

9. Демин, Д. А. Оптимизация режима работы дуговой электропечи при плавке легированного чугуна [Текст] / Д. А. Демин // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2004. – № 6(12). – С. 43–46.
10. Демин, Д. А. Совершенствование процессов управления электроплавкой [Текст] / Д. А. Демин // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – 2010. – № 4. – С. 33–44.
11. Демин, Д. А. Методология формирования функционала для задачи оптимального управления электроплавкой [Текст] / Д. А. Демин // Технологический аудит и резервы производства. – 2011. – Т. 1, № 1 (1). – С. 15–24.
12. Деміна, Е. Б. Выбор оптимальной стратегии технического перевооружения предприятия с металлургическим производством [Текст] / Е. Б. Деміна // Технологический аудит и резервы производства. – 2011. – Т. 2, № 2 (2). – С. 40–52.
13. Дьоміна, О. Б. Використання методів операційного менеджменту в ливарному виробництві [Текст] / О. Б. Дьоміна // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – Т. 2, № 2 (4). – С. 40–52.
14. Демин, Д. А. Применение искусственной ортогонализации в поиске оптимального управления технологическими процессами в условиях неопределенности [Текст] / Д. А. Демин // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – Т. 5, № 9 (65). – С. 45–53.
15. Ишматов, З. Ш. Модернизация систем управления дуговыми сталеплавильными печами и её экономическая эффективность [Электронный ресурс] / З. Ш. Ишматов, Е. Ф. Тетяев, А. И. Грамотеев, А. Г. Петров. – Режим доступа: <http://www.uraltm.ru/UserFiles/File/Furnace.pdf>. – Загл. с экрана.
16. Елизаров, К. А. Сравнительные показатели дуговых сталеплавильных печей постоянного и переменного тока для литейных производств [Электронный ресурс] / К. А. Елизаров, М. М. Крутянский, С. М. Нехамин, А. И. Черняк. – Режим доступа: <http://www.comterm.ru>. – Загл. с экрана.
17. Боранбаев, Б. М. Автоматизированная система управления загрузкой доменной печи АК 'Тулачермет' с использованием роторного распределителя шихты [Электронный ресурс] / Б. М. Боранбаев, Ю. П. Божко, Т. И. Кушнир, В. Ф. Ткаченко, Ю. Г. Ахметшин. – Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/2007/kita/kirichenko/library/b4.html>. – Загл. с экрана.

В статті проводиться аналіз існуючих підходів до вирішення задачі витримування впливів зовнішніх збурень системами автоматичного керування. Метою роботи є систематизація інформації про стан систем автоматичного керування безпілотними літальними апаратами. Розглядаються невирішені проблеми галузі, зокрема, проблема відсутності системи автоматичного керування гарантованої точності за умови невизначених збурень

Ключові слова: системи автоматичного керування, машинне навчання, інтелектуальні системи керування

В статье проводится анализ существующих подходов к решению задачи выдерживания воздействий внешних возмущений системами автоматического управления беспилотными летательными аппаратами. Целью работы является систематизация информации о состоянии систем автоматического управления беспилотных летательных аппаратов. Рассматриваются нерешенные проблемы отрасли, в частности, проблема отсутствия системы автоматического управления гарантированной точности при неопределенных возмущениях

Ключевые слова: системы автоматического управления, машинное обучение, интеллектуальные системы управления

УДК 519.71

ОГЛЯД СУЧАСНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ НА БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТАХ

А. С. Міщук

Аспірант

Кафедра приладів та систем керування літальними апаратами

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

E-mail: anastasiya.mishchuk@gmail.com

1. Вступ

Останні роки значний розвиток отримала мала авіація, зокрема, безпілотні авіаційні комплекси. Вони

широко використовуються для вирішення як військових так і цивільних задач, зокрема, задач екологічного контролю, моніторингу повітряного простору, контролю стану нафтопроводів, газопроводів, отримання даних

про лісові пожежі, тощо. Задачі, які вирішуються безпілотними авіаційними комплексами, вимагають відповідати стандартам якості, зокрема, з гарантованою точністю витримувати впливи невідомих зовнішніх збурень.

Польоти проводяться на висотах до 300 м. При цьому умови польоту характеризуються підвищеною турбулентністю, зумовленою близькістю Землі. Це значно зменшує ефективність системи автоматичного управління через наявність великої кількості випадкових збурень, які зазвичай мають невідомі параметри.

Задача стабілізації БПЛА із витримуванням заданих параметрів в польоті при невизначених зовнішніх збуреннях, таких як пориви і турбулентність, на сьогоднішній день вирішена лише фрагментарно. Існуючі регулятори забезпечують хороші властивості системи у значному діапазоні зміни зовнішніх збурень, проте, можливість гарантованого витримування заданих параметрів досить обмежена, якщо не відсутня за значних змін зовнішніх впливів [1]. Часто регулятори мають високу розмірність, а також бувають значно нелінійними [2].

Синтез системи автоматичного управління гарантованої точності з регуляторами низького порядку не є вирішеною задачею на сьогоднішній день і тому є актуальною задачею.

2. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є систематизація інформації про стан систем автоматичного керування, які використовуються на безпілотних літальних апаратах, зокрема невіршених проблем у даній галузі.

Об'єктом дослідження є автоматична система керування БПЛА при дії зовнішніх випадкових збурень з невідомими статистичними властивостями.

В статті розглядаються існуючі системи керування БПЛА, які найкращим чином можуть бути використані для створення системи гарантованої точності, зокрема розглядаються такі регулятори, як адаптивні [3], оптимальні [4] та робастні [5].

3. Сучасні системи керування безпілотними літальними апаратами

За останні 40 років була розроблена велика кількість нових методів керування [6]: $H-\infty$ контролери, H_2 -контролери, μ - контролери, були створені інтелектуальні методи контролю, адаптивний контроль, робастні ПІД-регулятори. Вирішення задачі гарантованої точності лише фрагментарно представлено у відкритій літературі. Тому далі розглядаються системи, які найкращим чином можуть бути використані для створення системи гарантованої точності. А саме робастні, інтелектуальні та адаптивні системи.

Інтелектуальне керування - методи управління, які використовують різні підходи штучного інтелекту, такі як штучні нейронні мережі, нечітка логіка, машинне навчання, еволюційні обчислення і генетичні алгоритми.

Розрізняють такі рівні інтелектуального управління [7]:

Рівень 0 : Робастне керування зі зворотним зв'язком

Рівень 1. Адаптивне управління – рівень 0 + адаптивні керуючі параметри

Рівень 2. Оптимальне управління - рівень 1 + мінімізація або максимізація функції якості

Рівень 3. Планове управління - рівень 2 + здатність планувати заздалегідь не певні ситуації, імітувати і моделювати невизначеності

3. 1. Адаптивне керування

На сьогодні активно розвивається теорія адаптивного управління польотом, яке поєднує як оцінювання характеристик збурень, так і використання прогностичних моделей. Адаптивне управління польотом забезпечує витримування стабільності характеристик повітряних суден засобами системи управління при виникаючих невизначеностях.

За останні кілька років необхідно відзначити ряд робіт, які зробили внесок у розвиток теорії адаптивних систем управління [8 – 11].

Багато робіт присвячені інтелектуальному керуванню, зокрема, використання машинного навчання широко розглянуто в працях Chowdhary G., Lazar M., Lewis. F. L., Nguyen Nhan T.

Так, в роботі Chowdhary G. [12] розглянуто використання адаптивної нейронної мережі для управління польотами із використанням поточних даних та бази знань. Зокрема, приведені результати моделювання поведінки системи, які показують, що запропонований метод довгострокового навчання і швидка адаптація призводять до більш високої продуктивності контролера польоту БПЛА. Недоліком такої системи є необхідність значних витрат на попереднє навчання нейронної мережі, відбір даних для навчання, наявність модуля збереження даних, який не може бути реалізований в мало бюджетній системі. Система демонструє гарні результати у випадку, коли попередньо були підібрані дані для навчання мережі, проте в умовах значної невизначеності система не гарантує витримування параметрів системи із заданою точністю.

Lewis F. L. [13] представляє різні типи систем автоматичного керування із використанням нейронних мереж як адаптивного модуля системи. Розглянуті проблеми, які виникають із використанням нейронних регуляторів, зокрема, проблема ініціалізації вагових коефіцієнтів мережі. Також окреслені проблеми, які виникають при навчанні нейронних мереж. Особливістю приведених систем є їх робастність, проте, жодна з наведених систем автоматичного управління не здатна із заданою точністю витримувати обрані значення параметрів за умов невідомих збурень.

В статті Nguyen Nhan T. [14] досліджуються стабільність і збіжність нейронної мережі відповідно до типу навчання мережі в системі автоматичного керування. Інтелектуальна система управління польотом використовує прямий адаптивний та динамічний інверсійний підхід управління. Результати льотних випробувань відзначають потреби в подальших дослідженнях з метою поглиблення розуміння ефективності та обмежень прямого адаптивного управління польотом. Також запропонована гібридна адаптивна архітектура управління. Гібридне адаптивне управління поєднує як прямі, так і непрямі методи адаптивного управління для забезпечення більш ефективної стратегії управління. Непряме адаптивне управління відповідає за оновлення динамічного контролера інверсії з більш точної моделі, який оцінюється за методом найменших квадратів. Будь-які залишкові помилки потім будуть оброблені нейронною

мережею прямого адаптивного управління. Перевагою гібридного методу адаптивного управління є можливість оцінити параметри моделі в режимі “он-лайн” та найкращим чином адаптувати нові параметри системи до зовнішніх збурень. В той же час, задача гарантованого витримування заданих параметрів системи при невідомих збуреннях не розглянута.

В роботі [15] розглядається створення САУ з використанням методики LSDP (loop-shaping design procedure): така система має дві ступені свободи, що додало можливість вказати динамічну еталонну модель для формування тимчасового відгуку регульованих виходів. В системі є два контури, які мають наступну структуру: зовнішній контур K_2 , призначений для контролю стабільності, та внутрішній K_1 , призначений для відстеження продуктивності. Продуктивність визначається формуванням спеціальних сингулярних чисел моделі системи G з вагами W_1 і W_2 (рис. 1). Доведено, що не існує лівої частини площини усунення нульових значень сигналу між контролером K і моделлю G .

Це відбувається через те, що K можна записати у вигляді точного спостерігача із зворотнім зв'язком за станом. Мінімізація цільової функції забезпечує надійну стійкість, крім того таке рішення не вимагає ітерацій [15].

Цей контролер є робастним, проте не виконується задача гарантованого витримування заданих параметрів системи при невідомих збуреннях.

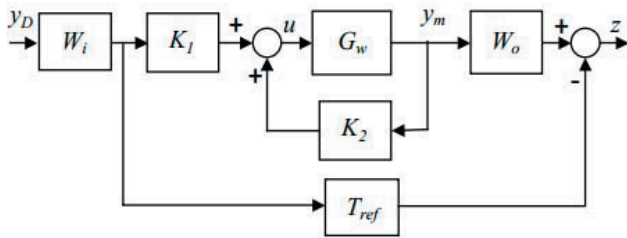


Рис. 1. Структурна схема САУ LSDP

Незважаючи на значний прогрес, досягнутий в системах адаптивного управління, існуюча технологія управління польотом не є адекватною для роботи із значними невизначеностями і невідомими відмовами компонентів і аномаліями.

Адаптивні системи автоматичного керування, які могли би витримати параметри системи із гарантованою точністю при дії невідомих збурень, не представлені у відкритій літературі.

3. 2. Оптимальне керування

Вирішення задачі оптимального керування в системах адаптивного керування описано в працях Букова В. Н., Зайцева Г. Ф., Кіма Д. П.

Зокрема, Буковим В. Н. [16] використовується ідея поєднання оптимального та адаптивного керування, так, наприклад, розглядається алгоритмічне забезпечення оптимізації керування шляхом використання прогностичної моделі. Використання прогностичної моделі є одним із варіантів вирішення задачі оптимізації керування. Також розглядається варіант витримування заданих границь обмежень системи, що може бути використано в подальшому при створенні системи гарантованої точності при невизначених збуреннях. Перевагою цього методу є керування неліній-

ними процесами, коли для формування керування не вимагаються значні спрощення чи апроксимації.

Недоліком є прогнозування динаміки системи без належної оцінки діючих збурень.

В роботі Зайцева Г. Ф. [17] описується синтез оптимальної системи управління на основі критерію мінімуму середньоквадратичної похибки та синтез оптимальних параметрів системи, які мінімізують середньоквадратичну похибку. Такий підхід дозволяє ефективно обрати параметри системи із урахуванням її швидкодії та похибки на управління. Недоліком є слабо затухаючий перехідний процес системи, тому раціональне рішення знаходиться компромісом швидкодії та похибки керування.

Кімом Д. П. [18, 19] проаналізовано задачі синтезу оптимальної системи керування літальним апаратом за умови випадкових зовнішніх збурень. Автором приведено використання методів динамічного програмування для вирішення задачі оптимального керування, розглянуті методи фільтрації, зокрема, фільтри Калмана-Бьюсі, Віннера, приведено приклад стохастичної оптимальної системи. Фільтр Віннера має обмеження на спостереження, оскільки спостереження мають відбуватися на безкінечному відрізку часу. Недоліком стохастичної оптимальної системи є необхідність апріорної інформації щодо типу збурень, так, для гарантування синтезу оптимальної стохастичної системи, шум має підпорядковуватись нормальному розподілу. Задача витримки заданих параметрів системою не розглядається.

Так, в роботі Александрова А. А. [20] розроблені алгоритми оптимального управління ЛА. Вирішується завдання мінімізації витрат на управління і максимальної швидкодії для моделі ЛА як твердого тіла, яке описується рівняннями високого порядку (Ейлера і Пуассона). В роботі враховується обмеження на вектор управління, які існують в реальних БПЛА.

Перевагою даного підходу є формування управління при різних значеннях початкового і кінцевого векторів стану без зміни структури алгоритму управління, скорочений обсяг обчислювальних витрат до 20 разів при формуванні траєкторії в реальному часі.

Суттєвим недоліком цієї роботи є відсутність даних про реакцію системи на вплив шумів і зовнішніх сил. Задача витримки параметрів системи із гарантованою точністю при дії невідомих збурень не була розглянута.

Оптимальне керування на основі моделі інтелектуального управління включає в себе он-лайн розрахунки оптимізації. Для здійснення задачі оптимізації модель враховує динаміку системи, обмеження і цілі контролю. Такий підхід може бути використаний при створенні системи автоматичного керування гарантованої точності.

4. Робастне та адаптивне керування з використанням інтелектуальних систем

Важливою особливістю системи керування БПЛА є відсутність достовірної апріорної інформації про ймовірнісні характеристики зовнішніх збурень, саме тому система гарантованої точності в певних заданих межах має вміння реагувати на найгірші випадки збурень.

Для розв'язання таких задач, коли існує необхідність прогнозування із значною невизначеністю, для вирішення цієї задачі широко використовуються методи машинного навчання.

Перші роботи з машинного навчання датуються 1959 роком. Значний вклад в розвиток машинного навчання внесли Rosenblatt F., Samuel A., Weizenbaum J., Simon H. A., Cooper G. F.

Комашинським В. І. [21] наведено основні характеристики методів керування із використанням нейрорегуляторів, приведені результати моделювання. Зроблено висновок, що поєднання традиційних методів керування із використанням нейрорегуляторів дає кращі результати керування у порівнянні з традиційними методами.

Оскільки реальні системи зазвичай є суттєво нелінійними, основним недоліком є припущення про точно відому динамічну модель системи. Abdessemed F. [22] запропонував використовувати метод машинного навчання, а саме метод опорних векторів для вирішення задачі оцінки динаміки нелінійної моделі у поєднанні з PD контролером. Недоліком методу є невизначеність параметрів при дії невідомих збурень при виході за відомий дозволений діапазон.

Нікіфоровим В. О. [23] було розглянуто метод синтезу робастних та адаптивних алгоритмів керування невизначеними об'єктами, вразливими до зовнішніх детермінованих збурень, крім того були розроблені робастні алгоритми адаптації високих порядків та створено ітеративні процедури синтезу адаптивних і робастних алгоритмів керування лінійними параметрично невизначеними об'єктами, схильними до зовнішніх збурень.

Підхід, приведений в роботі [23] не є оптимальним, оскільки системи можуть мати високі порядки.

Сізовою А. О. [24] запропоновано використовувати методи теорії ігор для синтезу керування БПЛА при дії невідомих зовнішніх збурень. Було розроблено алгоритм формування керуючого сигналу для систем стабілізації перевантаження БПЛА, що враховують дію зовнішніх випадкових збурень з невідомими статистичними властивостями. Цей метод зарекомендував себе за умов невизначених збурень, проте задача гарантованої точності параметрів системи не була розглянута.

Міхайліним Д. А. [25] був розроблений підхід до автоматичного керування посадкою БПЛА із застосуванням двох регуляторів: лінійного та нелінійного, який реалізується за допомогою швидкодіючої і стійкої нейронної мережі.

Тобто, використовується інтелектуальне керування, проте відсутня можливість забезпечення гарантованої точності, а також математичні обчислення для таких типів регуляторів можуть бути досить значними. Немає відомостей про поведінку системи в умовах невизначених збурень.

В роботі [26] автор показала, що при синтезі системи керування в умовах відомих збурень із різними статистичними характеристиками, на базі багаторівневих критеріїв оптимальності, введення компенсаційних виконавчих механізмів і корекції кута тангажу по похідній є доцільним і забезпечує отримання необхідних частотних властивостей ЛА по тангажу. Недоліком системи є необхідність отримання апріорної інформації про АЧХ БПЛА за умов впливу турбулентної атмосфери, таким чином система може не гарантує витримування заданих параметрів за умов невизначених збурень.

В усіх описаних випадках висувалися вимоги у вигляді традиційному підходу, а саме забезпечення заданої якості перехідного процесу САК.

В роботі [27] Ferrari S. та Jensenius M. запропонували новий підхід до конструкції нейронної мережі, а саме контролер, який використовує як "навчальні" дані так і нові дані в режимі он-лайн. Перевага цього методу у довгостроковому навчанні, причому поєднання відомих даних та нових дозволяє адаптивному закону працювати краще тоді, коли він стикається з завданням, яке він вже вирішував.

Подібний підхід розглядається і в розробці NASA, яка функціонує на базі роботи [28]. Інтелектуальна система управління польотом використовує наступні підходи: модель-посилання, пряму адаптацію та динамічну інверсію. Така архітектура використовує як "базу знань", так і он-лайн навчання нейронних мереж і еталонну модель бажаної якості параметрів.

Результати льотних випробувань продемонструвати потенційні переваги адаптивної технології управління в поліпшенні системи управління польотом літака в присутності несприятливих умов польоту через збої систем.

Прач А. [29] приведено адаптивну систему керування гарантованої точності (рис. 2). Система керування синтезована за методом керування по входу і одному з критеріїв оптимальності: максимумом швидкодії і мінімумом похибки керування із забезпеченням астатизму першого порядку по збуренню. Був розроблений закон формування адаптивного коефіцієнта K зворотного зв'язку одного з класів систем керування що забезпечило систему можливістю витримування гарантованої точності в умовах довільних збурень. Така система стабільна, оскільки зміна коефіцієнта K практично не змінює структуру синтезованого оптимального закону керування.

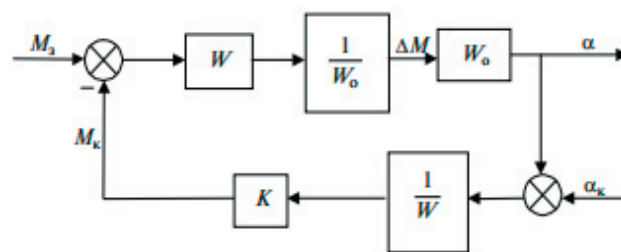


Рис. 2. Структурна схема адаптивної системи керування

Ця система є прикладом системи автоматичного керування гарантованої точності з регулятором низького порядку і може бути використана в подальшій роботі, однак потребує суттєвого доопрацювання. Приведений закон формування адаптивного коефіцієнта K не є задовільним, оскільки зміна чисельного порядку регулятора практично неможлива для реалізації.

Зважаючи на те, що існуючі системи не є достатньо ефективними для вирішення задачі витримування параметрів системи із гарантованою точністю при невідомих збуреннях, ми дійшли висновку, що необхідно використовувати комбінований підхід до створення системи гарантованої точності та почали використовувати суміщення методів адаптивного, робастного та інтелектуального керування.

5. Висновки

Існуючі системи показують гарні результати в певному діапазоні зміни збурень та властивостей систем проте лишається цілий ряд невирішених проблем, серед яких той факт, що дані системи не гарантують задану точність в умовах значних збурень із невідомими параметрами. Саме тому існує необхідність комбінованого використання методів адаптивного, робастного

та інтелектуального керування. В подальшому ми використовуємо структуру системи керування, яка була наведена в роботі Прач А. [29] із зміною методу формування адаптивного коефіцієнта K та метод інтелектуального керування, а саме нейронні мережі із он-лайн навчанням для прогнозування стану системи та вирішення задачі витримки системою заданих параметрів із гарантованою точністю за умов невизначених зовнішніх збурень.

Література

1. Небылов, А. В. Гарантирование точности управления [Текст] / А. В. Небылов – М.: Наука, 1998. – 304 с.
2. Поляк, Б. Т. Робастная устойчивость и управляемость [Текст] / Б. Т. Поляк, П. С. Щербаков. – М.: "Наука", 2002. – 303 с. 3. Фомин, В. Н. Адаптивное управление динамическими объектами [Текст] / А. Л. Фрадков, В. А. Якубович. – М.: "Наука", 1981. - 558 с.
4. Душин, С. Е. Теория автоматического управления [Текст] / С. Е. Душин, Н. С. Зотов, Д. Х. Имаев, Н. Н. Кузьмин, В. Б. Яковлев.- М.: "Высшая школа", 2005. – 567 с.
5. Tsui, C. Robust Control System Design: Advanced State Space Techniques[Text] / C. Tsui // Automation and Control Engineering.– CRC Press, 2003. – 500 p.
6. Егупов, Н. Д. Методы классической и современной теории автоматического управления [Текст] / Н. Д. Егупов, К. А. Пупков // Синтез регуляторов систем автоматического управления. В 5 тт. – МГТУ им. Баумана, 2004.
7. Андриевский, Б. Р. Избранные главы теории автоматического управления [Текст] / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. – С-Пб.: "Наука", 2000. -475 с.
8. Shin Yung, C. Intelligent Systems: Modeling, Optimization, and Control (Automation and Control Engineering) [Text] / C. Yung, Shin, Chengying Xu. // Automation and Control Engineering. 30. – CRC Press, 2008. – 456 p.
9. Hannu, T. A neural network model predictive controller [Electronic resource]/ T. Hannu // Available at: <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/npc07/ABO/abo06.pdf>. - Last access: 01.06.2013. – Title from the screen.
10. Lazar, M. A Neural Predictive Controller For Non-linear Systems controller [Electronic resource] / M. Lazar // Available at: <http://www.cs.ele.tue.nl/MLazar/MATCOMpaper.pdf>. - Last access: 01.06.2013. – Title from the screen.
11. Raemaekers, A. J. Design of a model predictive controller to control UAVs [Electronic resource]/ A. J. Raemaekers // Available at: <http://alexandria.tue.nl/repository/books/657983.pdf>. - Last access: 01.06.2013. – Title from the screen.
12. Girish, C. Adaptive Neural Network Flight Control Using both Current and Recorded Data [Electronic resource]/ C. Girish // Available at: https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/35867/chowdhary_gnc_2007_51.pdf?sequence=1. - Last access: 01.06.2013. – Title from the screen.
13. Lewis, F. L. Neural Networks in Feedback Control Systems [Electronic resource]/ F. L. Lewis // Available at: http://www.pdx.edu/sites/www.pdx.edu.sysc/files/SySc576_FrankLewisNNsControl.pdf. - Last access: 01.06.2013.
14. Nguyen, Nhan T. Neural Net Adaptive Flight Control Stability, Verification and Validation Challenges, and Future Research [Electronic resource]/ Nhan T. Nguyen // Available at: [http://ti.arc.nasa.gov/m/pub-archive/1370h/1370%20\(Nguyen\).pdf](http://ti.arc.nasa.gov/m/pub-archive/1370h/1370%20(Nguyen).pdf). - Last access: 01.06.2013.
15. Salah, I. ALSwailem. Application of Robust Control in Unmanned Vehicle Flight Control System Design [Electronic resource]/ I. ALSwailem Salah // Available at: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/136/2/ThesisMasterV2.pdf>. - Last access: 01.06.2013.
16. Буков, В. Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом [Текст] / В. Н. Буков. – М.: "Наука", 1987. -232 с.
17. Зайцев, Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования [Текст] / Г. Ф. Зайцев. -К.: "Вища Школа", 1988. -431 с.
18. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Т.1 Линейные системы [Текст] / Д. П. Ким. - М.: "ФИЗМАТЛИТ", 2003. - 287 с.
19. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Т.2 Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы [Текст] / Д. П. Ким. - М.: "ФИЗМАТЛИТ", 2004. - 464 с.
20. Александров, А. А. Оптимальное управление летательным аппаратом с учетом ограничений на управление [Текст]: диссертация на соискание научной степени канд. тех. наук: 05.13.01 " Системный анализ, управление и обработка информации " / А. А. Александров. - С-Пб., 2009. - 134 с.
21. Комашинский, В. И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи [Текст] / В. И. Комашинский, Д. А. Смирнов. М.: "Горячая линия - Телеком", 2003. -94с. ISBN 5-93517-094-9.
22. Abdessemed, F. SVM-Based Control System for a Robot Manipulator. [Electronic resource] / F. Abdessemed // Available at: http://cdn.intechopen.com/pdfs/41444/InTech-Svm_based_control_system_for_a_robot_manipulator.pdf.- Last access: 01.06.2013.

23. Никифоров, В. О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений [Текст]: диссертация на соискание научной степени канд. тех. наук: спец.: 05.13.01 " Системный анализ, управление и обработка информации " / В. О. Никифоров. - С.-Пб., 2001. - 259 с.
24. Сизова, А. А. Синтез управления беспилотного летального аппарата при наличии возмущений на основе методов теории дифференциальных игр [Текст]: диссертация на соискание научной степени канд. тех. наук: спец. 05.13.01 " Системный анализ, управление и обработка информации " / А. А. Сизова. - С-Пб., 2010. - 177 с.
25. Михайлин, Д. А. Нейросетевая система управления посадкой самолетного типа для беспилотного летательного аппарата [Текст]: диссертация на соискание научной степени канд. тех. наук: спец.: 05.13.01 " Системный анализ, управление и обработка информации " / Д. А. Михайлин. - М. 2009. - 99 с.
26. Фролова, Л. Е. Синтез автопилота беспилотного летательного аппарата заданного класса на основе многоуровневой системы критериев оптимальности [Текст]: диссертация на соискание научной степени канд. тех. наук: спец.: 05.13.05 "Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления" / Л. Е. Фролова - Р., 2008. - 160 с.
27. Ferrari, S. Robust and Reconfigurable Flight Control by Neural Networks [Electronic resource] / S. Ferrari, M. Jensenius // Mode of access: http://fred.mems.duke.edu/LISCpapers/AIAA-38208-826_AerospaceAtInfotech.pdf.- Last access: 01.06.2013.
28. Calise, Anthony J., Adaptive Flight Control using Neural Networks [Electronic resource] / Anthony J. Calise, Rolf T. Rysdyk // Mode of access: <http://www.aa.washington.edu/research/afsl/publications/rysdyk1998adaptiveNN.pdf>.- Last access: 01.06.2013.
29. Збруцький, О. В. Адаптивний алгоритм одного класу систем керування гарантованої точності при довірливих збуреннях [Текст] / О. В. Збруцький, А. П. Прач // Наукові вісті НТУУ «КПІ» №2, 2008.. -с. 26-30.

Проаналізовано варіанти побудови вимірювальних перетворювачів «імпеданс-напруга» на основі пасивних та активних перетворювачів з контактними чотириелектродними сенсорами, які забезпечують режим заданого струму або режим заданої напруги. Наведено електричну схему заміщення чотириелектродного первинного перетворювача, яка враховує приелектродний імпеданс та імпеданс контрольованого об'єкта між всіма електродами, а також відповідна математична модель

Ключові слова: ємнісний сенсор, перетворювач, електрична модель, ємність подвійного шару, неінформативний імпеданс

Проанализированы варианты построения измерительных преобразователей «импеданс - напряжение» на основе пассивных и активных преобразователей с контактными четырехэлектродной сенсорами, которые обеспечивают режим заданного тока или режим заданного напряжения. Приведена электрическая схема замещения четырехэлектродного первичного преобразователя, которая учитывает приэлектродном импеданс и импеданс контролируемого объекта между всеми электродами, а также соответствующая математическая модель

Ключевые слова: емкостной сенсор, преобразователь, электрическая модель, емкость двойного слоя, неинформативен импеданс

УДК 658.62:658.562

INVARIANT TRANSDUCERS OF CAPACITIVE SENSOR PARAMETERS INTO VOLTAGE

M. R. Herasym

Postgraduate*

E-mail: marta88leskiv@gmail.com

Y. V. Pokhodylo

Doctor of engineering, Professor*

E-mail: evgenp@meta.ua

*Department of Metrology,
Standardization and Certification
National University "Lviv Polytechnic"
Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013

1. Introduction

Electrophysical parameters monitoring of nonelectric products (granular materials, liquids) by means of primary capacitive transducers is much extended today. The reason is realization measuring procedure efficiency, simplicity and providing of high metrological specification. Nowadays, there are many various conductometric cells based on capacitive sensors of different engineering design for monitoring the

parameters regarding electric conductivity [1]. There are mainly two-electrode and four-electrode capacitive sensors with the fixed constant of cell. They are used with appropriate measuring devices (conductometers) as well as with traditional meters of impedance and admittance parameters [2]. As an informative parameter of these sensors is the impedance of a cell with the monitored object, there is a problem of near-electrode effects. The measured parameters that specify electroconductivity of these sensors with the monit-