

УДК 381.5

*В. В. АРДЕЛЯН, Д. М. ОБІДІН, А. П. МУСІЄНКО***МЕТОДИКА НАКОПИЧЕННЯ ДІАГНОСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ ВИКОНАННІ ДІАГНОСТУВАННЯ В РОЗПОДІЛЕНИХ БАЗАХ ЗНАТЬ ПІЛОТАЖНО-НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ПОВІТРЯНОГО СУДНА**

В роботі розроблена методика накопичення діагностичної інформації при виконанні діагностування в розподілених базах знань пілотажно-навігаційного комплексу повітряного судна. Крім того, розроблено процедуру визначення коректного модуля, який виконуватиме алгоритм діагностування і передає інформацію про семантичний стан розподіленої бази знань до системи управління.

Встановлено умови діагностування розподіленої бази знань: можливість поділу на модулі, які повинні бути зв'язані між собою і здатні перевіряти один одного; кожен модуль повинен мати вільний обчислювальний ресурс.

**Ключові слова:** діагностування, розподілена база знань, повітряне судно, пілотажно-навігаційний комплекс, система автоматичного управління.

В работе разработана методика накопления диагностической информации при выполнении диагностики в распределенных базах знаний пилотажно-навигационного комплекса воздушного судна. Кроме того, разработана процедура определения корректного модуля, который будет выполнять алгоритм диагностики и передачи информации о семантическом состоянии распределенной базы знаний в систему управления. Установлены условия диагностирования распределенной базы знаний: возможность разделения на модули, которые должны быть связаны между собой и способны проверять друг друга; каждый модуль должен иметь свободный вычислительный ресурс.

**Ключевые слова:** диагностирование, распределенная база знаний, воздушное судно, пилотажно-навигационный комплекс, система автоматического управления.

In this paper developed methods of accumulation diagnostic information in diagnosing the performance of distributed knowledge bases flight and navigation system of the aircraft. In addition, a procedure for determining the correct module that perform diagnostics algorithm and transmits information about the state of distributed semantic knowledge base to the control system.

It is shown that diagnosis of distributed knowledge base presupposes the following conditions: a knowledge base can be divided into modules to be interconnected and can check each other; each module should be available computing resources to perform audits and software redundancy for storage of tests and their results.

Also found that in the performance of basic checks appropriate to use the drug evaluation system, as it fully meets all situations failures in real distributed knowledge base.

**Keywords:** diagnostics, distributed knowledge base, aircraft flight and navigation system, automatic control system.

**Вступ.** В сучасних умовах постійно зростають вимоги до безпеки польотів. Відомо, що всі позаштатні ситуації на повітряних суднах розподіляються на складні, аварійні та катастрофічні. Відповідно до вимог Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО) імовірність виникнення на повітряному судні складної ситуації на одну годину польоту не повинна перевищувати  $10^{-4}$ , аварійної ситуації –  $10^{-6}$ , а катастрофічна ситуація –  $10^{-7}$ . Статистика авіаційних катастроф та подій як в Україні, так і в світі, для цивільної авіації, дозволяє зробити висновок про те, що найбільш поширеною причиною аварійності (від 60 до 80 %) є, так званий, людський чинник. Це пояснюється, переважно, обмеженими можливостями людини щодо управління складною технікою в екстрених ситуаціях. Тому одним з важливих напрямків забезпечення безпеки польоту є впровадження заходів, які спрямовані на підвищення ефективності процесів навігації та управління рухом повітряним судном. А в першу чергу це – автоматизація управління польотом повітряного судна. Стан сучасних бортових систем автоматичного управління (САУ) повітряним судном, як складової підсистеми бортового пілотажно-навігаційного комплексу, відповідає існуючим міжнародним нормам. Але умови експлуатації, наприклад, цивільної авіації пов'язані з постійним зростанням інтенсивності польотів. Так за даними ІКАО складність управління повітряним рухом за 2010 – 2016 рр. збільшилася на 7 – 10 %. Аналіз наукових праць вітчизняних та закордонних фахівців дозволив виявити тенденції розвитку систем автоматичного управління, які передбачають їх побудову на принципах інтелектуалізації та адаптивності.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Проблема забезпечення достовірності діагностування функціонування складних інтелектуальних систем досліджувалась в роботах О. А. Машкова [1], В. А. Машкова [2, 3]. Ключові положення теорії тестового діагностування потім були розвинені в роботах О.В. Барабаша [4,5], Ю. В. Кравченка [6], В. А. Савченка [7] та інших.

З аналізу робіт можна зробити висновок, що функціональна стійкість, як властивість складної технічної системи, забезпечується шляхом перерозподілу деякої існуючої в системі надмірності з метою парировання наслідків позаштатних ситуацій. Заходи, які спрямовані на забезпечення або підвищення функціональної стійкості, в першу чергу, забезпечують поліпшення характеристик відмовостійкості і живучості, але не обов'язково показників надійності окремих комплектуючих елементів і виробів, а, так само, тактико-технічних характеристик системи. Теорія функціональної стійкості перебуває в стадії розвитку, і формування показників функціональної стійкості як показників ефективності складних технічних систем є важливим напрямком наукових досліджень. Аналіз функціональної стійкості інтелектуальної системи автоматичного управління повітряним судном, як складної системи, дозволяє оцінити на скільки реальний процес функціонування системи буде відповідати розрахунковому, тому що завжди при розрахунках користуються наближеними моделями, і цілий ряд факторів не враховується.

Варто зазначити, що не всяка система може мати властивість функціональної стійкості, а саме, якщо

© В. В. Арделян, Д. М. Обідін, А. П. Мусієнко, 2016

немає надмірності, то нема чим і управляти при парированні наслідків позаштатних ситуацій. Тому, в такому випадку, навіть потенційно неможливо забезпечити цю властивість. На відміну від цього база знань інтелектуальної САУ польотом повітряного судна має надмірність всіх видів, а саме – функціональну, часову, інформаційну та структурну.

Отже, у сучасних умовах особливо важливим є забезпечення властивості функціональної стійкості процесів навігації та управління рухом повітряного судна. Це складне завдання доцільно поділити на ряд часткових завдань, одним з яких є розробка методики накопичення діагностичної інформації при виконанні діагностування в розподілених базах знань пілотажно-навігаційного комплексу повітряного судна.

**Ціль та завдання дослідження.** В усіх існуючих методах діагностування наголошується, що одним з важливих і складних завдань при організації діагностування є визначення модуля розподіленої бази знань, на який слід покласти функції виконання алгоритму дешифрування синдрому.

Метою роботи є розробка методики накопичення діагностичної інформації при виконанні діагностування в розподілених базах знань пілотажно-навігаційного комплексу повітряного судна. Зокрема, визначення коректного модуля, який виконуватиме алгоритм діагностування та буде передавати інформацію про семантичний стан розподіленої бази знань до системи управління.

Для досягнення сформульованої мети були поставлені наступні завдання:

1. Визначити умови яким повинна відповідати розподілена база знань для можливості її діагностування.

2. Визначити оптимальну систему оцінювання в процесі виконання елементарних перевірок, яка відповідає всім ситуаціям відмов в реальних розподілених базах знань.

3. Розробити методику накопичення діагностичної інформації при виконанні діагностування в розподілених базах знань пілотажно-навігаційного комплексу повітряного судна.

**Розробка методики накопичення діагностичної інформації при виконанні діагностування в розподілених базах знань пілотажно-навігаційного комплексу повітряного судна.** Відомо, що основною підсистемою будь-якої інтелектуальної системи є база знань, яка постійно поширюється за рахунок накопичення досвіду за час експлуатації [8]. Але знання мають суб'єктивний характер, а тому потребують оцінки їх достовірності для подальшого раціонального використання в алгоритмах прийняття рішення. Проблема так званої діагностики розподіленої бази знань та використання інформації про достовірність знань при формуванні управління, яке парире наслідки нештатних ситуацій потребує детального вивчення, цьому питанню й присвячена дана робота.

При організації процедури діагностування одним з важливих завдань є завдання визначення коректного модуля, на який слід покласти функції аналізу структури і синдрому, тобто виконання алгоритму діагностування.

При динамічному діагностуванні це завдання вирішується завдяки способу умовної передачі результатів елементарних перевірок. Основним завданням даного способу є накопичення діагностичної інформації в пам'яті коректних модулів розподіленої бази знань (РБЗ). Накопичення виконується завдяки тому, що результати перевірок пересилаються в модулі РБЗ, перевірені з результатом "0".

У разі одиничного результату перевірки ( $r=1$ ), діагностична інформація не пересилається, а запам'ятовується в пам'яті перевіряючого модуля. Завдяки даній процедурі, коректні модулі швидше накопичать достатній об'єм інформації для діагностування. Це необхідно для того, щоб алгоритм діагностування виконувався тільки коректним модулем, оскільки при виконанні алгоритму некоректним модулем можливе неправильне визначення семантичного стану РБЗ.

Для отримання результату діагностування з високою достовірністю необхідно, щоб інформація про результати перевірок накопичувалася тільки в коректних модулях. У цьому плані правомірним є доведення наступної теореми.

**Теорема.** При пересилці діагностичної інформації згідно способу умовної передачі результатів елементарних перевірок для будь-якої поточної структури справедливо, що один із коректних модулів накопичить більше результатів перевірок, ніж некоректні модулі.

*Доведення.* Припустимо, що в який-небудь довільний момент часу в розподіленій семантичній системі, що складається з  $N$  модулів, відмовили  $N_2$  модулів. До цього моменту часу залишилися коректними  $N_1$  модулів, де  $N_1 = N - N_2$ . У системі виконується процедура діагностування, в результаті якої виконане  $M$  перевірок.

Розіб'ємо множина всіх модулів РБЗ  $\{N\}$  на дві підмножини (рис. 1):  $\{N_1\}$  – підмножина коректних модулів,  $N_1 = |\{N_1\}|$ ;  $\{N_2\}$  – підмножина некоректних модулів,  $N_2 = |\{N_2\}|$ . На рис. 1 позначено:  $M_1$  – кількість ребер, що виходять з підмножини  $\{N_1\}$  і входять в  $\{N_2\}$ :  $e_{ij} = \{v_i, v_j\} \in \{M_1\}$ ,  $v_i \in \{N_1\}$ ,  $v_j \in \{N_2\}$ ;

$M_2$  – кількість ребер між модулями підмножини  $\{N_1\}$ :  $E_{ik} = \{v_i, v_k\} \in \{M_2\}$ ,  $v_i \in \{N_1\}$ ,  $v_k \in \{N_1\}$ ;

$M_3$  – кількість ребер, що виходять з підмножини  $\{N_2\}$  і входять в  $\{N_1\}$ :  $e_{ji} = \{v_j, v_i\} \in \{M_3\}$ ,  $v_i \in \{N_1\}$ ,  $v_j \in \{N_2\}$ ;

$M_4$  – кількість ребер, між модулями підмножини  $\{N_2\}$ :  $E_{jl} = \{v_j, v_l\} \in \{M_4\}$ ,  $v_l \in \{N_2\}$ ,  $v_j \in \{N_2\}$ .

Оскільки у діагностичному графі всього  $M$  ребер, то очевидно, що підмножини ребер  $\{M_i\}$ ,  $i = 1, 4$  є непересічними:

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 \quad (1)$$

Припустимо, що перевірки рівномірно розподілені між модулями РБЗ.

Тоді:  $m = \frac{M}{N}$ , де  $m$  – середня кількість перевірок, виконаних одним модулем, або середня кількість витікаючих ребер однієї вершини діагностичного графа.

Припустимо, що всі  $m$  перевірок, які виконав один з модулів, рівномірно розподілені між рештою  $N-1$  модулів. Тоді, коректний модуль  $v_i, v_i \in \{N_1\}$  також виконав  $m$  перевірок, причому з них  $m \cdot (N_1-1)/(N-$

1) перевірів коректних модулів, а  $m \cdot N_2/(N-1)$  – некоректних. Аналогічно,  $v_j$ , де  $v_j \in \{N_2\}$ , перевірів  $m \cdot N_1/(N-1)$  коректних і  $m \cdot (N_2-1)/(N-1)$  некоректних модулів.

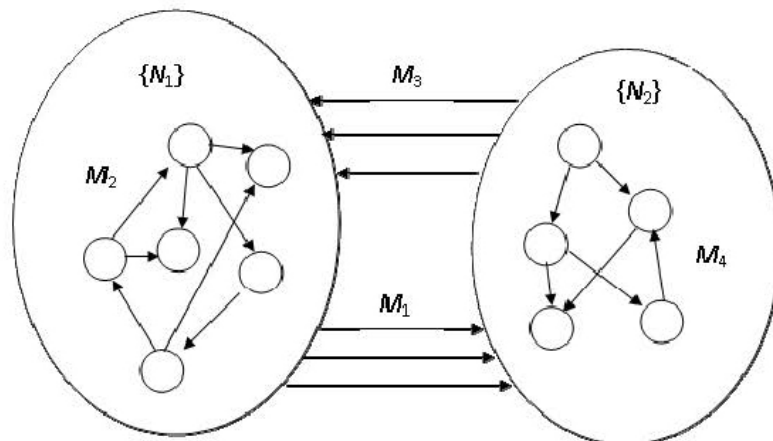


Рис. 1 – Розбиття діагностичного графа на дві підмножини модулів:  $\{N_1\}$  – коректних,  $\{N_2\}$  – некоректних

Виходячи з цього,  $M_i$  мають наступні значення:

$$\begin{cases} M_1 = mN_1 \frac{N_2}{N-1}; \\ M_2 = mN_1 \frac{N_1-1}{N-1}; \\ M_3 = mN_2 \frac{N_1}{N-1}; \\ M_4 = mN_2 \frac{N_2-1}{N-1}. \end{cases} \quad (2)$$

Розглянемо детальніше один із коректних модулів  $v_i \in \{N_1\}$ . Цей модуль накопичить в середньому  $l_i$  результатів перевірок:

$$l_i = l_1 + l_2 + l_3, \quad (3)$$

де  $l_1$  – кількість перевірок, які виконав модуль  $v_i$ ;  $l_2$  – кількість результатів перевірок, які отримав  $v_i$  відповідно до способу умовної передачі після того, як його перевірила решта  $N_1-1$  коректних модулів з результатом "0";  $l_3$  – кількість результатів перевірок, які отримав  $v_i$  від тих, що перевірили його з результатом "0" некоректних модулів  $v_j \in \{N_2\}$ .

Виходячи з цього:

$$l_1 = m; \quad l_2 = \frac{M_2}{N_1}; \quad l_3 = \frac{1}{2} \frac{M_3}{N_1}. \quad (4)$$

У виразі  $l_3$  дріб  $1/2$  виражає ймовірність появи нульового результату, якщо перевірка виконана некоректним модулем. Підставивши (2) і (4) в (3), отримаємо кількість результатів, які накопичить коректний модуль  $v_i$ :

$$\begin{aligned} l_i &= m + m \frac{N_1-1}{N-1} + m \frac{N_2}{2(N-1)} = \\ &= \frac{m}{2(N-1)} (3N + N_1 - 4). \end{aligned} \quad (5)$$

Тепер розглянемо один з некоректних  $v_j \in \{N_2\}$ . Цей модуль перевірів  $l_4 = m$  інших модулів, а також отримав  $l_5$  результатів від інших некоректних модулів, що перевірили його з результатом "0".

Оскільки коректні модулі перевірили  $v_j$  з результатом "1" (за системою оцінювання Препарата [9]), то, згідно способу умовної передачі, вони не перешлють йому результати своїх перевірок.

Виходячи з цього:

$$l_j = l_4 + l_5, \quad (6)$$

$$\text{де } l_5 = \frac{1}{2} m \frac{N_2-1}{(N-1)}.$$

Таким чином, некоректний модуль  $v_j$  накопичить наступну кількість результатів перевірок:

$$l_j = m + m \frac{N_2-1}{2(N-1)} = \frac{m}{2(N-1)} (2N + N_1 - 3). \quad (7)$$

Тепер для доведення теореми необхідно довести, що  $l_i > l_j$  або  $\Delta L = l_i - l_j > 0$ . Вираз для  $\Delta L$  запишеться таким чином:

$$\Delta L = l_i - l_j = \frac{m}{2(N-1)} (N-1 + N_1 - N_2). \quad (8)$$

З урахуванням того, що  $N = N_1 + N_2$ , отримаємо:

$$\Delta L = \frac{m}{2(N-1)} (2N_1 - 1). \quad (9)$$

Аналіз виразу (9) показує, що  $\Delta L$  може бути менше нуля тільки тоді, коли  $N_1 = 0$ . У випадку, якщо в системі є хоч би один коректний модуль, то він накопичить діагностичної інформації більше, ніж некоректні модулі. Теорема доведена.

Слід зазначити, що при доведенні теореми використовувалися наступні допущення: рівномірність розподілу перевірок між модулями; рівномірний закон розподілу результатів перевірок ( $r_{ij}=0\sqrt{1}$ ), що виконуються некоректними модулями.

Особливий інтерес представляє окремий випадок, коли через нерівномірність закону розподілу результатів перевірок, що виконуються некоректними модулями, коректні модулі отримують інформації менше, а некоректні – більше. Це може відбутися в наступних випадках:

а) набір перевірок  $\{M_3\}$  (див. рис. 1) буде виконаний з результатом "1", і некоректні модулі не пересилатимуть в коректні результати перевірок. Ця подія може відбутися з ймовірністю  $p_1 = 0,5^{M_3}$ ;

б) набір перевірок  $\{M_4\}$  виконаний з результатом "0", що може трапитися з ймовірністю  $p_2 = 0,5^{M_4}$ .

Внаслідок цього, некоректні модулі накопичать результатів більше, ніж в першому випадку.

З урахуванням описаних подій можна відмітити, що  $l_3$  у виразі (3) буде дорівнювати 0, а  $l_5$  у виразі (6) подвоїться.

Таким чином:

$$l'_i = m + m \frac{N_1 - 1}{N - 1}; \quad l'_j = m + m \frac{N_2 - 1}{N - 1}, \quad (10)$$

де  $l'_i$  – кількість результатів перевірок, які накопичаються в одному із коректних модулів  $v_i \in \{N_1\}$ ;  $l'_j$  – кількість результатів перевірок, які накопичаються в одному з некоректних модулів  $v_j \in \{N_2\}$ .

Порівнюючи різницю, як в першому варіанті, отримаємо:

$$\Delta L' = l'_i - l'_j = \frac{m}{N - 1} (N_1 - N_2). \quad (11)$$

Таким чином, величина  $\Delta L'$  буде від'ємна (коректні модулі накопичать інформації менше ніж некоректні) тільки у тому випадку, коли  $N_2 > N_1$ . Ця подія може відбутися з ймовірністю  $p_3$ , яка визначається як ймовірність відмови в системі більше половини модулів.

Припустимо, що ймовірність коректного стану  $p$  однакова для кожного модуля. Тоді, використовуючи часткову теорему про повторення дослідів [10], отримаємо:

$$p_3 = \sum_{N_2 = \left\lceil \frac{N+1}{2} \right\rceil}^N C_N^{N_2} (1-p)^{N_2} p^{N-N_2}. \quad (12)$$

Таким чином, на підставі вищевказаних досліджень можна зробити висновок, що некоректні модулі можуть накопичити інформації більше, ( $\Delta L < 0$ ) тільки при одночасній появі подій:

1) некоректні модулі перевіряють коректні з результатом "1";

2) некоректні модулі перевіряють один одного з результатом "0";

3) у системі, що складається з  $N$  модулів, більше некоректних модулів, ніж коректних. Ймовірність появи цих подій відповідно дорівнює  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ , а ймовірність їх одночасної появи рівна добутку [10]:

$$p' = p \{ \Delta L' < 0 \} = p_1 p_2 p_3 = 0,5^{(M_3+M_4)} \times \sum_{N_2 = \left\lceil \frac{N+1}{2} \right\rceil}^N C_N^{N_2} (1-p)^{N_2} p^{N-N_2}. \quad (13)$$

Слід зазначити, що ймовірність  $p'$  є дуже малою величиною. Тому можна стверджувати, що при виконанні процедури діагностування у будь-якому випадку коректні модулі накопичать більше результатів перевірок, чим некоректні. Для підтвердження даного вислову розглянемо наступний приклад.

У системі, що складається з  $N=8$  модулів, виконано  $M=20$  перевірок. З урахуванням  $N_1=3$ ,  $N_2=5$ ,  $p=0,8$ , ймовірність  $p'$  за виразом (13) буде дорівнювати:

$$p' = p \{ \Delta L' < 0 \} = 0,5^{(5,35+7,14)} \times \sum_{i=5}^8 C_8^i (1-p)^i p^{8-i} = 1,8 \cdot 10^{-6}.$$

З наведеного прикладу видно, що у некоректних модулів може бути більше результатів перевірок, ніж у коректних, проте ймовірність цієї події настільки мала, що можна вважати цю подію неможливою.

**Висновки.** В результаті проведених досліджень встановлено:

1. Застосування діагностування розподіленої бази знань припускає наявність наступних умов: база знань може бути поділена на модулі, які повинні бути зв'язані між собою і здатні перевіряти один одного; кожен модуль повинен мати вільні обчислювальні ресурси для виконання перевірок і програмну надмірність для зберігання тестів і їх результатів.

2. В процесі виконання елементарних перевірок доцільно використовувати систему оцінювання Препарата, оскільки вона найповніше відповідає всім ситуаціям відмов в реальних розподілених базах знань.

3. При виконанні елементарних перевірок доцільно здійснювати накопичення діагностичної інформації відповідно до способу умовної передачі результатів перевірок. При такому способі один із коректних модулів раніше інших накопичить достатній обсяг діагностичної інформації і буде виконувати алгоритм діагностування.

#### Список літератури:

1. *Машков, О. А.* Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам [Текст] / *О. А. Машков, Л. М. Артюшин.* – Киев: КВВАИУ. – 1991. – 88 с.
2. *Машков, В. А.* Контроль и диагностирование цифровых вычислительных устройств [Текст] / *В. А. Машков.* – Киев: КВВАИУ. – 1991. – 84 с.
3. *Mashkov, V.* Applying Petri Nets to Modeling of Many-Core Processor Self-Testing when Tests are Performed Randomly [Text] / *V. Mashkov, J. Barilla, P. Simr* // Journal of Electronic Testing. – 2013. – Vol. 29, № 1. – P. 25–34. doi: [10.1007/s10836-012-5346-8](https://doi.org/10.1007/s10836-012-5346-8)
4. *Барабаш, О. В.* Функціональна стійкість – властивість складних технічних систем [Текст]: зб. наук. пр. / *О. В. Барабаш, Ю. В. Кравченко* // Збірник наукових праць НАОУ. – 2002. – № 40. – С. 225–229.

5. Mashkov, V. A. Self-Testing of Multimodule Systems Based on Optimal Check-Connection Structures [Text] / V. A. Mashkov, O. V. Barabash // Engineering Simulation. – 1996. – Vol. 13. – P. 479–492.
6. Кравченко, Ю. В. Визначення проблематики теорії функціональної стійкості щодо застосування в комп'ютерних системах [Текст] / Ю. В. Кравченко, С. В. Нікіфоров // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – № 1. – С. 12–18.
7. Савченко, В. А. Обоснование показателя функциональной устойчивости пространственной структуры для многопозиционных радионавигационных систем [Текст]: зб. наук. пр. / А. В. Савченко // Збірник наукових праць ХВУ. – 2004. – № 5 (52). – С. 41–42.
8. Pashynska, N. A decision tree in a classification of fire hazard factors [Text] / N. Pashynska, V. Snytyuk, V. Putrenko, A. Musienko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 5/10 (83). – P. 32–37. doi: [10.15587/1729-4061.2016.79868](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79868)
9. Preparata, F. P. On the connection assignment problem at diagnosable systems [Text] / F. P. Preparata, G. Metz, R. T. Chien // IEEE Transactions on Electronic Computers. – 1967. – № EC-16 (6). – P. 848–854. doi: [10.1109/pgec.1967.264748](https://doi.org/10.1109/pgec.1967.264748)
10. Вентцель, Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология [Текст] / Е. С. Вентцель. – Москва: Наука, 1988. – 208 с.
2. Mashkov, V. A. (1991). Monitoring and diagnosis of digital computing devices. Kiev: KVVAUY, 84.
3. Mashkov, V., Barilla, J., Simr, P. (2013). Applying Petri Nets to Modeling of Many-Core Processor Self-Testing when Tests are Performed Randomly. Journal of Electronic Testing, 29 (1), 25–34. doi: [10.1007/s10836-012-5346-8](https://doi.org/10.1007/s10836-012-5346-8)
4. Barabash, O. V., Kravchenko, Yu. V. (2002). Funktsionalna stiykist – vlastivist tehnicnih folding systems. Zbirnyk naukovykh prats NAOU, 40, 225–229.
5. Mashkov, V. A., Barabash, O. V. (1996). Self-Testing of Multimodule Systems Based on Optimal Check-Connection Structures. Engineering Simulation, 13, 479–492.
6. Kravchenko, Yu. V., Nikiforov, S. V. (2014). Determination theory perspective on the application of functional stability in computer systems. Telecommunication and information technology, 1, 12–18.
7. Savchenko, V. A. (2004). Justification functional stability index of spatial structure for multi-position navigation system. Zbirnyk naukovykh prats KhVU, 5 (52), 41–42.
8. Pashynska, N., Snytyuk, V., Putrenko, V., Musienko, A. (2016). A decision tree in a classification of fire hazard factors. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(10(83)), 32–37. doi: [10.15587/1729-4061.2016.79868](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79868)
9. Preparata, F. P., Metz, G., Chien, R. T. (1967). On the Connection Assignment Problem of Diagnosable Systems. IEEE Transactions on Electronic Computers, EC-16 (6), 848–854. doi: [10.1109/pgec.1967.264748](https://doi.org/10.1109/pgec.1967.264748)
10. Wentzel, E. S. (2010) Operations research: objectives, principles, methodology. Moscow: Science, 208.

**Bibliography (transliterated):**

1. Mashkov, O. A., Artiushyn, L. M. (1991). Optimization of digital automatic systems, fault tolerance. Kiev: KVVAUY, 8.

*Поступила (received) 18.02.2016*

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Методика накоплення діагностичної інформації при виконанні діагностування в розподілених базах знань пілотажно-навігаційного комплексу повітряного судна/ В. В. Арделян, Д. М. Обідін, А. П. Мусієнко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 7(1179). – С. 61–66.– Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Методика накоплення діагностической информации при выполнении диагностики в распределенных базах знаний пилотажно-навигационного комплекса воздушного судна/ В. В. Арделян, Д. Н. Обидин, А. П. Мусиенко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 7(1179). – С. 61–66.– Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Technique accumulation of diagnostic information when performing diagnostics in distributed knowledge bases flight and navigation system of the aircraft/ V.V. Ardelyan, D.N. Obidin, A.P. Musienko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – № 7 (1179).– P.61 –66. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Арделян Вікторія Віталіївна** – аспірант, Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету, вул. Добровольського, 1, м. Кропивницький, Україна, 25005; e-mail: [viktorija1801-92@mail.ru](mailto:viktorija1801-92@mail.ru)

**Обідін Дмитро Миколайович** – доктор технічних наук, професор, Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету, заступник начальника Кіровоградської льотної академії Національного авіаційного університету з навчальної та наукової роботи; вул. Добровольського, 1, м. Кропивницький, Україна, 25005; e-mail: [d.obidin@mail.ru](mailto:d.obidin@mail.ru)

**Мусієнко Андрій Петрович** – кандидат фізико-математичних наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, науковий співробітник факультету інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка; вул. Ванди Василевської, 24, м. Київ, Україна, 02000; e-mail: [musienko-andrey@gmail.com](mailto:musienko-andrey@gmail.com)

**Арделян Вікторія Віталіївна** – аспірант, Кіровоградская летная академия Национального авиационного университета, ул. Добровольского, 1, г. Кропивницкий, Украина, 25005; e-mail: [viktorija1801-92@mail.ru](mailto:viktorija1801-92@mail.ru)

**Обидин Дмитрий Николаевич** – доктор технических наук, профессор, Кіровоградская летная академия Национального авиационного университета, заместитель начальника Кіровоградской летной академии Национального авиационного университета по учебной и научной работе; ул. Добровольского, 1, г. Кропивницкий, Украина, 25005; e-mail: [d.obidin@mail.ru](mailto:d.obidin@mail.ru)

**Мусиенко Андрей Петрович** – кандидат физико-математических наук, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, научный сотрудник факультета информационных технологий Киевского нацио-

нального університета імені Тараса Шевченка; ул. Ванды Василевской, 24, г. Киев, Украина, 02000; e-mail: [mysienkoandrey@gmail.com](mailto:mysienkoandrey@gmail.com)

**Ardelyan Victoria** – graduate student, Kirovograd Flight Academy of National Aviation University, st. Dobrowolski 1, Kropyvnytskyi, Ukraine, 25005; e-mail: [viktoria1801-92@mail.ru](mailto:viktoria1801-92@mail.ru)

**Obidin Dmitry** – doctor of technical sciences, professor, Kirovograd Flight Academy of National Aviation University, the deputy head of the Kirovograd Flight Academy of National Aviation University on educational and scientific work; st. Dobrowolski 1, Kropyvnytskyi, Ukraine, 25005; e-mail: [d.obidin@mail.ru](mailto:d.obidin@mail.ru)

**Musienko Andrii** – candidate of Physics and Mathematics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, researcher at the Faculty of Information Technologies of Kiev National Taras Shevchenko University; st. Wanda Wasilewska 24, Kiev, Ukraine, 02000; e-mail: [mysienkoandrey@gmail.com](mailto:mysienkoandrey@gmail.com)

УДК 621.3.082.55, 535.568, 531.713.8

**О. О. ОЛІЙНИК, М. Ф. ЖОВНІР, Б. А. ЦИГАНОК**

### РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАНЬ ДВОПРОМЕНЕЗАЛОМЛЕННЯ У ЗВУКОПРОВОДАХ ПАХ-ПРИСТРОЇВ

В статті приведені результати дослідження внутрішніх механічних напружень в п'єзокристалі  $LiNbO_3$  YZ-зрізу, а також приповерхневих механічних напружень, які виникають у звукопроводах після напылення зустрічноштирових перетворювачів (ЗШП) при виготовленні пристроїв на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ). Вимірний розподіл величини двоприменезаломлення з використанням методу модуляційної поляриметрії та розрахована на його основі відносна анізотропія механічних напружень у звукопроводі. Результати досліджень фотопружних властивостей звукопроводів демонструють високу чутливість модуляційно-поляризаційного методу вимірювання для контролю якості п'єзокристалів та виявлення залишкових приповерхневих механічних напружень після напылення ЗШП.

**Ключові слова:** механічні напруження, фотопружність, звукопровід, ПАХ-пристрої, модуляційна поляриметрія, ніобат літію, лінія затримки.

В статье приведены результаты исследования внутренних механических напряжений в пьезокристаллах  $LiNbO_3$  YZ-срезы, а также приповерхностных механических напряжений, возникающих в звукопроводе после напыления встречноштировых преобразователей (ВШП) при изготовлении устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Измерено распределение величины двулучепреломления с использованием метода модуляционной поляриметрии и рассчитана на его основе относительная анизотропия механических напряжений в звукопроводе. Результаты исследований фотоупругих свойств звукопровода демонстрируют высокую чувствительность модуляционно-поляризационного метода измерения для контроля качества пьезокристаллов и выявления остаточных приповерхностных механических напряжений после напыления ВШП.

**Ключевые слова:** механические напряжения, фотоупругость, звукопровод, ПАВ-устройства, модуляционная поляриметрия, ниобат лития, линия задержки.

The article presents the study results of internal mechanical stresses in piezoelectric  $LiNbO_3$  crystals of YZ-cut, as well as near-surface stress, appeared in sound conductor after deposition of interdigital transducers (IDT) on the surface acoustic wave (SAW) devices during manufacturing. Birefringence distribution was measured by modulation polarimetry method. Mechanical stresses in the sound conductor were calculated on the basis of relative optical anisotropy. Research results of photoelastic properties show a high sensitivity of modulation-polarization measurement method for quality control of piezocrystals and to identify near-surface residual stress after IDT deposition.

**Keywords:** mechanical stress, photoelasticity, sound conductor, SAW-devices, modulation polarimetry, lithium niobate, delay circuit.

**Вступ.** При вирощуванні монокристалів ніобату літію в ньому виникають дефекти кристалічної структури, пов'язані з хімічним складом розчинів, параметрами навколишнього середовища тощо. Зокрема, при розділенні монокристалу  $LiNbO_3$  на пластини YZ-зрізу виникають поверхневі механічні напруження розтягу та стиснення, що викликані порушенням шаром на поверхнях звукопроводу. Наступне шліфування, полірування та відпалювання вже готових звукопроводів може значно зменшити величину поверхневих механічних напружень. Проблема контролю якості звукопроводів вирішують багатьма способами: поляризаційними, фотоакустичними, ультразвуковими, рентгенівськими, але для досягнення достатньої чутливості згадані методи можуть виявитись або занадто складними у застосуванні або недостатньо чутливими.

На звукопроводах з  $LiNbO_3$  виготовляються сучасні прилади акустоелектроніки, зокрема, сенсори на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ), які активно конкурують у сфері вимірювання фізичних величин. Застосування ПАХ обумовлене можливістю отриман-

ня хвильових процесів з малою довжиною хвилі, що забезпечує, при використанні частотного або фазового методів вимірювання, велику чутливість і точність перетворення інформації в широкому динамічному діапазоні. Сенсори на ПАХ відносяться до акустоелектронних компонентів, що використовують п'єзоелектричні пластини, на які нанесено систему зустрічно-штирових перетворювачів (ЗШП). Зазвичай, в сенсорах на ПАХ використовується чутливість спеціальних зрізів п'єзоелектричних матеріалів до дестабілізуючих факторів: температури, вологості, механічних напружень, деформації, тощо. Недоліком пристроїв даного типу є низька надійність внаслідок можливого руйнування мембрани через крихкість п'єзоелектричного звукопроводу при перевантаженнях та складність виготовлення мембрани у звукопроводі [1]. Актуальним залишається розробка методів неруйнівного контролю механічних напружень та параметрів деформації в мембранах, виготовлених з п'єзоелектричних матеріалів.

© О. О. Олійник, М. Ф. Жовнір, Б. А. Циганок, 2016