шумів, але збільшує інерційність фільтра. У цьому випадку фільтрація та прогнозування описуються наступними різницевиими рівняннями:

$$\hat{\hat{x}}(k) = \alpha \cdot \hat{x}(k) + (1 - \alpha) \cdot \hat{\hat{x}}(k - 1), \quad (2)$$

$$\hat{\hat{x}}(k + m) = \hat{\hat{x}}(k) + m \cdot \Delta t \cdot \hat{\hat{x}}(k), \quad (3)$$

де m – кількість кроків, на які необхідно отримати прогноз; Δt – час між вимірами двох суміжних значень сигналу; $\hat{\hat{x}}(k)$ – перша похідна двічі згладженого сигналу.

Подальший аналіз обраної за основу моделі фільтрації вказує на протиріччя між вимогами фільтрації і точністю прогнозування. Чим вищий рівень шумів – тим меншим має бути значення коефіцієнта α , що приводить до зростання інерційності фільтра і збільшення усталеної похибки слідування $E(\infty)$ при відслідковуванні корисної складової сигналу $x^*(t)$. Підвищення ступеня згладжування призводить до зростання похибки слідування відфільтрованого сигналу по відношенню до корисного.

Дослідження роботи експоненціального фільтра-екстраполятора передбачало визначення зображення за Лапласом різниці між неперервним вхідним сигналом і двічі згладженим сигналом $E(p)$:

$$\begin{aligned} E(p) = x(p) - \hat{\hat{x}}(p) &= \left[1 - \frac{1}{(\tau p + 1)^2} \right] \cdot x(p) = \frac{(\tau p + 1)^2 - 1}{(\tau p + 1)^2} \cdot x(p) = \\ &= \frac{\tau^2 p^2 + 2\tau p}{(\tau p + 1)^2} \cdot x(p). \end{aligned} \quad (4)$$

За теоремою Лапласа для постійного сигналу похибка відсутня:

$$x(p) = \frac{x_0}{p}, \quad E_1(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \frac{\tau^2 p^2 + 2\tau p}{(\tau p + 1)^2} \cdot \frac{x_0}{p} \equiv 0; \quad (5)$$

для сигналу, що лінійно зростає – похибка стала:

$$x(p) = \frac{x_0}{p^2}, \quad E_2(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \frac{\tau^2 p^2 + 2\tau p}{(\tau p + 1)^2} \cdot \frac{x_0}{p^2} \equiv 2\tau x_0; \quad (6)$$

для сигналу, що зростає за квадратичною функцією – похибка прямує до нескінченності:

$$x(p) = \frac{x_0}{p^3}, \quad E_3(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \frac{\tau^2 p^2 + 2\tau p}{(\tau p + 1)^2} \cdot \frac{x_0}{p^3} \rightarrow \infty. \quad (7)$$

Отже фільтр (1), (2), (3) відслідковує без похибки слідування в усталеному режимі лише постійний сигнал $x^*(t) = const$. Якщо $\alpha \rightarrow 0$ – похибка зростає, якщо $\alpha \rightarrow 1$ – погіршується якість фільтрації, значно зростають похибки \hat{x} та $\hat{x}(t+T)$.

Як бачимо з рівнянь (5), (6) $E_1(\infty)$, $E_2(\infty)$ має на 1 меншу степінь полінома від полінома, яким описується сигнал. Тоді для відслідковування корисної складової сигналу $x(t)$ без усталеної похибки як полінома n -го степеню може бути застосований принцип ноніусного включення $n+1$ фільтруючих одиниць. Таким чином додавання $E_1(t)$ до $\hat{x}(t)$ дозволяє позбутися похибки (6), додавання $E_2(t)$ до $\hat{x}(t) + E_1(t)$ позбавляє похибку (7) і так далі.

Даний метод також спрощує обрахунок прогнозованих значень. У багаторівневій моделі прогнозу доцільно і достатньо використовувати перші два члени ряду Тейлора для опису прогнозованих значень сигналу, як це наведено в рівнянні (3). Оскільки всі корені характеристичного полінома дійсні і від'ємні $p = -\alpha$, то перехідний процес буде складатись із суми затухаючих експонент. Чим більше значення α , тим менший час перехідного процесу при включенні фільтра або при ступінчатій зміні корисного сигналу.

На підставі проведеного аналізу розроблено модель фільтрації та прогнозування, яка передбачає підключення методом ноніусного нарощування структури трьох фільтруючих одиниць, кожна з яких функціонує за принципом подвійного експоненціального згладжування (рис. 1).

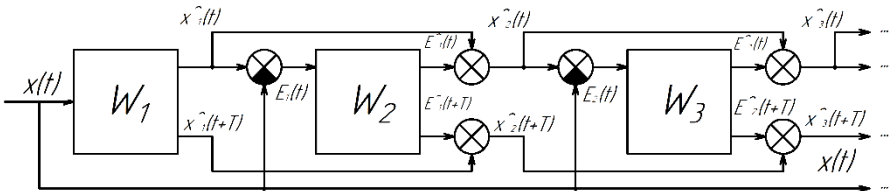


Рис. 1. Структурна схема ноніусного фільтра-предиктора

Результатом роботи запропонованої моделі є повна компенсація похибки слідування при відслідковуванні сигналу, що лінійно змінюється в часі на виході двох фільтруючих одиниць, та компенсація похибки слідування

сигналу, що може бути описаний квадратичною функцією, на виході трьох фільтруючих одиниць (рис. 2, рис. 3).

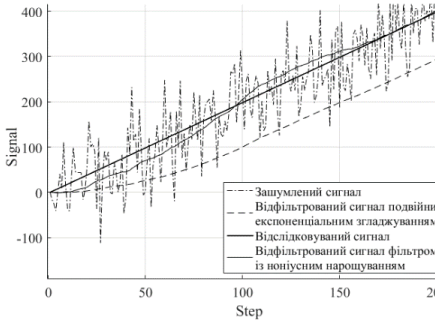


Рис. 2. Результати подвійного експоненціальне згладжування і ноніусної моделі фільтрації сигналу, що лінійно змінюється в часі

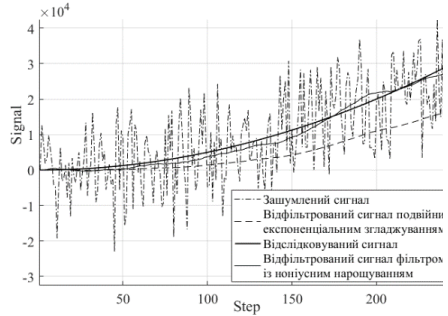


Рис. 3. Результати подвійного експоненціальне згладжування і ноніусної моделі фільтрації сигналу, що параболічно змінюється в часі

У реальних системах керування параметри сигналів і шумів можуть змінюватись, що визначає необхідність модифікації запропонованої моделі шляхом адаптації параметрів фільтрації. За умов відсутності апіорної інформації про форму сигналу, який відслідковується, а також інформації про зміну амплітуди шумів визначення абсолютної похибки як джерела інформації про якість роботи фільтруючого алгоритму не є можливим.

З урахуванням даних умов запропоновано метод адаптації коефіцієнта згладжування α як основного параметра фільтрації, із використанням методу найменших квадратів (МНК). Адаптація коефіцієнта згладжування відповідно до даного методу здійснюється за наступним алгоритмом (рис.4):

1. Фільтрація і прогнозування сигналу з початковим значенням коефіцієнта α відбувається протягом певного часу, заповнюючи масив значень, кількість яких визначається перед запуском алгоритму.

2. Після досягнення необхідної кількості значень відфільтрованого або прогнозованого сигналу, на основі даного масиву, за МНК визначається поліном n -го степеня. Даний поліном є функцією, яка описує відрізок сигналу в часовій області, і є опорним для визначення середньоквадратичної похибки.

3. Відбувається обрахунок значень опорного сигналу на кожному кроці даного відрізка, вираховується середньоквадратична похибка (СКП) між опорним і відфільтрованим сигналами.

4. Якщо СКП перевищує допустиме значення, яке задається перед початком роботи алгоритму, то коефіцієнт згладжування зменшується на певну визначену кількість відсотків від свого попереднього значення. Якщо задане допустиме значення похибки перевищує або рівне значенню

обрахованої СКП – алгоритм продовжує функціонувати із значенням коефіцієнта згладжування, що встановилось до цього.

Цикл повторюється після обнулення масиву значень, які використовуються для визначення поліному опорного сигналу.

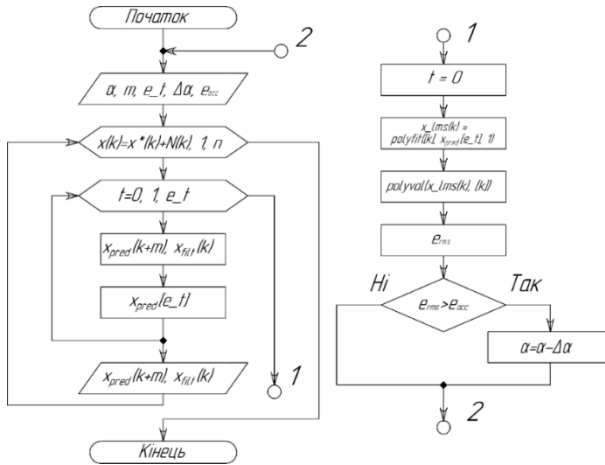


Рис. 4. Метод адаптації коефіцієнта згладжування з використанням МНК

Метод реалізовано у вигляді програми на мові програмування Matlab. Результати роботи алгоритму представлено на рис. 5 і 6

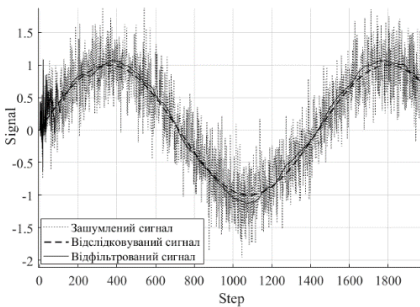


Рис. 5. Процес фільтрації за допомогою ноніусної моделі фільтрації та методу адаптації коефіцієнта згладжування з використанням МНК

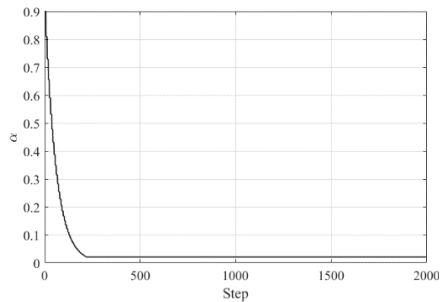


Рис. 6. Адаптація коефіцієнта згладжування з використанням МНК

До недоліків даного методу варто віднести необхідність визначення допустимої похибки на початку роботи алгоритму, що призводить до потреби наявності апріорної інформації, яка б давала загальну інформацію про особливості ТП і про можливу зміну швидкості корисного сигналу. Серед

переваг визначається простота і швидкодія даного алгоритму обробки інформації.

З урахування недоліків, які було виявлено при аналізі попереднього методу адаптації, запропоновано диференційний метод адаптації з використанням двох фільтруючих контурів із різними значеннями коефіцієнтів згладжування α (рис. 7).

Сигнал $x(k)$, спотворений зовнішнім впливом, надходить на вхід системи, а саме двох фільтруючих контурів, що функціонують із різними коефіцієнтами згладжування α . Кожен контур представляє собою комбіноване підключення фільтруючих одиниць за принципом ноніусного нарощування (рис. 1). Вхідний сигнал на даній схемі позначено як $x(k)$, відфільтроване прогнозоване значення – $\hat{x}(k+m)$.

Першим кроком є фільтрація сигналу і отримання прогнозованого згладженого сигналу $\hat{x}(k+m)$ після того, як сигнал надходить на два контури фільтрації MSoDES¹. Для отримання похибки прогнозу необхідно відняти від вхідного сигналу згладжений прогнозований та затриманий на m кроків сигнал. Значення похибок прогнозу $\varepsilon_1(k)$ та $\varepsilon_2(k)$ спотворені шумами і їх порівняння не дасть необхідної інформації про якість прогнозу і згладжування кожним контуром. Для отримання інформації про якість прогнозу необхідно взяти модулі цих похибок і знайти усереднену різницю між $|\varepsilon_1(k)|$ і $|\varepsilon_2(k)|$.

Якщо значення усередненої різниці між $|\varepsilon_1(k)|$ і $|\varepsilon_2(k)|$ від'ємне – то похибка прогнозу першого контуру більша, ніж похибка прогнозу другого, а значить якість фільтрації і прогнозу вища у другого контуру. Визначається масив значень, сума яких дає об'єктивну оцінку про те, який із контурів фільтрації забезпечує кращу якість. Якщо контур фільтрації з більшим значенням коефіцієнта згладжування показує кращий результат, у порівнянні із меншим – то α зростає, і навпаки.

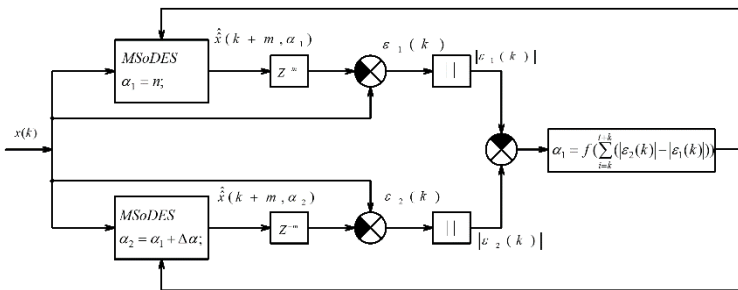


Рис. 7. Алгоритм адаптації коефіцієнта згладжування з використанням двох контурів фільтрації

¹ Modified structure of double exponential smoothing – модель фільтрації та прогнозування, яка передбачає підключення трьох фільтруючих одиниць, кожна із яких функціонує по принципу подвійного експоненціального згладжування методом ноніусного нарощування структури.

Результати адаптації коефіцієнта згладжування при зміні амплітуди шумів наведені на рис. 8 і 9. На початку процесу адаптації значення $\alpha = 0.1$, що призводить до зменшення часу перехідного процесу фільтра, після чого α прямує до значень $0.02 \dots 0.04$. За рахунок того, що у двоконтурному алгоритмі адаптації коефіцієнта згладжування здійснюється зміна α після визначеної кількості кроків, при певному рівні шуму можна спостерігати коливальну зміну коефіцієнта згладжування навколо значення близького до оптимального.

Кожне зменшення α веде до збільшення інерційності системи фільтрації і збільшення втрати корисної інформації у випадку різкої зміни траєкторії сигналу. Збільшення коефіцієнта згладжування навпаки зменшує інерційність і дозволяє швидко пристосуватись до зміни корисної складової, але при цьому зменшується ступінь згладжування, і це може збільшувати втрати корисної інформації за рахунок впливу шумів. Виходячи з вищезазначеного, постійні зміни коефіцієнта згладжування, особливо в системах із великим кроком дискретизації, за наявності недостатнього часу для збору даних, що використовуються для адаптації коефіцієнта згладжування, як наслідок, не точність оцінок похибок прогнозу, можуть призвести до хибного рішення і втрати корисної інформації.

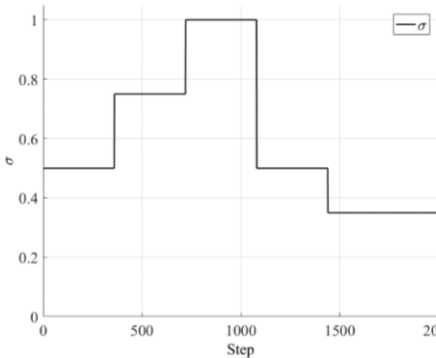


Рис. 8. Зміна рівня шумів

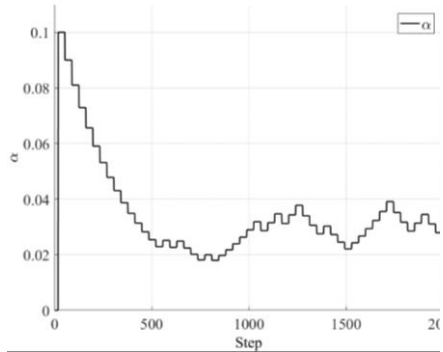


Рис. 9. Адаптація коефіцієнта згладжування з використанням диференційного методу

Для вирішення даної проблеми було створено триконтурну систему адаптації коефіцієнта згладжування (рис. 10). Принцип дії даного алгоритму адаптації схожий із двоконтурним, але має суттєві відмінності у своїй реалізації.

Подібно до двоконтурної системи відбувається знаходження похибок прогнозу кожного з трьох контурів фільтрації, але на відміну від двоконтурного алгоритму адаптації, у даному випадку маємо змогу порівнювати різниці похибок прогнозу трьох контурів. Це дозволяє отримати більше інформації про величину похибок прогнозу контурів, а також про

істинність різниці похибок прогнозу. Результати роботи даного методу за умови нестационарності шумів наведені на рис. 11 та 12.

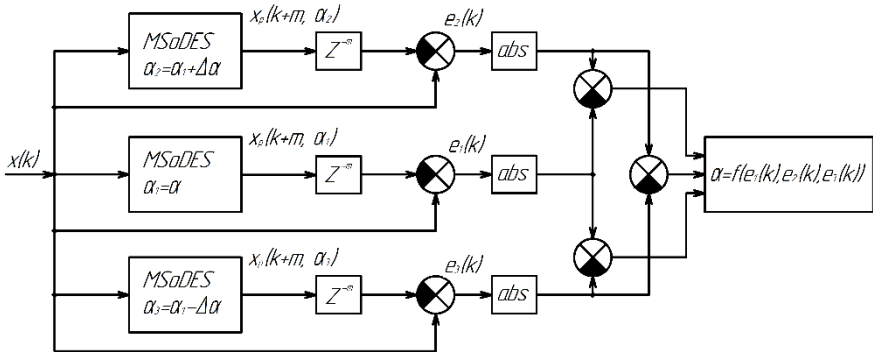


Рис. 10. Алгоритм адаптації коефіцієнта згладжування з використанням трьох контурів фільтрації

У двоконтурній системі один контур працює як основний, а інший – у якості опорного. Із основного контуру постійно знімаються прогнозовані і відфільтровані значення сигналу. Триконтурна модель адаптації представлена у вигляді трьох фільтрів, які працюють паралельно і мають коефіцієнти згладжування: $\alpha_1 = \alpha$, $\alpha_2 = \alpha + \Delta\alpha$, $\alpha_3 = \alpha - \Delta\alpha$, де $\Delta\alpha = 0.1 \alpha$.

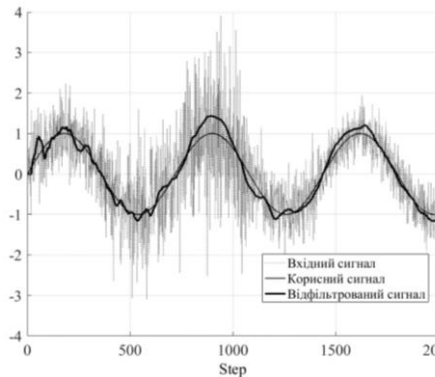


Рис. 11. Процес фільтрації з використанням диференційного триконтурного методу адаптації

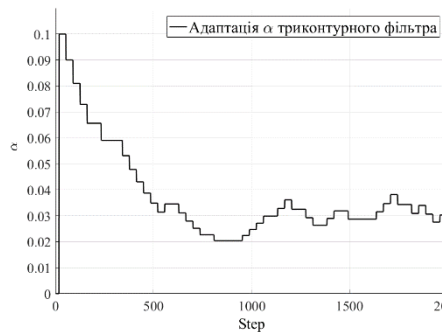


Рис. 12. Адаптація коефіцієнта згладжування диференційного триконтурного методу адаптації

Наступним кроком в адаптації коефіцієнта згладжування є умова, на основі якої здійснюється зміна α . Якщо у двоконтурній системі алгоритм адаптації керується логікою порівняння сум різниць модулів похибок прогнозу поточного періоду оцінювання і попереднього, і, на основі цього, вирішує чи

збільшувати значення α чи зменшувати його, то у даній системі логіка може бути більш ефективною. У пам'яті фільтруючого алгоритму зберігаються значення сумарних значень різниць похибок прогнозу між контурами із α_2 і α_1 , α_2 і α_3 , α_1 і α_3 , де $\alpha_1 = \alpha$, $\alpha_2 = \alpha + \Delta\alpha$, $\alpha_3 = \alpha - \Delta\alpha$ за поточний період оцінювання і за попередній.

Особливість триконтурної моделі адаптації полягає в тому, що під час процесу зміни коефіцієнта згладжування α змінюється у двох контурах із трьох. А контур, що мав найменшу похибку прогнозу, стає так би мовити «центральною» або тим, із якого отримуються вихідні дані, два інші вибудовуються навколо нього і продовжують функціонувати з коефіцієнтами згладжування α_2 і α_3 . При цьому відсутній період часу переналаштування α , що покращує якість прогнозу в умовах нестационарності характеристики «шум-сигнал».

У третьому розділі «Адаптація коефіцієнта згладжування в нестационарних стохастичних системах» проведено детальний аналіз роботи запропонованих у другому розділі моделі фільтрації та методів адаптації коефіцієнту згладжування методом збору статистичних даних, що визначають середньоквадратичні похибки фільтрації та прогнозу залежно від зміни форми сигналу, що відслідковується, та параметрів фільтрації.

Серед тестових сигналів було розглянуто сигнали, які лінійно змінюються в часі, які описуються лінійною, квадратичною та синусоїдальною функціями. Окрім цього проводились дослідження з даними реальних вимірювальних систем, що піддавались високочастотним спотворенням (рис. 13, рис. 14).

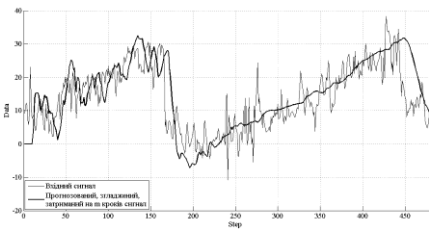


Рис. 13. Фільтрація даних із датчика температури

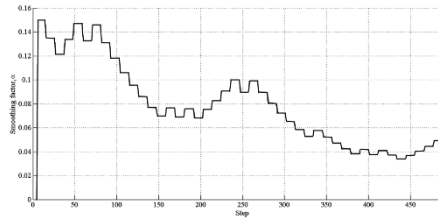


Рис. 14. Адаптація коефіцієнта згладжування

Для статистичного аналізу якості фільтрації і прогнозування значень сигналів методу адаптації, що базується на використанні МНК, було визначено чотири параметри, які відповідно до структури алгоритму адаптації, мають найбільший вплив на якість фільтрації та прогнозування: початкове значення коефіцієнта фільтрації (α_0); кількість кроків, на які здійснюється прогнозування (m); кількість кроків, що використовуються алгоритмом для оцінки якості фільтрації (e_i); допустиме значення похибки (e_{acc}).

Обрано шлях побудови просторових графіків залежностей похибок фільтрації та прогнозу від двох із чотирьох вищезазначених параметрів для

визначення набору параметрів, при яких значення середньоквадратичних похибок фільтрації та прогнозування приймають найменші значення. Отримані характеристики зображено на рис. 15.

На основі проведеного аналізу було визначено основні твердження, що стосуються залежностей якості фільтрації та прогнозу відносно параметрів алгоритму обробки інформації:

- комбінація параметрів початкового значення коефіцієнта фільтрації та кількості кроків, що використовується для оцінювання якості фільтрації, визначає як швидко алгоритм обробки даних адаптується під рівень шумів;

- за відсутності інформації про рівень шумів може використовуватись комбінація значень параметрів α_0 , що відповідає низькій інерційності і невеликому значенню параметру e_t , з урахуванням часу дискретизації вимірів даних;

- ключовим параметром, який визначає якість фільтрації та прогнозування, є допустима похибка, значення якої має бути підібране з урахуванням даних про систему, до якої інтегрується даний алгоритм обробки інформації;

- вибір комбінації параметрів m та e_t визначає якість прогнозування.

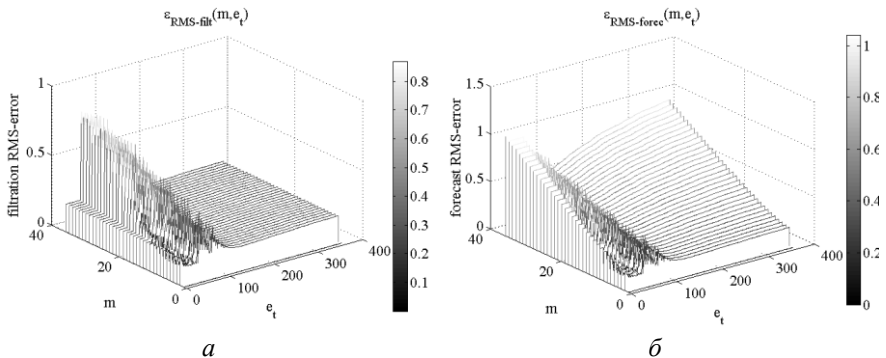


Рис. 15. Графіки залежностей: *a* – похибка фільтрації ($\epsilon_{RMS-filt}$); *б* – похибка прогнозу ($\epsilon_{RMS-forec}$) від параметрів m і e_t

Для дослідження особливостей роботи диференційних методів адаптації було проведено порівняльний аналіз запропонованих методів. Отримані залежності середньоквадратичної похибки прогнозу від параметрів m та e_t (рис. 16).

Розглядаючи роботу дво- і триконтурного фільтра варто відзначити різницю величин похибок фільтрації при відносно невеликих значеннях e_t . Характер залежностей, що зображені на рис. 17, визначається зміною параметра m . Можна зробити висновок, що значення параметру e_t не може бути менше 2, незалежно від того на яку кількість кроків здійснюється прогнозування.

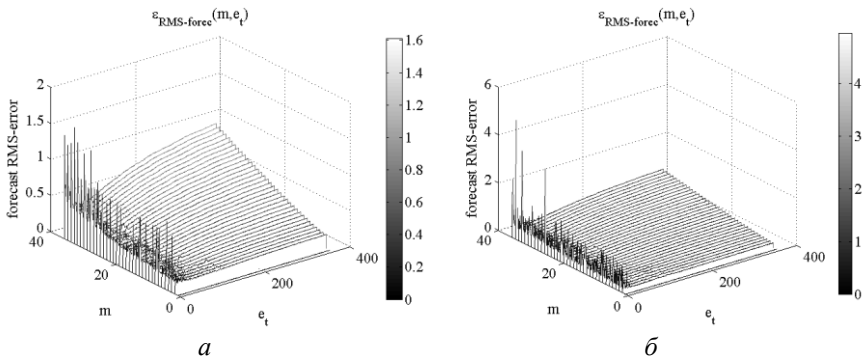


Рис. 16. Графіки залежностей похибок прогнозу ($\varepsilon_{RMS-forec}$) від параметрів m та e_t :
 а – двоконтурного фільтра; б – триконтурного фільтра

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

Триконтурний фільтр потребує значних ресурсів реалізації, зменшуючи похибку фільтрації до 6 %, а похибку прогнозу близько 1 % у порівнянні з двоконтурним. Його використання є ефективним у випадку частій зміни співвідношення «шум-сигнал», оскільки він дає можливість вивести значення відфільтрованого сигналу після перехідного процесу. Тому його застосування потребує подальших досліджень і оптимізації.

Окрім дослідження процесів адаптації запропонованих методів у третьому розділі здійснено порівняльний аналіз адаптивного експоненціального фільтра з існуючими аналогами. Для проведення порівняльного аналізу використовувались поширені сучасні апарати адаптивної фільтрації, що базуються на методі найменших квадратів. Реалізація аналізу проводилась у середовищі Matlab з використанням набору інструментів DSP System Toolbox. Порівняльний аналіз охоплює три модифікації адаптивного МНК фільтра та запропонованого нами адаптивного двоконтурного фільтра-предиктора (табл. 1).

Таблиця 1

Середні значення СКП фільтрації адаптивних МНК фільтрів і двоконтурного адаптивного фільтра-предиктора

Тип фільтра	Адаптивні МНК алгоритми фільтрації			Двоконтурний адаптивний алгоритм фільтрації
	Sign-Data	Sign-Error	Sign-Sign	
ε_{RMS}/N	0,8408	0,6308	0,7654	0,3833

У результаті запропонована двоконтурна адаптивна модель фільтрації дозволяє отримати менші значення похибки фільтрації у порівнянні із Sign-Data модифікацією в середньому у 2.2 рази, Sign-Error модифікацією у 1.6 рази, Sign- Sign модифікацією у 2 рази.

У четвертому розділі «Інтеграція адаптивного алгоритму фільтрації і прогнозування в системи керування об'єктами із запізненням» проведено моделювання інтеграції адаптивного фільтра-предиктора у САК об'єктами із запізненням.

Розглянуто варіант використання комбінованого керування. У цьому випадку до сигналу керування, який формується регулятором на основі розузгодження, додався прогнозований вхідний задаючий вплив. Створена модель комбінованого керування порівнювалась із системою, яка функціонує без адаптивного фільтра-предиктора, та із системою з фільтром, який виконує функцію визначення корисної складової задаючого вхідного спотвореного шумом сигналу. Оцінка похибок системи відбувалась після проходження шуму перехідного процесу налаштування фільтрів. Амплітуда шуму дорівнювала 10 % від амплітудного значення вхідного впливу. Дана модель була створена в середовищі Simulink (рис. 17). Результат моделювання дозволяє зробити висновок про доцільність використання комбінованого керування з використанням адаптивного фільтра-предиктора, що підтверджується зменшенням значення похибки вихідної координати у порівнянні з іншими системами керування приблизно на 45 %.

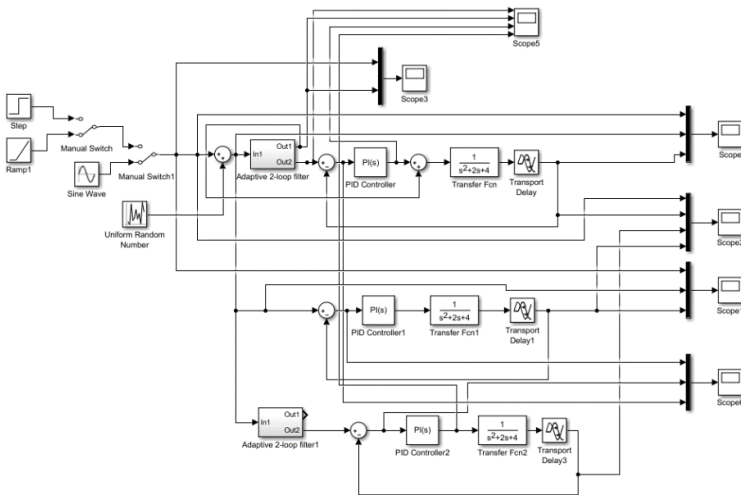


Рис. 17. Модель системи автоматичного керування з комбінованим керуванням, із використанням фільтра та без нього

Розглянуто можливість інтеграції адаптивного фільтра-предиктора у технології виробництва кабелю на надвисокі напруги, у технології виробництва кварцових трубок та в системах детермінації навколишнього середовища промислових роботів. Відносно останнього проведено натурні експерименти (рис. 18), ціль яких – визначити час руху серводвигуна залежно від даних, які надходили з ультразвукового далекоміру (УЗД) із використанням алгоритму фільтрації та без нього.

У ході експериментів модель промислового робота (ПР) керувалась наступною логікою: якщо відстань до перешкоди лежала у визначених межах – рухома ланка ПР здійснювала переміщення. Такий алгоритм моделював роботу ПР по обробці поверхні об'єкта. Експерименти проводились із врахуванням особливостей застосування ПР. Серед них: різні положення УЗД по відношенню до об'єктів навколишнього середовища, шорсткість їхньої поверхні, зміна положень об'єктів у просторі протягом виконання алгоритму промисловим роботом.

У випадку, якщо сервопривод здійснював поворот ланки робота, керуючись сигналами, що надходили від мікроконтролера без використання фільтра, час повороту серводвигуна $t_n=12.62$ с, у випадку використання фільтра $t_n=10.98$ с, з використанням фільтра та алгоритму усунення аномальних даних $t_n=8.56$ с.

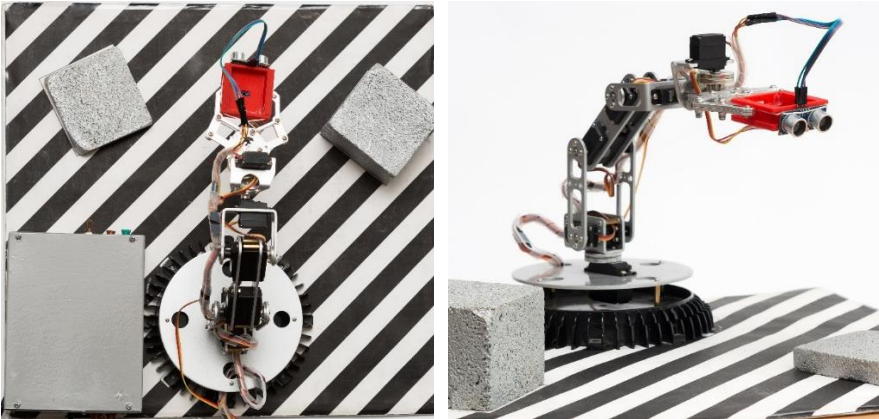


Рис. 18. Загальний вид установки по визначенню відстані ланки промислового робота до об'єктів навколишнього середовища

Проведені експерименти дають змогу зробити висновок, що використання фільтруючого алгоритму обробки інформації покращує результати роботи ПР шляхом уточнення значень сигналів, що визначають детермінацію його ланок у просторі.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення актуальної наукової задачі щодо підвищення якості роботи систем автоматичного керування шляхом інтеграції адаптивного алгоритму фільтрації та прогнозування сигналів, реалізованого у вигляді програмного або апаратного модуля.

Отримані результати дають підстави для формулювання відповідних висновків та рекомендацій, що мають теоретичне й практичне значення:

1. На основі проведеного аналізу проблем та задач автоматизації процесів керування об'єктами із запізненням вказано на недоліки та вимоги до відомих рішень для їхньої практичної реалізації, які полягають у необхідності якісного оцінювання корисного сигналу та його прогнозованих значень за умов відсутності або нестачі апріорної і поточної інформації про систему.

2. На основі проведеного аналізу розроблено структуру алгоритму компенсації похибки слідування експоненціального фільтра Р. Брауна. Дану ноніусну структуру реалізовано в середовищах Matlab і Simulink. Комп'ютерний аналіз отриманої структури підтверджує її суттєві переваги.

3. Розроблено алгоритм адаптації до рівня шумів, який використовує МНК і один контур фільтрації, що забезпечило високу швидкодію під час процесу обробки сигналу в умовах, коли шумова складова вхідного сигналу зростає або залишається незмінною. Адаптивний ноніусний фільтр-предиктор реалізовано в середовищі Matlab.

4. Розроблено алгоритми адаптації до рівня шумів фільтрів, що використовують два і три контури паралельної обробки сигналу з різними параметрами фільтрації; це забезпечило адаптацію параметру фільтрації до зміни амплітуди шумів, а також більш якісне визначення прогнозованих значень сигналів. Дані модифікації адаптивних фільтрів-предикторів реалізовано в середовищі Matlab і середовищі програмування мікроконтролерів Arduino IDE.

5. Проведений комп'ютерний аналіз дозволив визначити залежність якості фільтрації та прогнозу від параметрів фільтрів-предикторів, які використовують МНК-алгоритм адаптації, а також два і три контури фільтрації для оцінювання якості фільтрації та адаптації коефіцієнта згладжування.

6. На основі більше тридцяти тисяч тестів комп'ютерного моделювання визначено масиви оптимальних параметрів фільтрів-предикторів для отримання мінімальних похибок фільтрації та прогнозу для алгоритмів адаптації з використанням МНК, двох і трьох контурів фільтрації.

7. Проведено порівняльний аналіз розроблених фільтрів-предикторів. Визначено, що найбільш якісний результат прогнозування та фільтрації залежно від швидкодії дозволяє отримати двоконтурний адаптивний фільтр-предиктор. Проведено порівняльний аналіз обраного фільтра з існуючими аналогами, за результатами якого середнє для різних умов значення середньоквадратичної похибки фільтрації розробленого фільтра зменшилось від 1.6 до 2.2 разів залежно від модифікації фільтра.

8. У середовищі Simulink проведено моделювання інтеграції адаптивного двоконтурного фільтра-предиктора в САК об'єктом із запізненням, що дозволило позбавитись спотворень керуючого сигналу і зменшити коливання вихідної координати об'єкта із запізненням від 40 % до 70 %, залежно від характеру вхідного керуючого сигналу та рівня шумів.

9. Розглянуто можливість інтеграції фільтра-предиктора в технологію виробництва кварцових трубок та технології виробництва кабелю на надвисокій напрузі для фільтрації даних із датчиків товщини ізоляції та компенсації запізнення, яке виникає за рахунок особливостей розташування вимірювальних пристроїв у даних ТП.

10. Проведено дослідження можливості інтеграції фільтра-предиктора в системах детермінації навколишнього середовища промисловими роботами. За результатами експерименту час перехідного процесу повороту серводвигуна рухомої ланки ПР зменшився на величину від 13 % до 33 %, при цьому похибка відслідковування відстані до поверхні зменшилась на 21 %, що дозволило покращити маневреність ПР.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Boriak B. R. Filtering and forecasting signals algorithm based on exponential brown's filter / B. R. Boriak, A. M. Silvestrov // Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal. – Poltava: PNTU, 2017. – VOL. 4(44). – P. 150–152. (Index Copernicus)

2. 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. – P. 27–32. (Index Copernicus)

3. Боряк Б. Р. Аналіз ефективності застосування адаптивного двоконтурного фільтра-екстраполятора залежно 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. (Index Copernicus)

4. 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. (Index Copernicus)

5. Островерхов М. Я. Компенсація запізнення в контурі керування процесом нанесення ізоляції на струмопровідну жилу кабелю / М. Я. Островерхов, А. М. Сільвестров, Б. Р. Боряк // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія: механіко-технологічні системи та комплекси. – 2017. – №33. – С. 61–67. (General Impact Factor)

6. 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). – P. 27–32. (Index Copernicus)

7. Боряк Б. Р. Порівняльний аналіз якості фільтрації і прогнозування двоконтурного і триконтурного адаптивних експоненціальних фільтрів /

Б. Р. Боряк // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2019. – Т. 1(53). – С. 45–49. (Index Copernicus)

Опубліковані праці апробаційного характеру

8. Сільвестров А. М. Аналіз методу синтезу регулятора для об'єктів із запізнюванням Р. Бесса / А. М. Сільвестров, Б. Р. Боряк, В. В. Луцьо // Матеріали всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» – Полтава, 2015. – С. 62–65.

9. Сільвестров А. М. Згладжування та прогнозування сигналів за допомогою ноніусного включення експоненціальних фільтрів моделі Брауна / А. М. Сільвестров, Б. Р. Боряк, В. В. Луцьо // Матеріали всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» – Полтава, 2015. – С. 65–68.

10. Боряк Б. Р. Метод адаптації ноніусного експоненціального фільтра / Б. Р. Боряк, А. М. Сільвестров, В. В. Луцьо // Тези доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації» – Київ, 2016 р. – С. 54.

11. Боряк Б. Р. Алгоритм знаходження оптимального коефіцієнта згладжування за умови невизначеності корисного сигналу / Б. Р. Боряк, В. В. Луцьо // Тези 68 наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету – Полтава, 2016 р. – Том 1, С. 9–11.

12. Боряк Б. Р. Дослідження алгоритму згладжування і налаштування адаптивного фільтра Брауна при зміні амплітуди шумів / Б. Р. Боряк // Тези 69 наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету – Полтава, 2017 р. – Том 1, С. 4–6.

13. Боряк Б. Р. Аналіз методів знаходження коефіцієнту згладжування експоненціального фільтруючого пристрою / Б. Р. Боряк // Тези доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації» – Київ, 2017 р. – С. 173–174.

14. Боряк Б. Р. Адаптація параметрів фільтрації сигналу, що лінійно змінюється в часі / Б. Р. Боряк, В. В. Луцьо // Тези доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації» – Київ, 2017 р. – С. 179–180.

15. Боряк Б. Р. Prediction of aircraft trajectory under heteroscedastic disturbances / Б. Р. Боряк, А. М. Сільвестров, В. В. Луцьо // Збірник тез доповідей XXIV Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2017» – Київ, 2017 р. – С. 48–49.

16. Боряк Б. Р. Особливості фільтрації та прогнозування сигналів квадратичної форми модифікованим експоненціальним фільтром / Б. Р. Боряк, А. М. Сільвестров // Збірник наукових праць за матеріалами III Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» – Полтава, 2017. – С. 22–24.

17. Боряк Б. Р. Вплив зміни параметрів адаптивного двоконтурного фільтра-екстраполятора на якість фільтрації / Б. Р. Боряк, А. М. Сільвестров // Тези доповідей Х Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації» – Київ, 2018 р. – С. 88–89.

18. Боряк Б. Р. Дослідження впливу зміни параметрів адаптивного фільтра-екстраполятора на якість фільтрації та прогнозування / Б. Р. Боряк, А. М. Сільвестров // Матеріали XXV Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2018» – Львів, 2018 р. – С. 98–99.

19. Боряк Б. Р. Інтеграція адаптивного фільтра-предиктора в системі детермінації навколишнього середовища промислових роботів / Б. Р. Боряк // Збірник наукових праць за матеріалами IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» – Полтава, 2018. – С. 15–17.

АНОТАЦІЯ

Боряк Б. Р. Ноніусний адаптивний фільтр-предиктор – компенсатор запізнення в системах керування технологічними процесами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.03 – «Системи і процеси керування». – Національний авіаційний університет, Київ, 2019.

Дисертація присвячена розробці моделі та методів адаптивної фільтрації та прогнозування змінних стану систем автоматичного керування об'єктами із запізненням в умовах невизначеності та неповноти апріорної інформації про об'єкт, сигнали і шуми.

Розроблено модель фільтрації та прогнозування на основі принципу подвійного експоненціального згладжування Р. Брауна, яка компенсує похибки слідування, властиві інерційним фільтрам.

Розроблено метод адаптації коефіцієнта згладжування фільтра, який використовує метод найменших квадратів. Це дозволило застосувати фільтр-предиктор в умовах нестационарності стохастичних характеристик шумів.

Розроблено диференційний метод адаптації коефіцієнта згладжування з використанням двох та трьох фільтрів, який забезпечує високоефективне оцінювання якості фільтрації і швидке налаштування параметра фільтрації відповідно до зміни стохастичних характеристик шумів та характеру сигналу.

Розроблено практичні рекомендації по налаштуванню та використанню фільтрів у системах керування технологічними процесами.

Практичне значення отриманих результатів полягає в програмній реалізації розроблених моделей фільтрації та прогнозування і методів адаптації коефіцієнта згладжування. Це дало можливість інтегрувати розроблений адаптивний фільтр-предиктор у системи керування технологічними процесами з метою компенсації запізнення і, відповідно, покращення якості їхньої роботи.

Ключові слова: адаптація, експоненціальне згладжування, запізнення, нестационарний шум, прогнозування, фільтрація.

АННОТАЦИЯ

Боряк Б. Р. Нониусный адаптивный фильтр-предиктор – компенсатор запаздывания в системах управления технологическими процессами. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.03 - «Системы и процессы управления». - Национальный авиационный университет, Киев, 2019.

Диссертация посвящена разработке модели и методов адаптивной фильтрации и прогнозирования переменных состояния систем автоматического управления объектами с запаздыванием в условиях неопределенности и неполноты априорной информации об объекте, сигналах и шумах.

Разработана модель фильтрации и прогнозирования на основе принципа двойного экспоненциального сглаживания Р. Брауна, которая компенсирует погрешности следования, присущие инерционным фильтрам.

Разработан метод адаптации коэффициента сглаживания фильтра, который использует метод наименьших квадратов. Это позволило применить фильтр-предиктор в условиях нестационарности стохастических характеристик шумов.

Разработан дифференциальный метод адаптации коэффициента сглаживания с использованием двух и трех фильтров, который обеспечивает высокоэффективное оценивание качества фильтрации и быструю настройку параметра фильтрации по отношению к изменениям стохастических характеристик шумов и сигнала.

Разработаны практические рекомендации по настройке и использованию фильтров в системах управления технологическими процессами.

Практическое значение полученных результатов заключается в программной реализации разработанных моделей фильтрации и прогнозирования и методов адаптации коэффициента сглаживания. Это позволило интегрировать разработанный адаптивный фильтр-предиктор в системы управления технологическими процессами с целью компенсации опоздания и, соответственно, улучшение качества их работы.

Ключевые слова: адаптация, экспоненциальное сглаживание, запаздывание, нестационарный шум, прогнозирование, фильтрация.

ABSTRACT

Boriak B. R. Nonius adaptive filter-predictor – control systems technological process delay compensator. – Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences (Ph.D.) in specialty 05.13.03- «Systems and Control» - National Aviation University, Kyiv, 2019.

The dissertation is aimed at solving the actual scientific and practical problem of increasing the efficiency of automatic control systems (ACS) with time delays which signals are distorted with non-stationary stochastic noises. The solution of this problem was accomplished by developing the filtering and prediction algorithm of ACS with time delays state-space variables and methods of filtering and prediction algorithm adaptation in the conditions of uncertainty and incompleteness of a priori information about the object, signals and noises.

The use of the exponential smoothing method as the basic structure of the filter-predictor in technological process control systems has been scientifically substantiated. A filtering and forecasting model have been developed based on the R. Brown's double exponential smoothing principle. The use of developed model gave an opportunity to compensate delay error for inertial filters.

The method of smoothing factor adaptation that uses the least mean squares method (LMS) was developed for approximation on the interval of filtered signal values evaluation. This method allowed to adapt the smoothing factor in the absence of a priori information about changes in the parameters of the noise and the monitored useful signal. This method provides high performance during implementation and the required quality of filtration in the conditions of noise amplitude growth.

For the first time the smoothing factor differential method adaptation, which involves the use of two or three nonius filters with smoothing factor different values, is developed. This method allowed to evaluate the quality of the filtration without determining the reference signal on the investigated time domain. Adjustment of the smoothing factor is based on the forecast error difference of two and three filtration loops that function with different values of the smoothing factors.

According to the results of the statistical analysis of the relationships between filter parameters and the quality of filtration and forecast, the ranges of parameter values were determined. Setting these ranges of parameters allows to minimize filtering and forecasting errors. Practical recommendations for setting up filters parameters in technological process control systems have been developed.

The possibility of the adaptive filter-predictor integration into the technological processes of applying insulation to the current-carrying conductor of the high-voltage cable and the production of quartz tubes measuring channels to compensate time delays by obtaining predicted values of filtered signals was investigated. According to the results of the simulation, the measurement error of the predicted coordinate decreased from 5–10 % to 2–3 %. The integration of the adaptive filter-predictor into the industrial robot environmental determination system is implemented. According to the results of the experiment, the servomotor turning time was decreased from 13 % to 33 %, while the error of tracking the distance to the surface was decreased by 21 %, which improved the maneuverability of the IR.

Implementation of the developed modifications of the adaptive nonius filter-predictor allows to significantly improve the ACS with time delays working quality in the conditions of a priori uncertainty and the current non-stationarity stochastic characteristics of measuring signals and noise.

Keywords: adaptation, exponential smoothing, delay, unsteady noise, forecast, filtration.

Підп. до друку 30.08.2019. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,4. Обл.-вид. арк. 1,5.
Тираж 100 пр. Замовлення № 127-1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002