

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
„ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Книш Валентин Олександрович

УДК 629.735.054.03:681.121

ІНВАРІАНТНІ ЧАСТОТНІ ЄМНІСНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ  
РІВНЯ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ  
ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Спеціальність 05.13.05 - елементи та пристрої обчислювальної техніки  
та систем керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному аерокосмічному університеті імені М.Є. Жуковського “ХАІ” Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки  
**Кошовий Микола Дмитрович**,  
Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського “ХАІ”,  
завідувач кафедри авіаційних приладів та вимірювань.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Овчаренко Олександр Іванович**,  
Національний технічний університет “ХПІ”,  
професор кафедри вимірювально-інформаційної техніки;

кандидат технічних наук, доцент  
**Кадацька Ольга Йосипівна**,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
доцент кафедри автоматизації проектування  
обчислювальної техніки.

Провідна установа: Вінницький національний технічний університет,  
Міністерство освіти і науки України, м. Вінниця.

Захист відбудеться “ 22 ” лютого 2007 р. о 14.00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.14 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий “ 15 ” січня 2007 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 64.050.14

Ліберг І.Г.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА

**Актуальність теми.** За статистикою в багатьох випадках аварії літальних апаратів (ЛА) в транспортній авіації виникають внаслідок ускладнення або втрати керованості. Аналізуючи факти аварій, слід відзначити дисбаланс маси палива, який викликає погіршення стійкості та керованості ЛА. Відомо, що до 70 % маси ЛА складає паливо. Специфіка транспортних ЛА змушує розташовувати паливні баки в крилах, щоб раціонально використовувати корисний об'єм фюзеляжу. Таким чином, розташування великої маси палива на великій відстані від розмаху крил і наявності дисбалансу може викликати обертальний момент, який погіршує стійкість ЛА. Для компенсації цього моменту льотчик або автопілот змушений вводити поправку. Але в одному випадку момент дисбалансу викликатиме збільшення заданого кута тангажа або крену, а в іншому - зменшення. Внаслідок дисбалансу керування ЛА може також ускладнюватись тому, що органи керування можуть опинитися в насиченні і потрібного керуючого моменту не вистачить для виконання маневру. Крім того, відхилення закрилків викликають додаткову силу тертя, що збільшує витрату палива. За процес керування перекачкою і рівномірністю розподілу маси палива в крилах ЛА відповідає паливна система. Після аналізу принципу роботи цієї системи виявлено, що дисбаланс виникає внаслідок похибок первинних перетворювачів рівня палива. Як перетворювачі на ЛА використовуються ємнісні давачі рівня палива. Фізичною особливістю ємнісних давачів є вимірювання рівня палива через визначення межі розподілу двох середовищ із різною діелектричною проникністю. Похибки вимірювання рівня палива можуть виникати внаслідок таких факторів: зміни діелектричної проникності палива, різних видів палива, градієнта розподілу діелектричної проникності уздовж рівня палива, накопичування осадків на дні бака з іншою діелектричною проникністю, забруднення давачів. Методи, які використовують для компенсації зміни діелектричної проникності палива, працюють тільки в межах рівня, де розташований компенсаційний давач. Інші значення рівня матимуть похибку, яка залежить від зазначених факторів.

Вивчаючи методи і способи вимірювання рівня палива, які не мають цього недоліку, слід відзначити перетворювачі рівня діелектричних рідин, що синтезовані на принципі інваріантності Петрова, і давачі у вигляді довгих ліній, розроблених такими вченими, як Б.М. Петров, В.А. Вікторов, Б.В. Лункін, О.С. Совлуков.

Тому розробка нових методів і пристроїв вимірювального перетворення рівня палива паливної системи контролю та керування балансуванням ЛА спрямована на покращення стійкості та керованості ЛА за рахунок підвищення точності первинних перетворювачів рівня палива, є актуальним завданням, вирішенню якого присвячена дисертаційна робота.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі авіаційних приладів та вимірювань Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського “ХАІ”, відповідно до держбюджетних науково-дослідних робіт: “Розробка математичних моделей і методів оптимізації систем контролю палива аерокосмічних об'єктів у нестационарних умовах” (№ ДР 0103U004092), “Моделювання й розробка систем контролю палива аерокосмічних об'єктів при наявності збурювань” (№ ДР 0100U003430), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є створення первинних перетворювачів рівня палива, які використовуються в паливній системі контролю та керування балансуванням ЛА, на основі радіохвильового методу вимірювання рівня рідини і принципу інваріантності Б.М. Петрова, спрямованих на підвищення стійкості та керованості ЛА.

*Завдання дослідження:*

- провести аналіз впливу похибки первинних перетворювачів рівня палива на стійкість і керованість ЛА і вибрати методи і пристрої вимірювального перетворення рівня палива для її усунення;
- визначити основні переваги і недоліки відомих методів і синтезувати удосконалений метод перетворення рівня палива для ЛА;
- провести аналіз похибок розробленого методу й запропонувати способи їх компенсації;
- розробити вимірювально-обчислювальну систему рівня палива для ЛА, що використовує розроблені первинні перетворювачі.

*Об'єкт дослідження* - процес вимірювального перетворення рівня палива ЛА з урахуванням дії зовнішніх впливів, що знижують точність первинних перетворювачів.

*Предмет дослідження* – методи, моделі і технічні засоби, призначені для поліпшення технічних характеристик паливної системи контролю та керування балансуванням ЛА.

*Методи дослідження* основані на: радіохвильових та ємнісних методах вимірювання рівня діелектричних рідин, об'єднання яких дозволило розробити перспективний метод вимірювального перетворення рівня палива; теорії електромагнітних систем з розподіленими й зосередженими параметрами, що дозволила розробити математичні моделі і відтворити реальні процеси первинних перетворювачів; теорія інваріантності Петрова і теорія електромагнітного поля дозволили синтезувати первинні перетворювачі рівня палива, що інваріантні до зміни його діелектричної проникності.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

*вперше розроблено частотний ємнісний метод (ЧЄМ) перетворення рівня палива*, заснований на довгих лініях з ємнісним навантаженням, який відрізня-

ється наявністю первинного перетворювача у вигляді ємнісного давача, що дозволяє підвищити точність перетворення за рахунок зменшення нелінійності розподілу електричного поля;

*удосконалено:*

- *модель еквівалентного розподілу ємності уздовж довгої лінії*, яка утворює систему „кабель - давач” і відрізняється використанням ємнісного закону розподілу та дозволяє оцінювати точність ЧЄМ перетворення рівня палива;

- *закони перетворення ємнісних первинних перетворювачів рівня палива*, що інваріантні до зміни виду палива і основані на використанні ємнісних давачів із різними законами перетворення, які дозволили підвищити точність перетворення у всьому діапазоні рівня палива;

*одержали подальший розвиток:*

- теорія компенсації зовнішніх впливів, основана на застосуванні гармонік і режимів роботи довгої лінії, яка дозволяє підвищити точність перетворення рівня палива;

- моделі первинних перетворювачів рівня діелектричних рідин, основаних на системах з розподіленими та зосередженими параметрами, які відрізняються структурними схемами і передатними функціями та дозволяють одержати частотні характеристики, закони розподілу електромагнітного поля, досліджувати процес вимірювального перетворення рівня різних діелектричних рідин.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що розроблені на базі запропонованих методів пристрої перетворення рівня палива, у порівнянні з аналогами, мають вищу точність і надійність. На основі проведених досліджень було розроблено: інваріантні ємнісні первинні перетворювачі рівня палива, призначені для експлуатації в жорстких умовах навколишнього середовища; вимірювально-обчислювальна система (ВОС) рівня палива для елементів та пристроїв систем керування авіаційної техніки.

Розроблені методи, схемні й конструктивні рішення впроваджені у практику таких промислових підприємств: Харківське державне авіаційне виробниче підприємство (ХДАВП), навчальний процес кафедри авіаційних приладів та вимірювань Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського ”ХАІ” і в ТОВ “Алькон” (м. Дніпропетровськ).

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно, серед них:

- розробка частотного ємнісного перетворювача рівня палива, який дозволяє проводити дистанційні вимірювання з високою точністю завдяки використанню довгої лінії з ємнісним навантаженням у вигляді ємнісного давача;

- розробка математичних моделей системи „кабель - давач”, які дозволяють досліджувати характер розподілу вхідного опору, еквівалентної ємності розподілення та оцінити точність ЧЄМ перетворення рівня палива;

– синтез математичних моделей і розробка інваріантних ємнісних перетворювачів рівня палива, що дозволяють підвищити точність перетворення рівня палива для використання у паливній системі контролю та керування балансуванням ЛА.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідались та обговорювалися на: міжнародній науково-технічній конференції “Приладобудування - 99” (Ялта, 1999); міжнародній науково-технічній конференції “Системи керування - 99” (Харків, ХАІ, 1999); міжнародному симпозиумі “Наука й підприємництво” (Вінниця, 2000); міжнародній науково-технічній конференції “Приладобудування - 2000” (Симеїз, 2000); міжнародній науково-технічній конференції “Інформаційна техніка й електромеханіка на порозі ХХІ сторіччя ” (Луганськ, Східно-український національний університет, 2001); міжнародній науково-технічній конференції “Механотроніка - 2001” (Харків, Харківський державний автомобільно-дорожній технічний університет, 2001); міжнародній науково-технічній конференції “Приладобудування - 2001” (Симеїз, 2001); міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми енергозабезпечення й енергозбереження в АПК України” (Харків, Харківський державний університет сільського господарства, 2001); міжнародній науково-технічній конференції “ІКТМ - 2001” (Харків, ХАІ, 2001); міжнародній науково-технічній конференції “Приладобудування - 2002” (Алупка, 2002); міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми енергозабезпечення й енергозбереження в АПК України” (Харків, Харківський державний університет сільського господарства, 2002); міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій і приладобудування (СПРТП-2005)” (Вінниця, 2005).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані в 17 наукових працях, з яких: 7 - у фахових виданнях ВАК України; 2 патенти України.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, 4 розділів, висновків та 8 додатків. Повний обсяг дисертації 195 сторінок, містить 71 рисунок за текстом, 8 таблиць за текстом, 8 додатків на 35 сторінках, 118 найменувань використаних літературних джерел на 11 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету й завдання дослідження, наведено характеристики наукової новизни і практичної цінності отриманих результатів, показано зв'язок роботи з науковими програмами.

**У першому розділі** проведено аналіз причин, які погіршують керованість і стійкість ЛА, де з'ясовано, що через похибки вимірювання кількості палива в крилах виникає дисбаланс маси палива. Внаслідок цього виникає додатковий обе-

ртальний момент і зменшується реакція ЛА, що негативно впливає на якість системи контролю та керування ЛА.

Процесом рівномірного розподілу маси палива керує паливна системи ЛА. Дослідженнями з'ясовано, що дисбаланс виникає внаслідок похибки первинних перетворювачів (ПП) рівня палива. У більшості випадків в ЛА використовуються ємнісні перетворювачі рівня палива, які чутливі до зміни діелектричної проникності і викликають похибку, що в найкращому випадку може становити не менше 7 %. Розроблена структурна схема керування ЛА по каналу крену дозволила дослідити негативні наслідки дисбалансу. Якщо він є, то виникають два випадки. В першому випадку ЛА може нахилитися на кут, більший заданого, в іншому випадку ЛА нахилиється на кут, менший заданого. Крім того, відхилення закритків викликають додаткову силу тертя, що збільшує витрату палива. У зв'язку з цим були переглянуті поширені методи та пристрої вимірювання кількості речовини, їх особливості, переваги та недоліки. Найбільш придатними для вирішення цих проблем визнано радіохвильові методи вимірювання кількості палива. Слід зазначити, що перевагою перетворювачів, які базуються на використанні цих методів, є інваріантність вимірювань рівня речовини до зміни її діелектричної проникності.

Вирішити ці проблеми можна шляхом модернізації старих і розробки нових методів і пристроїв вимірювання рівня палива, що є актуальною науковою задачею.

**У другому розділі** розглянуто основні недоліки радіохвильових і ємнісних методів вимірювання рівня речовини і для їх усунення розроблено перспективний метод, що дозволяє значно зменшити похибку перетворення рівня палива на ЛА. Для оцінки точності ЧЄМ перетворення рівня палива синтезовані і досліджені математичні й фізичні моделі вхідного опору та еквівалентного розподілу ємності частотного ємнісного ПП рівня палива. Відмінною рисою радіохвильового методу є можливість вимірювання рівня речовини (палива) незалежно від її діелектричної проникності. Однак вагомими недоліками не дозволили застосувати його для ЛА: методична похибка вимірювання, обумовлена нелінійністю вихідної характеристики; похибка визначення резонансної частоти внаслідок віддаленості первинних перетворювачів від електронного блоку; низька швидкість вимірювання. Ємнісний метод перетворення рівня речовин забезпечує високі показники точності, надійності й широко використовується в багатьох галузях. До його особливостей слід віднести: малу похибку (приблизно декілька відсотків); високу лінійність вихідної характеристики; високу надійність і простоту реалізації. Однак залежність точності вимірювання від діелектричної проникності речовин створює істотні проблеми. Запропоновані на сьогоднішній день інваріантні й компенсаційні схеми лише частково вирішують їх.

Порівнюючи ці методи, слід зазначити, що ПП на довгих лініях (ДЛ), які основані на радіохвильових методах, забезпечують інваріантність вимірювань рі-

вня речовини до зміни її діелектричної проникності на всьому діапазоні вимірювання рівня речовини. У ПП, основаних на ємнісних методах вимірювального перетворення рівня речовини, використовують компенсаційні схеми, які забезпечують компенсацію зміни діелектричної проникності речовини тільки в одній точці рівня. У разі ж наявності градієнта розподілу діелектричної проникності речовини за рівнем похибка значно зростає. Похибку нелінійності розподілу електромагнітного поля ПП на ДЛ автори зменшують шляхом лінеаризації, використовуючи подовжувальні пристрої ДЛ. З урахуванням цього запропоновано ідею, що ПП рівня палива складається з ДЛ й подовжувача у вигляді ємнісного давача. Причому давач має такі розміри, що вплив нелінійності розподілу електричного поля уздовж нього дуже малий, тому давач можна вважати не як відрізок ДЛ, а як ємнісне навантаження. З урахуванням властивості ДЛ змінювати електричну довжину, що залежить від типу навантажувального опору, первинний перетворювач із розподіленими параметрами замінено на еквівалентний ємнісний давач із зосередженими параметрами. Тоді електричне подовження ДЛ можна визначити за залежністю

$$l_d = \frac{v_\phi}{\omega_p} \arctg(\omega_p W C_d), \quad (1)$$

де  $v_\phi$  – фазова швидкість хвилі уздовж довгої лінії;  $\omega_p$  – резонансна частота;  $W$  – хвильовий опір;  $C_d$  – зосереджена ємність (електрична ємність ємнісного давача).

Якщо записати вихідну функцію як залежність резонансної частоти від ємності давача  $\omega_p = F(C_d)$ , вирішити рівняння стану “кабель - давач” через фазові швидкості й резонансні частоти та прийняти ємнісне навантаження у вигляді ємнісного давача рівня речовини, то отримаємо основне рівняння математичної моделі частотного ємнісного перетворювача рівня речовини

$$f_p = \frac{v_c}{2\pi\sqrt{\epsilon_k l_k}} [\pi n - \arctg(2\pi W_k f_p (s \cdot h_1 + C_0))], \quad (2)$$

де  $v_c$  – швидкість світла у вакуумі;  $\epsilon_k$  – діелектрична проникність діелектрика кабелю;  $l_k$  – довжина кабелю;  $n$  – номер гармоніки;  $W_k$  – хвильовий опір кабелю;  $s$  – чутливість ємнісного давача;  $h_1$  – рівень діелектричної речовини, що вимірюється;  $C_0$  – початкова ємність давача.

Проведені практичні експерименти підтвердили адекватність моделі (2).

Для оцінки похибок ЧЄМ виконано таке:

1. ДЛ подано у вигляді лінії, що складається з трьох ділянок із різним хвильовим опором: з'єднувального кабелю; частини давача, заповненого повітрям; частини давача, заповненого рідиною. Це дозволило досліджувати залежність похибки від розподілу електромагнітного поля, співвідношення довжини кабелю і давача та їхнього розташування.

2. Визначено трансцендентні рівняння знаходження резонансної частоти ПП



з використанням рівнянь розподілу вхідного опору ДЛ, які дозволили обчислити резонанс систем з розподіленими параметрами у режимах короткого замикання (КЗ) і холостого ходу (ХХ), а також резонансу на вищих гармоніках.

3. Визначено систему рівнянь розподілу вхідного опору по довжині ДЛ, які підтвердили адекватність розташування давача в області пучності напруги як ділянки з максимальною чутливістю до діелектричних речовин

$$Z_s(x) = \begin{cases} Z_{vzk}(x), & \text{якщо } x < l_k, \\ Z_{vxd}(x), & \text{якщо } x > l_k, \end{cases} \quad (3)$$

де  $x$  – рівень речовини;  $Z_{vzk}(x)$  – вхідний опір кабелю;  $Z_{vxd}(x)$  – вхідний опір давача.

Рис. 1. Розподілення опору по довжині ДЛ

На рис. 1 наведено графік розподілу вхідного опору, який визначається за системою рівнянь (3).

Експериментально також встановлено, що раціональним розташуванням давача є варіант, коли він розміщений в області пучності напруги, інші ж варіанти розташування показали його низьку чутливість до зміни діелектричної проникності речовини.

4. Розроблено і досліджено систему рівнянь моделі еквівалентного розподілу ємності системи „кабель - давач”, яка використовується для оцінки лінійності і методичної похибки у порівнянні з лінійним ємнісним давачем

$$C_s(x) = \begin{cases} \frac{1}{v_k Z_{vzk}(x)}, & \text{якщо } x < l_k, \\ \frac{1}{v_d Z_{vxd}(x)}, & \text{якщо } x > l_k, \end{cases} \quad (4)$$

де  $v_k, v_d$  – швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі у кабелі і давачі з паливом, відповідно.

На рис. 2 наведено графіки розподілу ємності уздовж рівня еквівалентного  $C_s(x)$  та лінійного  $Ul(x)$  давачів, похибка розбіжності між якими становить менше 0,02 %.

5. Досліджено похибку зміни резонансної частоти, що визначається за допомогою моделі системи з розподіленими параметрами (3). Проведені

Рис. 2. Розподіл ємності еквівалентного і лінійного ємнісних давачів:

1 –  $C_s(x)$ , 2 –  $Ul(x)$

експерименти показали, що модель для ЧЄМ дійсна тільки при виконанні умов, за яких довжина кабелю має бути в багато разів більшою за довжину ємнісного давача, а резонанс має місце на основній гармоніці (рис. 3).

а б

Рис. 3. Залежність частоти від рівня палива  
на різних гармоніках для двох методів:

1 – частотний ємнісний вимірювач; 2 – вимірювач на ДЛ;  
а) резонанс на основній гармоніці; б) резонанс на другій гармоніці.

Обчислення показали зменшення похибки зі збільшенням довжини кабелю у порівнянні з довжиною давача. Для забезпечення похибки 0,8 % рекомендується співвідношення довжини давача й кабелю 1/15 і менше.

**У третьому розділі** проаналізовано додаткові похибки ЧЄМ перетворення рівня палива. Результати дослідження показали, що більш суттєву похибку спричиняє зміна параметрів кабелю від зовнішніх впливів (температури) та діелектричної проникності палива (сортова похибка).

Розрахунки показали, що зміна таких параметрів, як довжина кабелю і хвильовий опір, викликають нестабільність резонансної частоти. Вони безпосередньо визначають резонансну частоту коливальної системи “кабель - давач”. Похибка від зміни хвильового опору кабелю порівняно з похибкою від зміни довжини кабелю значно менше, тому компенсація нестабільності резонансної частоти буде здійснюватись за рахунок компенсації похибки від зміни довжини кабелю  $l_k$ . Розроблено аналітичний метод, оснований на властивостях ДЛ збуджуватися на вищих гармоніках, який компенсує зміну довжини кабелю і забезпечує стабільність резонансної частоти. Багатоканальна система формується на віртуальних первинних каналах, які формуються вищими гармоніками ДЛ.

Вважаючи, що всі параметри в рівнянні (2) дорівнюють константам, крім  $l_k$ , складемо систему рівнянь (5)

$$\begin{cases} f_p^1 = \frac{v_c}{2\pi l_k \sqrt{\epsilon_k}} (\pi \cdot 1 - \arctg(2\pi W_k f_p^1 (s \cdot h1 + C_0))), \\ f_p^2 = \frac{v_c}{2\pi l_k \sqrt{\epsilon_k}} (\pi \cdot 2 - \arctg(2\pi W_k f_p^2 (s \cdot h1 + C_0))), \end{cases} \quad (5)$$

де  $f_p^1$ ,  $f_p^2$  – резонансні частоти основної і другої гармонік.

Розв'язуючи систему рівнянь відносно  $l_k$ , обчислюємо поточне значення

довжини кабелю  $l$ , порівнюючи його із значенням  $l_k$  в нормальних умовах, визначаємо зміну довжини кабелю. Таким чином компенсуємо цю похибку. Однак цей метод через використання частот вищих гармонік, дає великі похибки. Тому метод було доопрацьовано і він одержав нову назву „апаратно-аналітичний”. Його суть полягає у вимірюванні резонансної частоти  $f_{\text{ч}}$  за відсутності давача в режимі КЗ ДЛ й обчисленні поточного значення  $l_k$

$$l_k = \frac{\pi v_c}{4\sqrt{\varepsilon_k} \cdot f_{\text{ч}}} (2n-1). \quad (6)$$

На рис. 4 показано структурну схему, в якій давач шунтується за допомогою ключа, а ДЛ, яка є замкненою, переходить у режим коливань КЗ.

Рис. 4. Вимірювальний перетворювач із шунтуючим фільтром

Шунтуючий фільтр використовується як ключ, резонансна частота якого налаштована на частоту ДЛ у режимі КЗ. Перемикання здійснюється з боку електронного

блока за допомогою керованого генератора. Таким чином, ДЛ у режимі ХХ вимірює значення ємності давача, а в режимі КЗ - значення довжини кабелю, здійснюючи компенсацію зміни довжини кабелю  $l_k$ . Використання цього методу компенсації дозволило зменшити похибку частотного ємнісного перетворювача рівня палива з 20 до 0,8 %.

Проблему компенсації зміни діелектричної проникності палива вдалося вирішити завдяки використанню принципу інваріантності. У першому варіанті розроблено вимірювальний перетворювач рівня, в якому канали виконано у вигляді еквівалентних квазіємнісних давачів, виходячи з припущення, що ДЛ може бути еквівалентним конденсатором з певним законом розподілу ємності. ДЛ, з одного боку, є короткозамкненою, з іншого - підключається до ємнісного давача. Підключення давачів з різних боків формує канали з різними вихідними характеристиками. Вирішити у загальному вигляді систему рівнянь, інваріантну до діелектричної проникності палива, не вдалося. Із рис. 5 випливає, що існують явні розбіжності графіків вимірювання рівня речовини при зміні діелектричної проникності  $\varepsilon$  з 2 до 2,2, причому розбіжність фактично пропорційна зміні діелектричної проникності

Рис. 5. Вихідна характеристика двоканального перетворювача на ДЛ:  
 $h_1$  - істинний рівень рідини;  $1 - \varepsilon=2$ ;  
 $2 - \varepsilon=2,2$

речовини. У другому варіанті було вирішено частину ДД у вигляді еквівалентних квазіємнісних давачів із певним законом розподілу ємності замінити ємнісними давачами і синтезувати ємнісний інваріантний ПП рівня палива. Застосувавши принцип інваріантності й прийнявши за основу закон розподілу ємності квазі-ємнісних давачів, синтезували ПП рівня діелектричних рідин (палива), в якому використовуються ємнісні плоскопрямокутний (рис. 6, а) і плоскотрикутний (рис. 6, б) давачі.

а б  
Рис. 6. Ємнісні давачі рівня з різними формами пластин

Залежність ємності від рівня речовини для плоскопрямокутного й плоскотрикутного давачів має такий вигляд:

$$C_{\Pi} = C_{0\Pi} + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \frac{l_{\Pi} \cdot h_1}{d_{\Pi}}, \quad (7)$$

$$C_T = C_{0T} + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \frac{l_T}{2 \cdot h_T \cdot d_T} \cdot h_1^2, \quad (8)$$

де  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – діелектрична проникність вимірюваної речовини й повітря;  
 $l_T, h_T, d_T, l_{\Pi}, d_{\Pi}$  – фізичні розміри давачів;  $C_{0T}, C_{0\Pi}$  – електрична ємність порожніх давачів;  $h_1$  – вимірюваний рівень речовини. Розв'язавши рівняння (7) і (8) відносно  $h_1$ , отримаємо вираз, інваріантний до зміни діелектричної проникності речовини

Рис. 7. Залежність розрахункового значення рівня рідини від істинного:  
 1 –  $\varepsilon=2$ ; 2 –  $\varepsilon=4,7$

$$h_1 = \frac{l_{\Pi} \cdot 2 \cdot h_T \cdot d_T (C_T - C_{0T})}{l_T \cdot d_{\Pi} (C_{\Pi} - C_{0\Pi})}. \quad (9)$$

Графіки залежності розрахованого значення рівня речовини від істинного при зміні діелектричної проникності з 2 до 4,7 (рис. 7) показують абсолютну інваріантність, що повністю відповідає вимогам для вимірювання рівня палива на ЛА.

Перевірка виконання умови інваріантності рівнянь давачів (7) і (8) нерівністю

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial C_{\Pi}}{\partial h_1} & \frac{\partial C_{\Pi}}{\partial \varepsilon_1} \\ \frac{\partial C_{\Gamma}}{\partial h_1} & \frac{\partial C_{\Gamma}}{\partial \varepsilon_1} \end{vmatrix} \neq 0 \quad (10)$$

також підтверджується. Визначник матриці (10) не дорівнює нулю, що забезпечує єдине рішення (7) і (8).

Додаткові похибки інваріантного первинного перетворювача обчислюються як

$$\frac{\Delta h_1}{h_1} \approx \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta C_{\Pi} + \Delta C_{0\Pi}}{C_{\Pi} - C_{0\Pi}} + \frac{\Delta C_{\Gamma} + \Delta C_{0\Gamma}}{C_{\Gamma} - C_{0\Gamma}}, \quad (11)$$

де  $k$  – константа конструктивних характеристик давачів.

Отримані результати перетворення рівня палива з урахуванням похибок (рис. 8) аналогічні розрахункам еквівалентних квазі-ємнісних давачів, але вже з певною похибкою в області вимірювання малих значень рівня речовини.

Проведені експерименти з цими ПП рівня палива показали велику похибку вимірювання, особливо при малих значеннях рівня палива. Аналіз результатів показав, що похибка виникає внаслідок низької чутливості давачів, а також внаслідок зміни початкової ємності давача. Тому, щоб зменшити похибку вимірювання в області малих значень рівня палива, розроблено плоскопрямокутну і плоскотрапецієподібну форми давачів перетворювача. Як і в попередньому випадку, аналогічним чином отримано рівняння для інваріантних перетворювачів, а проведені експерименти підтвердили досягнення інваріантності вимірювань до зміни діелектричної проникності палива (рис. 9).

Із графіків випливає, що в області малих значень рівня рідини є зона невизначеності вимірювань, що досягає 13 % від довжини вимірюваного рівня. На іншій

Рис. 8. Вплив похибки зміни діелектричної проникності на інваріантність вимірювань

Рис. 9. Графіки експериментальних вимірювань рівня рідин з різними діелектричними проникностями:

- 1 – бензин з  $\varepsilon=2$ ;
- 2 – олія соняшникова з  $\varepsilon=2,3$ ;
- 3 – олія касторова з  $\varepsilon=4,7$

ділянці похибка не перевищує 2 % при зміні діелектричної проникності в 2,35 раз. У табл. 1 наведено порівняльні похибки частотного ємнісного перетворювача рівня палива із типовими прототипами.

Таблиця 1

## Порівняльні результати похибок

Сортові похибки, $\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = 10 \%$	Похибка від зміни хвильового опору кабелю, $\frac{\Delta W}{W} = 4 \%$	Технологічні похибки	Похибка від зміни довжини резонансного кабелю, $\frac{\Delta l_k}{l_k} = 0,1 \%$
Прототипи			
10 %	5 %	0,15 %	3,5 %
Інваріантний частотний ємнісний перетворювач рівня палива			
1 %	1 %	0,15 %	0,7 %

Отже, незважаючи на недоліки, сортову похибку вдалося зменшити в 10 разів, похибки від зміни параметрів кабелю - в 5 разів.

У **четвертому розділі** описано розроблену ВОС для вимірювання рівня палива, яка основана на частотних ємнісних перетворювачах із інваріантними давачами (рис. 10).

Рис. 10. Структурна схема ВОС

- 1 – рівень палива  $h$ , що вимірюється; 2 – первинний перетворювач (ємнісні давачі); 3, 4 – шунтуючі фільтри; 5 – з'єднувальні кабелі (ДЛ); 6, 7 – керовані генератори частоти; 8 – пристрій керування й обчислення; 9 – пристрій відображення інформації; 10 – генератор коригувальних давачів; 11 – позиційні давачі порожнього або заповненого бака

Розроблена система дозволяє: виконувати дистанційні вимірювання при великій віддаленості об'єкта вимірювання; виконувати діагностику стану параметрів з'єднувального кабелю; здійснювати за допомогою позиційних давачів автокоригування первинного перетворювача безперервного виміру рівня палива.

Для забезпечення надійної роботи ВОС рівня речовини досліджено різні схеми генераторів і розроблено удосконалений керований генератор, що працює на відрізках ДЛ. Його основними перевагами є: збудження коливань в ДЛ і швидке перемикавання на будь-який режим ДЛ (ХХ, КЗ); стійка генерація коливань при різних навантаженнях ДЛ; можливість функціонування на гармоніках вищих порядків. Для компенсації зміни параметрів кабелю від зовнішніх впливів розроблено і випробувано частотний шунт, який замикає ДЛ і переводить її в режим КЗ, виключаючи вплив ПП. Розроблено алгоритм роботи ВОС для керування процесом вимірювання, який складається з двох фаз: вимірювальної та компенсаційної.

З використанням методу синтезу інваріантних ємнісних ПП розроблено декілька варіантів з поліпшеними характеристиками точності. На рис. 11 подано інваріантний ємнісний ПП рівня палива з плоскопрямокутною і плоскотрапецієподібною формами давачів. Вираз перетворення рівня палива має такий вигляд

$$h_1 = \left( \frac{C_T - C_{0T}}{C_{II} - C_{0II}} \frac{2d_2}{d_1} \frac{l_1}{l_2} - \frac{l_3}{l_2} - 1 \right) h_0 + h_d, \quad (12)$$

де  $C_T$ ,  $C_{II}$  – залежність ємності від рівня палива плоскопрямокутних і плоскотрапецієподібних і плоскопрямокутних давачів;  $C_{0T}$ ,  $C_{0II}$  – ємність порожніх плоскопрямокутних і плоских давачів;  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ ,  $h_0$ ,  $h_d$  – розміри давачів.

Вираз перетворення ПП рівня палива з плоскопрямокутним з постійним зазором і плоскопрямокутним зі змінним зазором давачами має вигляд

$$\frac{C_{PI3} - C_{0PI3}}{C_{PI} - C_{0PI}} = \frac{d_1 \cdot h_0}{\Delta d \cdot h_1} \ln \frac{h_1 + h_0 - h_d}{h_0 - h_d}, \quad (13)$$

де  $C_{PI3}$ ,  $C_{PI}$  – залежність ємності від рівня палива плоскопрямокутного із змінним зазором і плоскопрямокутного з постійним зазором давачів;  $C_{0PI3}$ ,  $C_{0PI}$  – ємність порожніх плоского із змінним зазором і плоского з постійним зазором давачів;  $d_1$ ,  $h_0$ ,  $\Delta d$ ,  $h_d$  – розміри давачів.

Для ПП із циліндричними давачами вираз перетворення має такий вигляд

Рис. 11. Зовнішній вигляд ПП рівня палива з ємнісними інваріантними датчиками

$$\frac{C_k - C_{0k}}{C_C - C_{0C}} = \frac{\ln \frac{Dc}{dc}}{h1} \int_{h_0 - h_d}^{h_0 - h_d + h1} \frac{1}{\ln \frac{D_1}{D_1 - kh}} dh, \quad (14)$$

де  $C_k$ ,  $C_C$  – залежність ємності від рівня палива конічного і коаксіального давачів;  $C_{0k}$ ,  $C_{0C}$  – ємність порожніх конічного і коаксіального давачів;  $Dc$ ,  $dc$ ,  $D_1$ ,  $h_0$ ,  $h_d$  – розміри давачів;  $k$  – коефіцієнт форми конічного давача.

Розроблено методику, що сприяє швидкій розробці первинних перетворювачів рівня діелектричних рідин як для ЛА, так і інших об'єктів промисловості.

Експериментальні дослідження показали, що використання розробленої ВОС дозволить майже в 4 рази покращити стійкість і керованість ЛА за рахунок підвищення точності вимірювального перетворення рівня палива паливної системи контролю та керування балансуванням ЛА.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу з підвищення стійкості і керованості ЛА шляхом розробки перспективного методу і пристроїв вимірювального перетворення рівня палива, що значно підвищують точність паливної системи контролю та керування балансуванням ЛА. В роботі отримано такі основні наукові і практичні результати.

1. Проведений аналіз впливу похибки первинних перетворювачів рівня палива паливної системи контролю та керування балансуванням ЛА на стійкість і керованість ЛА виявив, що виникає похибка визначення рівня палива, яка викликає ефект дисбалансу маси палива. Внаслідок цього виникає обертаючий момент, який викликає зменшення або збільшення заданого кута тангажа або крену. Моделювання показало, що при похибці первинних перетворювачів рівня палива в 10 % виникає похибка заданого кута тангажа або крену в 1 градус, а час перехідного процесу збільшується майже в 2 рази. Недоліком ємнісних первинних перетворювачів рівня палива, які використовуються на сучасних ЛА, є чутливість до зміни діелектричної проникності палива. Із проаналізованих методів визначення рівня палива, які б відповідали умовам експлуатації ЛА, є ємнісний і радіохвильовий методи, які дозволяють розробляти первинні перетворювачі, що не чутливі до зміни діелектричної проникності палива.

2. Визначено основні переваги і недоліки ємнісного і радіохвильового методів. Ємнісний метод має велику точність перетворення рівня палива і надійність, але чутливий до зміни діелектричної проникності палива. Радіохвильовий метод позбавлений чутливості до зміни діелектричної проникності палива, але має низь-



ку швидкість і точність перетворення, яка пов'язана із нелінійністю розподілу електричного поля. Поєднуючи ці методи, розроблено частотний ємнісний метод перетворення рівня палива, який ґрунтується на використанні довгої лінії, що навантажена на ємнісний давач, і дозволяє зменшити похибку, пов'язану з нелінійністю розподілу електричного поля.

3. Розроблено математичну модель первинного перетворювача рівня палива, яка основана на використанні відрізків довгої лінії із різними хвильовими опорами. Ця модель дозволила підтвердити адекватність частотних характеристик частотного ємнісного метода перетворення рівня палива у разі резонансу на основній гармоніці.

4. Розроблено математичну модель еквівалентного розподілу вхідної ємності первинного перетворювача на відрізках довгої лінії, що дозволила обчислити методичну похибку частотного ємнісного метода перетворення рівня палива, яка залежить від співвідношення довжини довгої лінії і ємнісного давача. При співвідношенні довжини кабеля і давача  $1/15$  величина похибки не перевищує  $0,8\%$ .

5. Проведений аналіз похибок частотного ємнісного методу перетворення рівня палива показав, що цей метод чутливий до впливу зовнішньої температури і зміни діелектричної проникності палива. Для компенсації похибок впливу зовнішньої температури розроблено аналітичний і апаратно-аналітичний методи компенсації зміни резонансної частоти. У першому методі як додаткові віртуальні вимірювальні канали інформації використовуються гармоніки довгої лінії. У другому методі використовуються режими холостого ходу і короткого замикання довгої лінії. Експериментальні дослідження дослідного зразка, які виконані з використанням апаратно-аналітичного методу компенсації, показали, що при застосуванні цього методу похибка перетворення рівня палива зменшується практично в 5 разів.

6. Для компенсації похибки від зміни діелектричної проникності палива синтезовано інваріантні ємнісні первинні перетворювачі рівня палива (рідини), які базуються на принципі інваріантності Б.М. Петрова й використанні ємнісних давачів, як первинних перетворювачів рівня палива. Це дозволило отримати незалежність перетворення рівня палива від зміни його діелектричної проникності. Проведено експериментальні дослідження, за результатами яких зроблено висновок, що похибка інваріантного ємнісного первинного перетворювача рівня палива становить менше  $2\%$  в діапазоні діелектричної проникності палива від 2 до 4,7. Теоретично доведено, що розроблені інваріантні ємнісні первинні перетворювачі рівня палива здатні вимірювати рівень діелектричних рідин з будь-яким коефіцієнтом діелектричної проникності.

7. Розроблена вимірювально-обчислювальна системи рівня палива для ЛА, у якій вимірювальний перетворювач оснований на частотному ємнісному методі і використанні інваріантного ємнісного первинного перетворювача рівня палива.

Отримані результати моделювання показали, що застосування розробленої вимірювально-обчислювальної системи рівня палива дозволило зменшити вплив дисбалансу маси палива на стійкість і керованість ЛА практично в 4 рази.

8. На основі проведених досліджень розроблено перспективні моделі інваріантних ємнісних первинних перетворювачів рівня палива, які використовують коаксіальні циліндричні ємнісні давачі. Це дало змогу легко їх пристосовувати для заміни існуючих ємнісних первинних перетворювачів рівня палива на ЛА.

9. Наукові й практичні результати, отримані в роботі, впроваджено в практику підприємств: Харківське державне авіаційне виробниче підприємство (ХДАВП), навчальний процес на кафедрі авіаційних приладів та вимірювань Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського "ХАІ" і в ТОВ "Алькон" (м. Дніпропетровськ).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Кныш В.А., Коваленко П.И., Кошевой Н.Д.* Исследование особенностей применения штыревого датчика в высокочастотном топливомере // Вісник Східноукраїнського національного університету. – Луганськ: СХУ. – 2001. – №3. – С. 173 – 174.

Здобувачеві належить аналіз процесів високочастотного перетворювача у разі використання штирового давача.

2. *Кныш В.А., Кошевой Н.Д., Коваленко П.И.* Система контроля топлива в баке автомобиля // Вестник Харьковского государственного автомобильно-дорожного технического университета. – Харьков: ХГАДТУ. – 2001. – Вып. 15 – 16. – С. 157 – 158.

Здобувач запропонував вимірювальну систему кількості палива, реалізовану на ЧЄМ.

3. *Компьютерная система управления запасами сельскохозяйственных материалов, размещенных в резервуарах / В.А. Кныш, Н.Д. Кошевой, П.И. Коваленко, И.А. Фурман* // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – Харків: ХДТУСГ. – 2001. – Вип. 6. – С. 160 – 163.

Здобувач розробив систему керування розподіленням сільськогосподарських матеріалів, використавши частотний ємнісний перетворювач кількості речовини.

4. *Кошевой Н.Д., Коваленко П.И., Кныш В.А.* Выбор генератора для многоканальной системы // Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. – Черкаси: ЧІТІ. – 2001. – Спецвипуск. – С. 47 – 49.

Здобувач розробив і дослідив декілька схем генераторів, які забезпечуватимуть керованість вимірювальним процесом.

5. *Оценка погрешности частотного топливомера* / В.И. Шевченко, В.А. Кныш, П.И. Коваленко, Н.Д. Кошевой // *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. – Черкаси: ЧДТУ. – 2002. – №3. – С. 47 – 48.

Здобувач розробив математичну модель перетворювача рівня речовини, враховуючи частотні особливості ДЛ.

6. *Кныш В.О., Кошовий М.Д., Коваленко П.И.* Методи компенсації похибок при дистанційних різночастотних вимірюваннях // *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства*. – Харків: ХДТУСГ. – 2002. – Вип. 10. – С. 397 – 401.

Здобувач запропонував удосконалений метод компенсації зовнішніх впливів.

7. *Шевченко В.І., Кныш В.О.* Аналіз точності розробленого ємнісного датчика паливоміра, інваріантного до якості палива // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т „ХАІ”. – 2004. – Вип. 6(14). – С. 32 – 35.

Здобувач розробив і дослідив метод синтезу інваріантних ємнісних первинних перетворювачів.

8. *Пат. 51313 Україна, G01F 23/28.* Система для виміру кількості палива / П.І. Коваленко, В.О. Кныш, М.Д. Кошовий (Україна). – № 2002021386; Заявл. 19.02.2002; Опубл. 15.10.2004, Бюл. № 10. – 4 с.

Здобувач розробив систему вимірювання кількості палива з удосконаленою можливістю компенсації зовнішніх впливів, виконану з використанням ДЛ та ємнісного давача.

9. *Пат. 62670 Україна, G01F 23/26.* Паливомір / В.О. Кныш, П.І. Коваленко, М.Д. Кошовий (Україна). – № 2003043876; Заявл. 25.04.2003; Опубл. 15.02.2006, Бюл. № 2. – 3 с.

Здобувач розробив паливомір, інваріантний до зміни діелектричної проникності вимірюваної речовини.

10. *Кныш В.А., Коваленко П.И., Кошевой Н.Д.* Некоторые особенности проектирования современных авиационных высокочастотных топливомеров // *Труды филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в г. Калуга*. – Калуга. – 1999. – Спецвыпуск. – С. 236 – 238.

Здобувачеві належить ідея розробки дистанційного перетворювача рівня палива.

11. *Кныш В.А., Коваленко П.И., Кошевой Н.Д.* Высокочастотный емкостной авиационный измеритель количества топлива // *Труды филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в г. Калуга*. – Калуга. – 2000. – Спецвыпуск. – С. 496–500.

Здобувач запропонував використання високочастотного перетворювача кількості палива для підвищення точності вимірювань.

12. *Кныш В.А., Коваленко П.И., Кошевой Н.Д.* Измерение количества топли-

ва, произвольно расположенного в цилиндрическом баке // Труды филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в г. Калуга. – Калуга. – 2000. – Спецвыпуск. – С. 322 – 324.

Здобувач розробив і дослідив вимірювач кількості палива для аерокосмічних об'єктів.

13. *Емкостный топливомер, инвариантный к изменению сорта топлива* / В.А. Кныш, Н.Д. Кошевой, П.И. Коваленко, К.А. Ядчук // Сборник трудов международ. науч.-техн. конф. “Приборостроение-2002”. – Винница-Алупка. – 2002. – С. 42 – 43.

Здобувач запропонував перетворювач рівня для вимірювання кількості палива з градієнтом розподілу діелектричної проникності уздовж рівня.

14. *Аналіз точності ємнісного датчика паливоміра для транспортного засобу* / В.І Шевченко, В.О. Книш, М.Д. Кошовий, П.І. Коваленко // Матеріали першої міжнарод. наук.-техн. конф. „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування” (СПРТП-2005). – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця. – 2005. – С. 94 – 96.

Здобувач запропонував інваріантний перетворювач кількості палива для використання в системах керування транспортних засобів.

15. *Кныш В.А., Коваленко П.И., Кошевой Н.Д.* Разработка и исследование схемы емкостного топливомера, инвариантного к сортовой погрешности // Тез. докл. науч.-техн. конф. молодых ученых Государственного аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского „ХАИ” „Системы управления-99”. – Харьков: ХАИ. – 1999. – С. 15.

Здобувачеві проаналізував первинні перетворювачів, що інваріантні до виду палива.

16. *Кныш В.А.* Измеритель количества вещества в невесомости // Тези доповідей міжнарод. наук.-техн. конф. „ІКТМ-2001”. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т „ХАІ”. – 2001. – С. 150.

17. *Кныш В.А.* Многорезонансный генератор на длинных линиях для многоканальной системы // Тез. докл. науч.-техн. конф. “Системы управления - 2001”. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т “ХАИ”. – 2001. – С. 11.

## АНОТАЦІЇ

Книш В.О. Інваріантні частотні ємнісні перетворювачі рівня для систем контролю і керування літальних апаратів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 - елементи та пристрої обчислювальної техніки та систем керування. Національний технічний університет “Харківський політехнічний інсти-

тут”, Харків, 2007.

Дисертаційну роботу присвячено підвищенню точності первинних перетворювачів рівня палива для систем контролю і керування літальних апаратів.

В дисертації розроблено частотний ємнісний метод перетворення рівня палива, який забезпечує дистанційність вимірювань і стійкість до зміни діелектричної проникності палива (діелектричної рідини). Метод оснований на використанні частотних характеристик систем з розподіленими й зосередженими параметрами. Як коливальна система використана довга лінія, яка навантажена на ємнісне навантаження у вигляді ємнісного давача рівня палива. Компенсація температурного впливу на з'єднувальний кабель здійснюється за допомогою розробленого апаратно-аналітичного методу. Використовуючи режими роботи холостого ходу і короткого замикання довгої лінії, у першому режимі резонансна частота довгої лінії визначається її параметрами та ємністю давача, а у другому режимі резонансна частота визначається тільки параметрами довгої лінії, завдяки чому здійснюється компенсація зміни її параметрів від впливу температури. За допомогою розроблених інваріантних ПП рівня палива, які основані на принципі інваріантності Петрова і ємнісних давачах, здійснюється вимірювальне перетворення рівня палива незалежно від зміни його діелектричної проникності. Розроблено вимірювально-обчислювальну систему рівня палива, в якій використовується частотний ємнісний вимірювальний перетворювач рівня палива із інваріантним ємнісним ПП, яка покращить стійкість і керованість літального апарата за рахунок підвищення точності визначення рівня палива паливної системи контролю та керування балансуванням, що зменшить вплив ефекту дисбалансу центру ваги ЛА.

Ключові слова: паливна система контролю та керування, первинний перетворювач рівня палива, керований генератор резонансної частоти, шунтуючий фільтр, модель еквівалентного розподілу ємності уздовж довгої лінії, ємнісний метод перетворення рівня палива.

Кныш В.А. Инвариантные частотные емкостные преобразователи уровня для систем контроля и управления летательных аппаратов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - элементы и устройства вычислительной техники и систем управления. Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2007.

Диссертационная работа посвящена повышению точности первичных преобразователей (ПП) уровня топлива для систем контроля и управления летательных аппаратов.

В диссертации разработан частотный емкостный метод (ЧЕМ) преобразования уровня топлива, который обеспечивает дистанционность измерений и устой-

чивость к изменению диэлектрической проницаемости топлива (диэлектрической жидкости). Метод основан на использовании частотных характеристик систем с распределенными и сосредоточенными параметрами. В качестве колебательной системы использована длинная линия (ДЛ), нагруженная на емкостную нагрузку в виде емкостного датчика уровня топлива. Синтез ДЛ и емкостного датчик обеспечивает линеаризацию выходной характеристики при условии, что длина ДЛ намного больше длины датчика, и уменьшает погрешность измерения уровня топлива. Теоретически и практически исследованы варианты расположения датчика и доказано, что емкостный датчик рационально располагать в области пучности напряжения. Это обеспечивает максимальную чувствительность к диэлектрическим веществам и дает возможность полагать, что закон распределения электромагнитного поля линейный. Для доказательства этого разработаны: модель распределения входного сопротивления на отрезках ДЛ, позволившая получить частотные характеристики первичного преобразователя, и модель эквивалентного распределения емкости системы “кабель - датчик” на отрезках ДЛ, позволившая оценить влияние нелинейности распределения электромагнитного поля на точность преобразования уровня топлива. Экспериментально установлено, что погрешность нелинейности распределения электромагнитного поля частотного емкостного первичного преобразователя составляет менее 0,02 %. При соотношении длины кабеля и датчика 1/15 и резонансе частоты ДЛ на основной гармонике методическая погрешность ЧЕМ преобразования уровня топлива составляет менее 0,8 %. В случае невыполнения этих условий погрешность возрастает, особенно при переключении резонансной частоты на гармоники высших порядков. Анализ ЧЕМ преобразования уровня топлива выявил погрешности существенно ухудшающие точность измерений: погрешность от температуры окружающей среды, вызывающая изменения длины кабеля; погрешность от изменения диэлектрической проницаемости топлива (сортовая погрешность). Для компенсации первой погрешности разработан аналитический метод, использующий многоканальную систему, в которой виртуальные измерительные каналы выполнены на гармониках высших порядков. Однако возбуждение колебаний в ДЛ на гармониках высших порядков уменьшает точность ЧЕМ. Поэтому проведена доработка и разработан новый метод, получивший название “аппаратно-аналитический”. В этом методе предполагается отсекание первичного преобразователя с помощью переключателя. Учитывая наличие режимов холостого хода и короткого замыкания в ДЛ, можно в качестве переключателя использовать шунтирующий фильтр, который на резонансной частоте режима короткого замыкания ДЛ зашунтирует емкостный датчик, и резонансная частота будет определяться только длиной кабеля, при этом погрешность уменьшилась в 5 раз. Компенсация сортовой погрешности осуществляется разработанными инвариантными емкостными ПП уровня топлива. С использованием принципа инвариантности и модели распреде-

ления эквивалентной емкости системы “кабель - датчик” синтезированы инвариантные емкостные ПП уровня топлива, в которых законы выходных характеристик формируются различными формами емкостных датчиков. В результате моделирования выведены частные уравнения выходных характеристик емкостных преобразователей. На основании этого получены уравнения выходных характеристик для различных форм емкостных датчиков. Моделирование разработанного инвариантного емкостного ПП уровня топлива (диэлектрической жидкости), в котором использовались емкостные датчики плоскопрямоугольной и плоскотрапециидальной форм, показало полную инвариантность к изменению диэлектрической проницаемости жидкости. Проведенные эксперименты показали погрешность преобразования уровня жидкости менее 2 % при изменении коэффициента диэлектрической проницаемости в диапазоне от 2 до 4,7. Разработана измерительно-вычислительная система уровня топлива, использующая частотный емкостный ПП уровня топлива с инвариантным емкостным преобразователем, которая позволила улучшить устойчивость и управляемость летательного аппарата путем повышения точности определения уровня топлива топливной системы контроля и управления балансировкой летательного аппарата, что в результате снижает воздействие эффекта дисбаланса центра тяжести летательного аппарата.

Ключевые слова: топливная система контроля и управления, первичный преобразователь уровня топлива, управляемый генератор резонансной частоты, шунтирующий фильтр, модель эквивалентного распределения емкости вдоль длинной линии, емкостный метод преобразования уровня топлива.

Knysh V.A. Invariant frequency capacitive converters of a level for the systems of monitoring and control in a flying vehicle. – Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.13.05 – elements and devices of computing facilities and management systems. National technical university “Kharkov polytechnic institute”, Kharkov, 2007.

Dissertation is devoted to the problem of increasing the accuracy of the primary converters (MC) of fuel level for the aircrafts systems of monitoring and control.

Frequency capacitive method of the fuel level conversion developed in dissertation, which provides remote measurements and stability to dielectric permeability change of the fuel (dielectric liquid). The method based on usage of the frequency characteristics of systems with distributed and concentrated parameters. As an oscillating system the long line is used, loaded on a capacitive load which role plays a capacitance transducer of the fuel level. Compensation of temperature effect on a cable is carried out by designed hardware-analytical method. Using the operational modes of single course and short circuit of long line, in the first mode the resonant frequency of long line is de-

terminated with her parameters and capacity of the transducer and in the second mode the resonant frequency is determined only by the parameters of long line, and due to that the compensation of the change of its parameters from temperature effect fulfilled. By means of designed invariant MC of fuel level, which based on the Petrov's principle of invariance and capacitive transducers, the measuring conversion of fuel level independently from change of dielectric permeability is carried out. The measuring - computing system of a fuel level is developed, where the frequency capacitive transducer of a fuel level with an invariant capacitance MC is used, which allowed to improve stability and controllability of the flying vehicles due to the increased accuracy definition of fuel level the fuel system of monitoring and balancing control and decreasing the influence of the unbalance center mass of the flying vehicle effect.

Keywords: a fuel system of the monitoring and control, primary converter of fuel level, controlled generator of a resonant frequency, shunting filter, model of equivalent distribution capacity along long line, capacitive method of conversion fuel level.

---

Надруковано в типографії ХАІ: 61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17.

Відповідальний за випуск к.т.н. О.В. Заболотний

Підписано до друку “\_\_\_\_\_” січня 2007 р.

Обсяг 0,9 авт. аркушів

Замовлення № \_\_\_\_\_

Наклад 100 примірників.

Безкоштовно.