

Повышение уровня обслуживания систем управления запасами путем интеграции процессов транспортной логистики/ Алешинский Е. С., Мещеряков В. В., Бондаренко А.П. //Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – № 44 (1266).– P.47–52. – Bibliogr.:15. – ISSN 2079-5459

Increasing service level of reserve management systems by integration of transport logistics processes/ Alechinsky E., Meshcheryakov V., Bondarenko A. //Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – № 44 (1266).– P.47–52. – Bibliogr.:15. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Альошинский Евгений Семенович – доктор технических наук, профессор, Кафедра транспортных систем и логистики, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, г. Харьков, Украина, 61001; e-mail: aes-upp@mail.ru.

Мещеряков Василий Владимирович – аспирант, Кафедра транспортных систем и логистики, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, г. Харьков, Украина, 61001; e-mail: vasyan98@ukr.net.

Бондаренко Антон Павлович – оператор сортировочной горки станции Основа, Харьковская дирекция железнодорожных перевозок, улица Евгения Котляра, 7, г. Харьков, Украина, 61052;

Альошинський Євген Семенович – Доктор технічних наук, професор, Кафедра транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7 м. Харків, Україна, 61001; e-mail: aes-upp@mail.ru.

Мещеряков Василь Володимирович – Аспірант, Кафедра транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, м. Харків, Україна, 61001

Бондаренко Антон Павлович – оператор сортувальної гірки станції Основа, Харківська дирекція залізничних перевезень, вулиця Євгена Котляра, 7, м. Харків, Україна, 61052; e-mail: towa921@gmail.com

Alechinsky Evgeny – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Transport System and Logistic, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach sq., Kharkiv, Ukraine, 61001; e-mail: aes-upp@mail.ru.

Mescheryakov Vasyly – Postgraduate Student, Department of Transport System and Logistic, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach sq., Kharkiv, Ukraine, 61001; e-mail: vasyan98@ukr.net.

Bondarenko Anton – Operator sorting hill station Osnova, Kharkov Railway Transportation Directorate, Street Eugenia Kotlyara, 7, Kharkov, Ukraine, 61052; e-mail: towa921@gmail.com

УДК 004.942:004.021

О. Л. СТАНОВСЬКИЙ, Ю. М. ХОМЯК, А. В. ТОРОПЕНКО, Є. О. НАУМЕНКО, О. І. ДАДЕРКО

УПРАВЛІННЯ НАПРУЖЕНІСТЮ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Показано, що рівнонапруженість систем, як стан, що забезпечує мінімальну вартість останніх, не може бути досягнений при звичайному проектуванні, оскільки внутрішні та зовнішні умови навантаження таких об'єктів цьому заважають. Розглянуто проблему створення смарт-систем, які за допомогою штучного інтелекту автоматично реагують на умови експлуатації та підлаштовуються під них, повертаючи при необхідності втрачену рівнонапруженість, а отже зберігають свою експлуатаційну надійність без нарощування зайвих витрат.

Ключові слова: смарт-системи, рівнонапруженість, мінімальна вартість, експлуатаційна надійність, штучний інтелект.

Показано, что равнонапряженность систем, как состояние, обеспечивающее минимальную стоимость последних, не может быть достигнуто при обычном проектировании, поскольку внутренние и внешние условия нагружения таких объектов этому препятствуют. Рассмотрена проблема создания смарт-систем, которые с помощью искусственного интеллекта автоматически реагируют на условия эксплуатации и подстраиваются под них, возвращая при необходимости утраченную равнонапряженность, а следовательно сохраняют свою эксплуатационную надежность без наращивания лишних затрат.

Ключевые слова: смарт-системы, равнонапряженность, минимальная стоимость, эксплуатационная надежность, искусственный интеллект.

It is shown that the equilibrium of systems, as a state, providing the minimum cost of the latter, cannot be achieved in conventional design, since the internal and external conditions of such objects loading do not prevent this.

A new notion of "uneven tension" as a numerical characteristic of the any complex object uneven resistance of the external environment influence was introduced, methods of its calculation were proposed, and the theorem on the coincidence of the minimum of uneven stress with the minimum cost of the object in the manufacture and operation.

The system "EQUENS" (equal tension support) for artificial (with the help of expert decisions) or unauthorized (with the help of an intellectual attractor) of adaptation of the object's characteristics to turbulent external loading during its operation, which restores the object state, returning it as much as possible to equilibrium of individual elements, is proposed.

The problem of creation of smart systems, which with the help of artificial intelligence, automatically responds to the conditions of operation and adjusts to them, considering the lost voltage equilibrium if necessary, and therefore maintain their operational reliability without increasing the excess costs.

Keywords: smart systems, even tension, minimal cost, operational reliability, artificial intelligence.

© О. Л. Становський, Ю. М. Хомяк, А. В. Торопенко, Є. О. Науменко, О. І. Дадерко. 2017

Вступ. Управління напруженістю елементів складних систем починається ще на етапі їхнього проектування і здійснюється в двох напрямках. По-перше, необхідно забезпечити такий стан елементів під час експлуатації системи, при якому в жодному з них напруженість не вийде за границю припустимих значень, – це проблема живучості системи в цілому. По-друге, необхідно забезпечити рівнонапруженість усіх елементів, і це вже, скоріше, техніко-економічна проблема.

Рівнонапруженість елементів систем – мета, до якої прагнуть проектувальники при створенні нових та корегуванні існуючих складних систем (механічних, електричних, комп'ютерних, тощо). Адже саме рівнонапруженість надає можливості зменшити без втрат працездатності витрати на систему в цілому: масу механічних конструкцій, потужність гідравлічних машин та апаратів, вартість компонентів комп'ютерних мереж, тощо. Відомо, що напруженість елементів систем «в роботі» є проявом двох основних чинників: внутрішньої будови та зовнішнього навантаження системи. Але, якщо внутрішня будова повністю «в руках» розробника, то зовнішні впливи на неї, як правило, неможливо передбачити повністю і заздалегідь. В цих умовах сам термін «рівнонапруженість» як характеристика системи втрачає сенс, – при одних навантаженнях деякий її елемент може бути рівнонапруженим відносно до будь-якого іншого, а при інших – вельми далеким від такого стану.

Рівнонапруженість систем на стадії завершення її проектування ще й стала характеристика, і взагалі невідомо, що залишиться від цієї рівнонапруженості, коли на перший план серед збудованих чинників вийде час. Динамічна система може лише наблизитися до рівнонапруженості, ніколи її не досягаючи.

Якщо до цих міркувань додати такі стохастичні фактори, як технологічні похибки виготовлення, нерівномірність (анізотропність) матеріалу деталей або розкид властивостей готових вузлів, тощо, то стає очевидним, що явище рівнонапруженості взагалі недосяжне при будь-якому, навіть отриманому за допомогою САПР, проекті. Таким чином, пошук методів та моделей, які дозволять якомога ближче наблизитися до стану рівнонапруженості стає надзвичайно актуальним.

Для часткового розв'язання цієї проблеми в останній час з'явилися, наприклад, елементи машин, які автоматично змінюють своє розташування у просторі під впливом турбулентного зовнішнього навантаження. Але ці пристрої механічні, і область їхнього впливу на ситуацію в цілому дуже обмежена. Значно більш перспективними виглядають інтелектуальні комп'ютерні пристрої, – «розумні» системи з підтримкою технології обміну даними між машиною та середовищем, в якому остання працює, – так званий штучний інтелект.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Досягнення стану елементів систем, максимально наближеного до рівнонапруженості, може здійснюватися трьома шляхами:

– оптимізацією конструкції системи (конфігурації, архітектури, розмірів, властивостей елементів, ма-

теріалів, тощо), забезпечуваною під час проектування [1–6];

– оптимізацією навантаження (місць прикладення, граничні значення кількості вантажів або запитів, обмеження руху, тощо), забезпечуваною під час планування (тобто, до початку) експлуатації [7–11];

– адаптацією під зовнішнє навантаження (зміни архітектури, просторової орієнтації, тощо), здійснюваною під час експлуатації [12–16].

Перший шлях застосовний в основному тоді, коли система статична: ані конструкції вузлів, ані навантаження на них суттєво не змінюються під час експлуатації машини або мережі, як це впливає з робіт [1, 3]. Прикладом таких об'єктів в механіці є судини, які працюють під тиском. Якщо рівнонапруженість забезпечується на етапі проектування для об'єктів, навантаження яких під час експлуатації може піддаватися значним коливанням (верстати, рухомі машини, системи масового обслуговування, будівельні споруди) [2, 4, 6], перший шлях застосовний лише із наданням об'єктам проектування значного запасу міцності, що нівелює головну перевагу рівнонапруженості – мінімальну вартість.

Другий шлях треба обирати, якщо заздалегідь можна скласти план роботи машини або мережі під навантаженням, і знайти відображення цього плану на їхню конструкцію. До опису таких об'єктів в механіці звертаються в роботах [7–9] (багатопарові матеріали, ресори, тощо), а також при проектуванні корпусів колісної [11] та аеромобільної [10] техніки. Недоліки другого шляху проектування є продовженням недоліків першого: навіть в простих випадках неможливо на етапі проектування точно передбачити навантаження об'єкта під час експлуатації, а отже невідворотними будуть великі запаси міцності та потужності і, як наслідок, зайва вартість.

Третій шлях передбачає створення такого об'єкта, який під час експлуатації автоматично застосує усі передбачені проектом внутрішні можливості для того, щоб запобігти надмірній концентрації напруження в будь-якій своїй частині. Прикладом такої конструкції із механічним «інтелектом» є поворотна підвіска балки моста колісної машини, описана в роботі [15]. Підвіска працює наступним чином. При русі транспортного засобу зусилля від балки моста передаються ресорі. У разі розгону або гальмування на шляху руху транспортного засобу балка від зовнішніх інерційних сил піддається дії моментів, що скручують. При повороті балки в сторону дії цих моментів додаткові напруження, що виникають в ній, зменшуються, що підтримує рівнонапруженість балки.

До адаптаційних методів можна також віднести проектування об'єкта за допомогою його віртуальної моделі, описане в роботах [12, 13], коли на проміжних етапах оптимізації рівнонапруженої конструкції моделі об'єкта виглядають як такі, що в реальному житті неможливі: деталь із матеріалу зі змінними механічними властивостями, одночасне прикладення різних за значенням сил або запитів в одній точці, тощо.

Засоби комп'ютерного інтелекту використовуються для розв'язання більш складних задач адаптації навантаження до конструкції об'єкта (наприклад, при

навантаженні платформи [16], або, навпаки, конструкції до навантаження (шосе – автомобіль) [14]. В перелічених прикладах розв'язується ситуативне завдання проектування деякого конкретного об'єкта із передбачуваними майбутніми умовами експлуатації. Тільки в такому випадку відповідальна особа може піти на ризик створення рівнонапруженого об'єкта. В інших випадках залишається підвищувати коефіцієнти запасу і працювати за підходом «напруження нерівномірні, але найбільше з них знаходиться в межах допуску» і, знову ж таки, як наслідок, підвищувати вартість об'єкта.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є зменшення вартості виготовлення та експлуатації складних систем на етапі їхнього проектування шляхом розробки та впровадження вдосконаленого методу підтримки рівнонапруженості елементів системи, який базується на принципах штучного інтелекту.

Для досягнення цієї мети в роботі були розв'язані наступні задачі:

- обґрунтовано поняття «нерівнонапруженість» в якості числової характеристики опору об'єкта впливу зовнішнього середовища, запропоновано метод його обчислення та доведено теорему про співпадіння мінімуму нерівнонапруженості із мінімумом вартості;

- розроблено систему штучного інтелекту для постійної адаптації характеристик об'єкта до турбулентного зовнішнього навантаження під час його експлуатації, яка відновлює стан об'єкта, максимально повертаючи його до рівнонапруженості окремих елементів.

«Нерівнонапруженість» як числова характеристика опору об'єкта впливу зовнішнього середовища. Якщо розглядати внутрішню напруженість деякого довільного об'єкта в якості опору впливу зовнішнього середовища, як це робиться, наприклад, в механіці, то поняття «нерівнонапруженість» (НРН) можна розповсюдити на будь-яку систему, яка такому впливу опирається [17]. Розглянемо деякий об'єкт оточуючого середовища як систему Ω (рис. 1) і виділимо в ній окремі малі елементи та зв'язки між ними, які дозволяють окреслити границі такого дискретного об'єкта та забезпечити його стан як єдиного цілого.

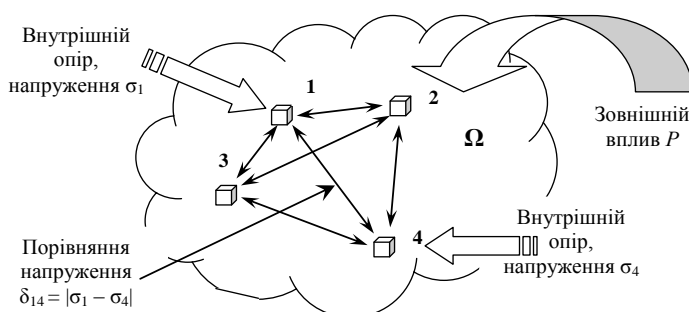


Рис. 1 – Схема до розрахунку НРН довільного об'єкта

Прикладом таких об'єктів можуть служити деякі окремі суцільні машинобудівні деталі (і тоді виділення елементів в них здійснюється умовно) [18] або початково дискретні мережеві конструкції, які розподіляються на елементи та зв'язки між ними природним шляхом.

При традиційному методі моделювання таких об'єктів зв'язками між умовними дискретними елементами завжди служить модель передачі деякого ресурсу (механічного навантаження, електричного струму, гідравлічного потоку, трафіку інформації, тощо). При цьому кожний зв'язок несе знання про вид ресурсу, інтенсивність та напрямок потоку, власні обмеження, тощо.

В нашому методі зв'язками між елементами системи є різниця між напруженістю відповідних елементів – тобто НРН об'єкта в цілому див. рис. 1. У випадку механічного навантаження на систему під «напруженістю» розуміли механічну напруженість в елементі (як правило – неоднорідну), у випадку комп'ютерної мережі мова може йти про навантаженість процесорів відповідних комп'ютерів, тощо.

Розрахунок НРН. Для розрахунку НРН дискретного об'єкта необхідно попарно порівняти напруженості усіх N елементів цього об'єкта, взяти їх по модулю та підсумувати:

$$\text{НРН} = \sum |\sigma_i - \sigma_j|, \quad (1)$$

де i, j – цілі числа; $1 \leq i \leq N$; $1 \leq j \leq N$.

Кількість таких різниць в (1) визначається з теорії комбінаторики:

$$K = N(N - 1). \quad (2)$$

Зрозуміло, що коли об'єкт нерівнонапружений, але при цьому в жодній своїй точці (елементі для дискретного об'єкта) напруження не перевищує максимально припустиме, частину «міцності» недонапружених елементів можна зменшити за рахунок видалення зайвої маси. Звідси використання панелей з отворами, труб замість суцільних прутків, овальних осей замість круглих, тощо.

Доведемо на прикладі механічної системи, що рівнонапруженість у всіх її точках відповідає мінімальному об'єму (масі) цієї системи. Хай при навантаженні вертикальних стрижнів власною вагою та поздовжньою силою P вони піддаються розтягання (рис. 2) або стисканню (рис. 3).

Відомо, що умова рівнонапруженості таких стрижнів виконується, якщо площа їх поперечного перерізу змінюється за законом

$$F(z) = F_0 e^{\frac{\gamma z}{\sigma_0}}, \quad (3)$$

де $F_0 = P / [\sigma_0]$ – мінімальний переріз стрижня в місці прикладення навантаження; γ – питома сила ваги; z – поточна координата; e – основа натуральних логарифмів. Така складна залежність для площ перерізів саме й забезпечує рівнонапруженість.

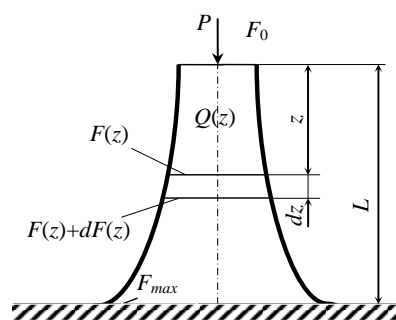


Рис. 2 – Стрижень рівного опору стисканню

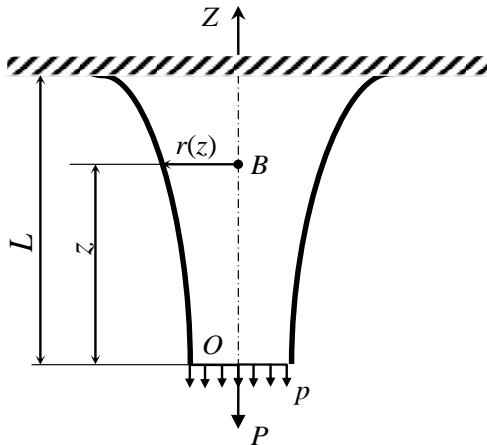


Рис. 3 – Стрижень рівного опору розтягнню

У стрижня рівного опору в кожному поперечному перерізі напруження однакові і дорівнюють допустимим, тобто виконується умова рівнонапруженості:

$$\sigma(z) = [\sigma]. \quad (4)$$

Якщо до вільного кінця стрижня прикладене рівномірно розподілене навантаженням p з рівнодіючою P (див. рис. 3), то площа початкового перетину визначається з умови його рівнонапруженості $p = [\sigma]$ і дорівнює

$$F_0 = P/[\sigma]. \quad (5)$$

Для визначеності будемо вважати, що всі перетини стрижня мають форму кола, тоді їх радіус

$$r(z) = \sqrt{F(z)/\pi}. \quad (6)$$

Сила ваги ділянки стрижня довжиною z дорівнює

$$G(z) = \gamma V(z) = \gamma \int F(z) dz, \quad (7)$$

де $V(z)$ – об'єм цієї ділянки:

$$V(z) = \frac{F_0}{\gamma} [\sigma] \exp\left(\frac{\gamma z}{[\sigma]}\right). \quad (8)$$

Теорему про співвідношення НРН та вартості доведемо методом «від протилежного» на прикладі співвідношення НРН та маси в механічній системі «стрижень» (див. рис. 3).

Теорема. Площа поперечного перерізу розтягнутого (стисненого) стрижня $F(z)$, що забезпечує рівнонапруженість у всіх точках стрижня, визначає одночасно й мінімальний об'єм (масу) цього стрижня.

Доведення. Припустимо, що можливе інше рішення цього завдання – існує ще один розподіл площі поперечних перерізів

$$F^*(z) = F(z) - f(z), \quad (9)$$

при якому також забезпечується рівнонапруженість при меншому об'ємі стрижня

$$V^*(L) < V(L). \quad (10)$$

Додаткова функція $f(z)$, яка визначає новий розподіл площ перетинів (9) повинна бути інтегрованою в усьому проміжку $[0, L]$ і набувати значень

$f_0 \leq f(z) \leq f_1$. Тоді відповідно до теореми про середнє значення:

$$\int_0^L f(z) dz = \mu L, \quad (11)$$

де

$$f_0 \leq \mu \leq f_1. \quad (12)$$

При прийнятому розподілі площ перетинів (9) сила ваги ділянки довільної довжини буде $G^*(z) = \gamma \left(\int F(z) dz - \int f(z) dz \right)$, а напруження в поперечних перетинах для забезпечення рівномірності повинні задовольняти умові (4), тобто:

$$\sigma(z) = \frac{G^*(z)}{F^*(z)} = \gamma \frac{F_0 \int \exp\left(\frac{\gamma z}{[\sigma]}\right) dz - \int f(z) dz}{F_0 \exp\left(\frac{\gamma z}{[\sigma]}\right) - f(z)} = [\sigma]. \quad (13)$$

Звідси випливає залежність, якій повинна задовольняти додаткова функція

$$f(z) = \frac{\gamma}{[\sigma]} \int f(z) dz. \quad (14)$$

При передбачуваному розподілі площ перетинів (9) об'єм стрижня довжиною L буде

$$V^*(z) \Big|_{z=L} = \left(\int F(z) dz - \int f(z) dz \right) \Big|_{z=L} = V(L) - \mu L. \quad (15)$$

Параметр μ може приймати нульове, позитивні або негативні значення. Очевидно, при $\mu = 0$ об'єм буде дорівнює початковому, $V^*(L) = V(L)$.

При $\mu > 0$ матимемо $V^*(L) > V(L)$ – скоригований об'єм буде більше вихідного.

При $\mu < 0$ з умови міцності отримаємо обмеження

$$\int f(x) dx \leq \frac{[\sigma]}{\gamma} f(z), \quad (16)$$

напруження будуть менші за допустимі і рівнонапруженості не буде. Умова (4) буде виконуватись при $f(z) = 0$, тобто якщо $F^*(z) = F(z)$.

Умова (16) може також виконуватись, якщо додаткова функція має вигляд

$$f(z) = f_0 \exp\left(\frac{\gamma z}{[\sigma]}\right). \quad (17)$$

Припустимо, що функція (17) знайдена. Тоді для нового розподілу площ перерізів (9) буде визначатись залежністю:

$$F^*(z) = (F_0 - f_0) \exp\left(\frac{\gamma z}{[\sigma]}\right), \quad (18)$$

при якій буде виконуватись умова (10):

$$V^*(L) = \frac{F_0 - f_0}{\gamma} [\sigma] \exp\left(\frac{\gamma L}{[\sigma]}\right) < V(L) = \frac{F_0}{\gamma} [\sigma] \exp\left(\frac{\gamma L}{[\sigma]}\right). \quad (19)$$

Однак при виконанні залежності (18) не буде виконуватись умова міцності. Наприклад, при $z = 0$ з врахуванням формули (5) отримуємо

$$\sigma(0) = \frac{P}{F^*(0)} = \frac{F_0 \cdot [\sigma]}{F_0 - f_0} > [\sigma]. \quad (20)$$

Звідси витікає, що умова міцності буде виконуватись лише якщо в формулі (17) $f_0 = 0$, тобто якщо розподіл площ перетинів (18) буде виглядати так: $F^*(z) = F(z)$.

Таким чином отримане протиріччя – при будь-якій іншій функції $F^*(z) = F(z) - f(z)$ об'єм $V^*(L)$ не буде меншим за $V(L)$, який відповідає функції $F(z)$. Відтак, мінімальність об'єму стрижня що розтягується (або стискається) забезпечується лише при розподілі перерізів за виразом (3), отже теорему доведено. У підсумку, з врахуванням доведеної теореми когнітивна модель залежності оптимальної маси M механічного виробу від НРН останнього наведена на рис. 4.

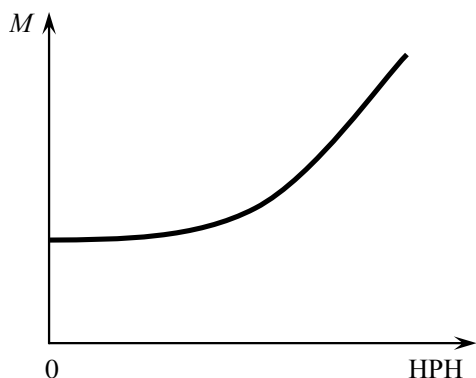


Рис. 4 – Когнітивна модель залежності оптимальної маси механічного виробу від його нерівнонапруженості

Аналогічно можна довести, що, наприклад, об'єкт у вигляді комп'ютерної мережі має найменшу сумарну потужність окремих комп'ютерів, якщо останні однаково та гранично навантажені. Під таким «навантаженням», на відміну від механічного, вважають завантаженість центрального процесора комп'ютера, обчислену або виміряну за однією з відомих методик [19–21].

Задача оптимізації форми або архітектури таких об'єктів нагадує багатокритеріальну оптимізацію за Парето: пошук такого стану системи, при якому значення кожного окремого критерію, що описує цей стан, не може бути покращене без погіршення становища інших елементів [22].

На жаль, відомі методи багатокритеріальної оптимізації тут не застосовні, оскільки внутрішня напруженість систем, про які йде мова в роботі, залежать від зовнішнього навантаження, взагалі, стохастичного та малопередбачуваного.

Система штучного інтелекту для адаптації конструкції об'єкта з метою протидії викликам оточуючого середовища, які впливають на рівнонапруженість. Виходом із зазначених проблем можна вважати процес створення таких об'єктів, що мають

вбудовану підсистему управління, яка після кожного внутрішнього або зовнішнього впливу, що призводить до збільшення НРН, «розвертає» об'єкт таким чином, щоб знизити НРН до припустимого рівня. Під «розвертанням» розуміємо не фізичне повертання із зміною геометричних координат, а зміну параметрів системи (структури, властивостей елементів, тощо, які тим або іншим чином впливають на навантаженість). Умови, в яких плануються, розраховуються та здійснюються такі «розвертання» мають, згідно із [23], наступні особливості:

- складність і розмірність розв'язуваної задачі пов'язані з великою кількістю елементів складної системи (N) та різницею (1) «зв'язків» між ними ($N(N-1)$);
- високий рівень представлення та маніпулювання знаннями обумовлений обізнаністю групи експертів про можливості об'єкта та його стан на поточний момент;
- здатність до самоаналізу, яка базується на можливості постійних розрахунків стану навантаженості окремих елементів в умовах неповної інформації про рівень внутрішніх та зовнішніх впливів;
- здатність навчатися та самонавчатися, яка створює умови для того, щоб стан із найменшим НРН був аттрактором у русі складного об'єкта в якості динамічної системи;
- здатність до переформатування задачі, тобто переходу від форми, в якій початково поставлена проблема до іншої форми, що відповідає моделі представлення знань.

Перелік наведених ознак відповідає поняттю «штучний інтелект», а система, яка його втілює у життя – інтелектуальна система [23]. Ця система поводить себе як людина, розмірковує як людина, та діє цілеспрямовано й раціонально. Структура системи такого типу «EQU TENS» (*equal tension support*), створеної в рамках роботи, наведена на рис. 5.

Згідно з цією структурою, система штучного інтелекту містить такі блоки.

1. Блок збирання та первинної обробки вихідних даних про складний об'єкт (наприклад, механічну конструкцію, комп'ютерну мережу, тощо).
2. Блок виявлення та врахування зовнішніх впливів на об'єкт, що призводять до збільшення НРН.
3. Блок побудови дискретної моделі об'єкта, напруженість якого відслідковується.
4. Блок вимірювання зміни напруження елементів, якщо для цього є технічна та метрологічна можливість. Це можуть бути, наприклад, тензометричні або індуктивні датчики для вимірювання механічних напружень, спеціальні програми для розрахунку навантаження окремих елементів комп'ютерних мереж, тощо.
5. Блок, де дані про поточний стан напруження елементів складних об'єктів не вимірюються, а розраховуються. Найбільш потужним інструментом для таких обчислень є САПР ANSYS – універсальна програмна система скінченно-елементного аналізу та рішення лінійних і нелінійних, стаціонарних і нестаціонарних просторових задач механіки деформованого твердого тіла і механіки конструкцій, завдань механіки рідини і газу, теплопередачі і теплообміну,

електродинаміки, акустики, а також механіки зв'язаних полів.

6. В цьому блоці інформація, отримана за допомогою блоків 4 або 5 перетворюється до тривимірного поля напружень або так званого «тривимірного зорового образу» за методиками, описаними в [24]. Відмітимо, що мова йде про віртуальний зоровий образ, оскільки він створюється не для взаємодії із зором людини. Натомість до нього застосовуються інтелектуальні методи розпізнавання (класифікації) зорових образів [25].

7. Створений образ перераховується до значення «зрушеної» НРН об'єкта, яке в подальшому використовується для розрахунків дій по її відновленню.

8. Блок експертної оцінки, на виході якого повинно бути прийняте рішення про безпосередні методи відтворення НРН: штучне (блок 9), за рахунок внесення змін до структури об'єкта, властивостей його елементів або характеристик зовнішнього навантаження, або автоматичне, у випадку коли об'єкт представляється як динамічний, а стан із найменшою НРН є його аттрактором (блок 10).

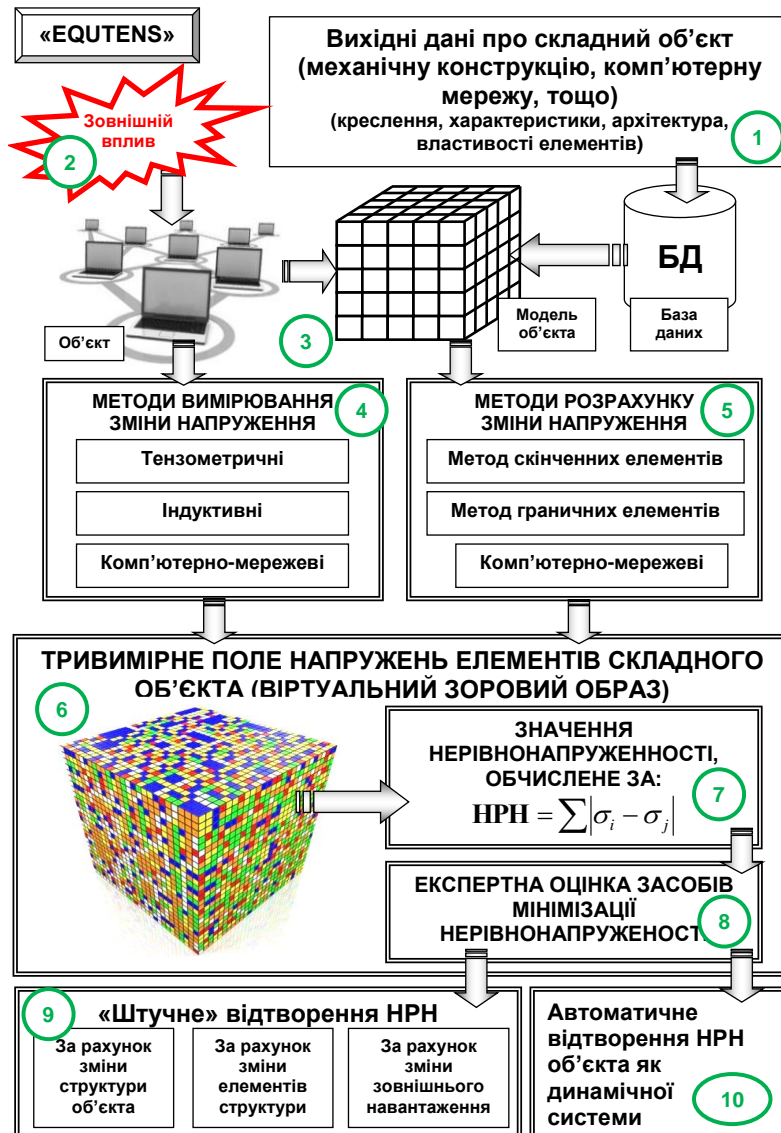


Рис. 5 – Структура системи «EQUENS» (*equal tension support*) відновлення рівнонапруженого стану складних об'єктів

Висновки

1. Введено нове поняття «нерівнонапруженість» в якості числової характеристики нерівномірності опору будь-якого складного об'єкта впливу зовнішнього середовища, запропоновано методи його обчислення та доведено теорему про співпадіння мінімуму нерівнонапруженості із мінімумом вартості об'єкта у виготовленні та експлуатації;

2. Запропоновано систему «EQUENS» (*equal tension support*) для штучної (за допомогою експертних рішень) або самовільної (за допомогою інтелектуального аттрактора) адаптації характеристик об'єкта до турбулентного зовнішнього навантаження під час його експлуатації, яка відновлює стан об'єкта, повертаючи його окремі елементи до мінімальної нерівнонапруженості.

Список літератури:

1. *Сабитов, Л. С.* Разработка и численные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций из трубчатых стержней в энергетическом строительстве [Текст] / *Л. С. Сабитов* // Вестник Иркутского ГТУ. – 2015. – № 6 (101). – С. 108–117.
2. *Становський, А. Л.* Математическое моделирование и оптимизация в САПР равнонапряженных деталей машин [Текст] / *А. Л. Становський, Е. А. Науменко, О. Абу Шена* // Високи технології в машинобудуванні. – 2017. – № 1 (27). – С. 143–154.
3. *Daschenko, O.* Mathematical model of connections cylindrical shell with the bottom variable thickness [Text] / *O. Daschenko, O. Stanovskiy, Yu. Khomiak, E. Naumenko* // «Information technology and automation – 2016»: Proceedings IX Annual scientific conference. – Odessa, ONAFT, 2016. – P. 29–30.
4. *Новиков, В. В.* Математическое моделирование профиля равного сопротивления [Текст] / *В. В. Новиков, В. Г. Максимов, С. А. Балан, О. Е. Гончарова* // Оптимизация в материаловедении. – Одесса: АстроПринт, 1999. – 151 с.
5. *Bendsoe, M. P.* Topology optimization [Text] / *M. P. Bendsoe, O. Sigmund*. – Berlin: Springer, 2003. – 370 p. doi: [10.1007/978-3-662-05086-6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6)
6. *Eves, J.* Topology optimization of aircraft with non-conventional configurations [Text] / *J. Eves, V. V. Toropov, H. M. Thompson, P. H. Gaskell, J. J. Doherty, J. C. Harris* // 8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization. – Lisbon, 2009. – P. 1–9.
7. *Няшин, Ю. И.* Равнонапряженные листовые рессоры [Текст] / *Ю. И. Няшин, М. А. Осипенко, М. Б. Гитман* // Вестник Магнитогорского ГТУ им. Г. И. Носова. – 2017. – № 3. – С. 22–26.
8. *Янковский, А. П.* Единственность решения в малом задаче равнонапряженного армирования металлокомпозитных пластин, работающих в условиях установившейся ползучести [Текст] / *А. П. Янковский* // Вестник Самарского ГТУ. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2014. – Вып. 4 (37). – С. 121–132.
9. *Сметанкина, Н. В.* Минимизация массы слоистых композитных пластин при импульсном нагружении [Текст] / *Н. В. Сметанкина, В. А. Сметанкин* // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара. – 2011. – Вып. 16. – С. 259–265.
10. *Oliveira, A.* Implementation of FEA in the minimum weight design process of aerostructures [Text] / *A. Oliveira, L. Krog* // Proceedings of NAFEMS World Congress. – Malta, 2005. – P. 115–124.
11. *Балан, С. А.* Учет перемещений при ударном механическом нагружении транспортных средств [Текст] / *С. А. Балан, О. С. Савельева* // Труды Одесс. политехнич. ун-та. – 1998. – Вып. 1. – С. 160–162.
12. *Stanovskiy, A.* The virtual models in equal-stressed machine parts desing [Text] / *A. Stanovskiy, Y. Naumenko, I. Saukh, O. Abu Shena* // Вестник Кременчугского национального университета имени М. Остроградского. – 2016. – № 6/2016 (101). – С. 59–60.
13. *Гончарова, О. Е.* Нечувствительный к асимметрии численный метод оптимизации конструкций [Текст] / *О. Е. Гончарова, В. Г. Максимов* // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – Вып. 2 (8). – С. 41–44.
14. «Умные» дороги: каким будет дорожное покрытие будущего [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tehnologii.eizvestia.com/full/2411-umnye-dorogi-kakim-budet-dorozhnoe-pokrytie-budushhego>
15. *Становський, А. Л.* Компенсирующая подвеска транспортного средства [Текст] / *А. Л. Становський, В. Г. Максимов, О. Е. Гончарова* // Моделирование в прикладных научных исследованиях. – 1999. – С. 18–19.
16. *Кострова, Г. В.* Оптимизация переходных процессов механического нагружения [Текст] / *Г. В. Кострова, О. С. Савельева, А. Л. Становський* // Труды Одесс. политехнич. ун-та. – 1998. – Вып. 1. – С. 53–56.
17. *Павский, В. А.* Вычисление показателей живучести распределенных вычислительных систем и осуществимости решения задач [Текст] / *В. А. Павский, К. В. Павский, В. Г. Хорошевич* // Искусств. интеллект. – 2006. – № 4. – С. 28–34.
18. *Нестеренко, С. А.* Метод диагностики stanu структуры складного объекта машинобудування [Текст] / *С. А. Нестеренко, А. О. Становський, А. В. Торопенко* // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2013. – Вып. 8. – С. 116–123.
19. *Walker, R.* Examining Load Average [Text] / *R. Walker* // Linux Journal. – 2006. – Vol. 2006, Issue 152. – Available at: <http://www.linuxjournal.com/article/9001?page=0,0>
20. What exactly is a load average? [Electronic resource]. – Linux Tech Support. – Available at: <http://linuxtechsupport.blogspot.com/2008/10/what-exactly-is-load-average.html>
21. *Ferrari, D.* An Empirical Investigation of Load Indices for Load Balancing Applications [Electronic resource] / *D. Ferrari, S. Zhou* // Available at: <https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/1987/CSD-87-353.pdf>
22. *Ehrgott, M.* Approximative solution methods for multiobjective combinatorial optimization [Text] / *M. Ehrgott, X. Gandibleux* // Top. – 2004. – Vol. 12, Issue 1. – P. 1–63. doi: [10.1007/bf02578918](https://doi.org/10.1007/bf02578918)
23. *Russell, S. J.* Artificial Intelligence: a modern approach [Text] / *S. J. Russell, P. Norvig*. – Prentice Hall, USA, 1995. – 931 p.
24. *Нестеренко, С. А.* Перетворення структури складної технічної системи із частково недоступними елементами до зорового образу [Текст] / *С. А. Нестеренко, А. О. Становський, А. В. Торопенко, П. С. Швець* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 5, № 3 (77). – С. 30–35. doi: [10.15587/1729-4061.2015.51186](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51186)
25. *Нестеренко, С. А.* Інтелектуальні методи оцінювання stanu структури бездротових комп'ютерних мереж при їхньому проектуванні та експлуатації [Текст] / *С. А. Нестеренко, А. О. Становський, І. Хелбос* // Матеріали XXIII науково-технічного семінара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса, 2015. – С. 51–53.

Bibliography (transliterated):

1. Sabitov, L. S. (2015). Razrabotka i chislennyye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya (NDS) konstrukciy iz trubchatykh stержней v energeticheskom stroitel'stve. Vestnik Irkutskogo GTU, 6 (101), 108–117.
2. Stanovskiy, A. L., Naumenko, E. A., Abu Shen, O. Matematicheskoe modelirovaniye i optimizaciya v SAPR ravnopryazhennykh detaley mashin. Vysoki tekhnolohiyi v mashynobuduvanni, 1 (27), 143–154.
3. Daschenko, O., Stanovskiy, O., Khomiak, Yu., Naumenko, E. (2016). Mathematical model of connections cylindrical shell with the bottom variable thickness. «Information technology and automation – 2016»: Proceedings IX Annual scientific conference. Odessa, ONAFT, 29–30.
4. Novikov, V. V., Maksimov, V. G., Balan, S. A., Goncharova, O. E. (1999). Matematicheskoe modelirovaniye profilya ravnogo soprotivleniya. Optimizaciya v materialovedenii. Odessa: AstroPrint, 151.
5. Bendsoe, M. P., Sigmund, O. (2003). Topology optimization. Berlin: Springer, 370. doi: [10.1007/978-3-662-05086-6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6)
6. Eves, J., Toropov, V. V., Thompson, H. M., Gaskell, P. H., Doherty, J. J., Harris, J. C. (2009). Topology optimization of aircraft with non-conventional configurations. 8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization. Lisbon, 1–9.
7. Nyashin, Yu. I., Osipenko, M. A., Gitman, M. B. (2017). Ravnopryazhennyye listovyye resory. Vestnik Magnitogorskogo GTU im. G. I. Nosova, 3, 22–26.
8. Yankovskiy, A. P. (2014). Edinstvennost' resheniya v malom zadachi ravnopryazhennogo armirovaniya metallokompozitnykh plastin, rabotayushchih v usloviyakh ustanovivsheysya polzuchesti. Vestnik Samarskogo GTU. Ser.: Fiz.-mat. nauki, 4 (37), 121–132.
9. Smetankina, N. V., Smetankin, V. A. (2011). Minimizaciya massy sloistykh kompozitnykh plastin pri impul'snom nagruzhennii. Problemy obchysluvalnoy mekhaniky i mitsnosti konstruktivnoy. Dnipropetrovskiy natsionalnyi universytet im. O. Honchara, 16, 259–265.
10. Oliveira, A., Krog, L. (2005). Implementation of FEA in the minimum weight design process of aerostructures. Proceedings of NAFEMS World Congress. Malta, 115–124.
11. Balan, S. A., Savel'eva, O. S. (1998). Uchet peremeshcheniy pri udarnom mekhanicheskom nagruzhennii transportnykh sredstv. Trudy Odess. politekhnich. un-ta, 1, 160–162.

12. Stanovskiy, A., Naumenko, Y., Saukh, I., Abu Shena, O. (2016). The virtual models in equal-stressed machine parts desing. Vestnik Kremenchugskogo nacional'nogo universiteta imeni M. Ostrogradskogo, 6/2016 (101), 59–60.
13. Goncharova, O. E., Maksimov, V. G. (1999). Nechuvstvitel'nyy k asimmetrii chislennyy metod optimizatsii konstruktsiy. Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta, 2 (8), 41–44.
14. «Umnye» dorogi: kakim budet dorozhnoe pokrytie budushchego. Available at: <http://tehnologii.eizvestia.com/full/2411-umnye-dorogi-kakim-budet-dorozhnoe-pokrytie-budushhego>
15. Stanovskiy, A. L., Maksimov, V. G., Goncharova, O. E. (1999). Kompensiruyushchaya podveska transportnogo sredstva. Modelirovanie v prikladnykh nauchnykh issledovaniyakh, 18–19.
16. Kostrova, G. V., Savel'eva, O. S., Stanovskiy, A. L. (1998). Optimizatsiya perekhodnykh processov mekhanicheskogo nagruzheniya. Trudy Odess. politekhn. un-ta, 1, 53–56.
17. Pavskiy, V. A., Pavskiy, K. V., Horoshevskiy, V. G. (2006). Vychislenie pokazately zhivuchesti raspredelennykh vychislitel'nykh sistem i osushchestvleniya resheniya zadach. Iskustv. intellekt, 4, 28–34.
18. Nesterenko, S. A., Stanovskiy, A. O., Toropenko, A. V. (2013). Metod diahnozyky stanu struktury skladnogo ob'ekta mashynobuduvannya. Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni, 8, 116–123.
19. Walker, R. (2006). Examining Load Average. Linux Journal, 2006 (152). Available at: http://www.linuxjournal.com/article/9001?page=0_0
20. What exactly is a load average? Linux Tech Support. Available at: <http://linuxtechsupport.blogspot.com/2008/10/what-exactly-is-load-average.html>
21. Ferrari, D., Zhou, S. An Empirical Investigation of Load Indices for Load Balancing Applications. Available at: <https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/1987/CSD-87-353.pdf>
22. Ehr Gott, M., Gandibleux, X. Approximative solution methods for multiobjective combinatorial optimization. Top, 12 (1), 1–63. doi: [10.1007/bf02578918](https://doi.org/10.1007/bf02578918)
23. Russell, S. J., Norvig, P. (1995). Artificial Intelligence: a modern approach. Prentice Hall, USA, 931.
24. Nesterenko, S. A., Stanovskiy, A. O., Toropenko, A. V., Shvets, P. S. (2015). Transformation of the structure of complex technical systems with partially unusable elements to the visual image. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (3 (77)), 30–35. doi: [10.15587/1729-4061.2015.51186](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51186)
25. Nesterenko, S. A., Stanovskiy, A. O., Kheblor, I. (2015). Intelektualni metody otsiniuvannya stanu struktury bezdrovovykh kompiuternykh merezh pry yikhnomu proektuvanni ta ekspluatatsii. Materialy XXIII nauchno-tekhnicheskogo seminaru «Modelirovanie v prikladnykh nauchnykh issledovaniyakh». Odessa, 51–53.

Надійшла (received) 01.12.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Управління напруженістю систем за допомогою штучного інтелекту/ Становський О. Л., Хомяк Ю. М., Торопенко А. В., Науменко Є. О., Дадерко О. І. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 44 (1266).– P.52–60. – Bibliogr.:25 – ISSN 2079-5459

Управление напряженностью систем с помощью искусственного интеллекта/ Становский А. Л., Хомяк Ю. М., Торопенко А. В., Науменко Е. А., Дадерко О. И. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 44 (1266).– P.52–60. – Bibliogr.:25. – ISSN 2079-5459

The systems tension control with the help of artificial intelligence/ Stanovskiy A., Khomjak Yu., Toropenko A., Naumenko Ye., Daderko O. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 44 (1266).– P.52–60. – Bibliogr.:25. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Становський Олександр Леонідович – доктор технічних наук, Одеський національний політехнічний університет, завідувач кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування; просп. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: ostanovskiy@gmail.com.

Становский Александр Леонидович – доктор технических наук, Одесский национальный политехнический университет, заведующий кафедрой нефтегазового и химического машиностроения; пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044;; e-mail: ostanovskiy@gmail.com.

Stanovskiy Olexandr – Doctor of technical Science, Odessa National Polytechnic University, Chief of Department of Oilgas and chemical mechanical engineering; Shevchenko 1, Odessa, Ukraine, 65044;

Хомяк Юрій Мєфодійович – кандидат технічних наук, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування; просп. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044;

Хомяк Юрий Мєфодиевич – кандидат технических наук, Одесский национальный политехнический университет, доцент кафедры нефтегазового и химического машиностроения; пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044;; e-mail: jomiak38@gmail.com.

Khomiak Yuriy Mefodijovych – candidate of technical Science, Odessa National Polytechnic University, Docent of Department of Oilgas and chemical mechanical engineering; Shevchenko 1, Odessa, Ukraine, 65044

Торопенко Алла Володимирівна – кандидат технічних наук, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування; просп. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: alla.androsyk@gmail.com.

Торопенко Алла Владимировна – кандидат технических наук, Одесский национальный политехнический университет, доцент кафедры нефтегазового и химического машиностроения; пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044, e-mail: alla.androsyk@gmail.com.

Toropenko Alla – candidate of technical Science, Odessa National Polytechnic University, Docent of the Depart-

ment of oil and gas and chemical engineering; Shevchenko 1, Odessa, Ukraine, 65044

Науменко Євгенія Олександрівна – магістр, Одеський національний політехнічний університет, ст. викладач кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування; пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: naumenko.e.o@opu.ua

Науменко Евгения Александровна – магістр, Одесский национальный политехнический университет, ст. преподаватель кафедры нефтегазового и химического машиностроения; пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044; e-mail: naumenko.e.o@opu.ua.

Naumenko Ievgenija – master, Odessa National Polytechnic University, Senior Lecturer of Department of Oilgas and chemical mechanical engineering; Shevchenko 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: naumenko.e.o@opu.ua.

Дадерко Олеся Ігорівна – магістр, Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування; пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044;

Дадерко Олеся Игоревна – магістр, Одесский национальный политехнический университет, аспирант кафедры нефтегазового и химического машиностроения; пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044;

Daderko Olesya – master, Odessa National Polytechnic University, Postgraduate of the Department of Oilgas and chemical mechanical engineering; Shevchenko 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: jcute1@gmail.com.

УДК 620.179.14

В. Г. БАЖЕНОВ, К. А. ГЛЬОЙНИК, С. В. ХОДНЕВИЧ

ОРТОГОНАЛЬНИЙ АМПЛІТУДНО-ФАЗОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ВИХРОСТРУМОВИХ ДЕФЕКТОСКОПІВ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

В даній статті розглянуті особливості використання ортогональних методів вимірювання параметрів сигналів при проектуванні вихрострумів дефектоскопів (ВД) на базі мікроконтролерів. Аналізується запропонована авторами нова структура дефектоскопа, яка має один вимірювальний канал, реалізує ортогональний метод вимірювання, має дуже мале енергоспоживання, малі габарити і відповідну вартість. Проведені експериментальні дослідження запропонованої структури ВД на спеціальному експериментальному макеті, де за допомогою високочотного синтезатора сигналів SDG102, фірми SIGLENT, проведено імітацією можливих дефектів які можуть призводити як до зміни фази так і амплітуди вимірювального сигналу, що підтвердило високі метрологічні можливості цієї структури.

Ключові слова: вихрострумівий дефектоскоп, ортогональний метод, синтезатор частоти, вихрострумівий перетворювач, прямий синтез, мікроконтролер, DSP процесор, LabVIEW, аналого-цифровий перетворювач, фільтр нижніх частот.

В данной статье рассмотрены особенности использования ортогональных методов измерения параметров сигналов при проектировании вихротоковых дефектоскопов (ВД) на базе микроконтроллеров. Анализируется предложенная авторами новая структура дефектоскопа, которая имеет один измерительный канал, реализует ортогональный метод измерения, имеет очень малое энергопотребление, малые габариты и соответствующую стоимость. Проведенные экспериментальные исследования предложенной структуры ВД на специальном экспериментальном макете, где с помощью высокочотного синтезатора сигналов SDG102, фирмы SIGLENT, проведено имитацию возможных дефектов, которые могут приводить как к изменению фазы, так и амплитуды измерительного сигнала, что подтвердило высокие метрологические возможности этой структуры.

Ключевые слова: вихротоковый дефектоскоп, ортогональный метод, синтезатор частоты, вихротоковый преобразователь, прямой синтез, микроконтроллер, DSP процессор, LabVIEW, аналого-цифровой преобразователь, фильтр нижних частот.

In this article has been considered features of the using orthogonal methods for measuring signal parameters during the design of eddy-current flaw detectors based on microcontrollers. The proposed new structure of the flaw detector have been analyzing. The structure has one measuring channel, implements an orthogonal measurement method, has very low energy consumption, small size and low cost. Experimental investigations the proposed structure of eddy-current flaw detectors have been done in a special experimental model, where using the high-precision signal synthesizer SDG102, firm SIGLENT, conducted simulation of possible defects that can lead to phase and amplitude changes of the measurement signal. That confirmed the high metrological capabilities of this structure.

Keywords: eddy current defectoscope, orthogonal method, frequency synthesizer, eddy current converter, direct synthesis, microcontroller, DSP processor, LabVIEW, analog-to-digital converter, low pass filter.

Вступ. Вихрострумівий контроль є одним із найпоширеніших на даний час. Для отримання максимальної універсальності і достовірності контролю в сучасних вихрострумівих дефектоскопах використовують амплітудно-фазовий метод, який потребує визначати амплітуду і фазу вимірювального сигналу.

На даний час відомі серійні, багатофункціональні вихроструміві дефектоскопи, на базі сучасних DSP процесорів, але вони мають високу вартість, великі габарити та енергоспоживання.

Мета роботи. Дослідити можливість створення вихрострумівого дефектоскопу, точність якого не буде поступатися існуючим, але вартість та енергоспоживання будуть значно меншими.

Відомо[1], що вимірювачі амплітуди та фазового зсуву вимірювального сигналу, які використовують

ортогональний метод виміру, являються найбільш точними. Враховуючи вищезазначене, а також сучасний стан електроніки, а саме: появу мікросхем синтезаторів частоти прямого цифрового синтезу (DDS) з малим енергоспоживанням, керованих мікроконтролерами, а також мікросхем помножувачів сигналів, та мікроконтролерів з вбудованими аналого-цифровими перетворювачами (АЦП), вважаємо за доцільне при розробці ВД використовувати ортогональний метод виміру.

Функціональна схема ВД яка реалізує ортогональний метод виміру може мати такий вигляд представлений на рис. 1.

© В. Г. Баженов, К. А. Гльойник, С. В. Ходневич. 2017