

УДК 004.942

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.123502

КОМПЕНСАЦІЯ ПРОСТОРОВИХ ДЕВІАЦІЙ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ В САПР

Становський О. Л., Торопенко А. В., Лебедєва О. Ю., Добровольська В. В., Дадерко О. І.

1. Вступ

Автоматизоване проектування засобів вимірювання має певні особливості, які полягають в необхідності створення додаткових сприятливих умов для роботи їхніх чутливих органів. Справа в тому, що точність роботи засобів вимірювання (ЗВ) суттєво залежить від стабільності геометричного розташування їхніх елементів (ЕЗВ). І, хоча в ЕЗВ, як правило, не виникають суттєві механічні напруження, навіть незначні їхні відхилення можуть призвести до значних втрат точності позиціонування, а отже точності та достовірності результатів такого вимірювання.

Під відхиленням ЕЗВ в роботі розуміли статичні деформації або переміщення, а також динамічні коливання або будь-яке їхнє об'єднання, не передбачені паспортною геометричною або кінематичною схемою відповідного засобу.

Для усунення зовнішніх впливів, які можуть призвести до подібних відхилень (девіації) при проектуванні ЗВ застосовують різні конструктивні прийоми: підвищення жорсткості елементів, оптимізацію їхньої конструктивної схеми, сучасні матеріали із покращеними характеристиками опору, тощо. Широко застосовуються також методи активного та пасивного віброзахисту, термостатування, екранізації та багато інших.

Зрозуміло, будь-який захист неспроможний повністю усунути небажані відхилення ЕЗВ. Особливо це відноситься до об'єктів вимірювання, які мають великі габарити (десятки метрів) та вагу, непрозорість, високі температури (сотні градусів), суттєві зовнішні впливи непередбачуваного характеру, тощо. Моделі поведінки таких об'єктів під навантаженням вкрай складні, а методи їхнього аналізу та використання в САПР взагалі відсутні, що призводить до закладання значних майбутніх похибок майбутнього вимірювання вже на етапі проектування.

Тому актуальним є дослідження, направлені на розробку методів та моделей, які на ранніх стадіях створення метрологічних засобів (наприклад, на етапі їхнього автоматизованого проектування) забезпечують необхідну точність майбутнього вимірювання параметрів великогабаритних об'єктів, незалежно від умов їхнього використання на практиці.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – процеси автоматизованого проектування елементів комплексних засобів вимірювання, які призначені для роботи в умовах значних відхилень таких елементів у просторі, викликаних внутрішнім та зовнішнім механічним або термічним навантаженням.

Технологічний аудит є способом діагностики інноваційної підсистеми САПР в метрології, і дозволяє отримати характеристику інноваційного потенціалу при створенні нових і реконструкції існуючих засобів вимірювання. Проведення технологічного аудиту дає проектному підприємству можливість сформулювати стратегію отримання прибутку з результатів інноваційної діяльності. Передбачається, що розробник використовує результати інноваційної діяльності безпосередньо в процесі проектування, випускаючи нові проекти в галузі приладобудування із застосуванням створених проектних інновацій.

Процедуру оцінки комерційного потенціалу інноваційної ідеї проводили за алгоритмом, що складається з 6 послідовних кроків [1]:

- 1) проведення попереднього аналізу існуючих засобів вимірювання параметрів великогабаритних гетерогенних об'єктів під час їх створення;
- 2) проведення пошуку аналогів метрологічних засобів в суміжних об'єктах та аналіз ефективності їх застосування для досліджуваних об'єктів;
- 3) перевірка технічної здійсненності інноваційної ідеї вимірювання щільності залізобетону в складних виробках в умовах дев'яції елементів метрологічних засобів за допомогою ємнісного методу;
- 4) ідентифікація продукту (результату проектування) для порівняння з аналогами;
- 5) визначення ринкових переваг створюваного продукту;
- 6) практична здійсненність інноваційної ідеї в реальному виробництві.

Проведені дослідження підтвердили високий комерційний потенціал інноваційної ідеї: використання нових моделей дев'яції елементів під час вимірювання параметрів об'єктів.

3. Мета і задачі дослідження

Мета роботи – підвищення точності вимірювань технічних параметрів великогабаритних об'єктів відповідального призначення шляхом створення систем автоматичного проектування нових комплексних засобів вимірювань. Такі засоби повинні бути засновані на нових моделях небажаних переміщень окремих елементів останніх та методах їхньої компенсації.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити *такі задачі*:

1. Побудувати моделі та здійснити аналіз статичних, технологічних та динамічних переміщень (деформацій) елементів засобів вимірювання.
2. Розробити методи компенсації майбутніх небажаних статичних, динамічних та технологічних переміщень на етапі автоматизованого проектування засобів вимірювання.
3. Виконати практичні випробування результатів досліджень та оцінити їхній технічний ефект.

4. Дослідження існуючих рішень проблем

В останні роки автоматизоване проектування спеціального метрологічного забезпечення (МЗ) для дослідження внутрішніх параметрів об'єкта [2–4] набуло великого поширення. Це пов'язане із тим, що воно дозволяє на ранішньому, проектному етапі життєвого циклу МЗ ефективно обирати метод вимірювання та конструкцію відповідних ЗВ, які мають нормовані метрологічні характеристики. До

останніх можна віднести міри фізичних величин, вимірювальні прилади, перетворювачі та устаткування, інформаційно-вимірювальні системи, обчислювальні комплекси та *вимірювальні пристрої*, в яких виконується лише одна із складових частин процедури вимірювання, наприклад: перетворення, масштабування, порівняння, або інші операції із сигналом.

Існуючі САПР МЗ не здатні ефективно функціонувати, оскільки вони не «оснащені» моделями та методами процесів вимірювання відповідальних об'єктів. Прикладами таких об'єктів є великогабаритні будівельні конструкції, дослідження внутрішніх параметрів яких (наприклад, щільності) є вельми проблематичним із-за значної просторової девіації елементів МЗ, які призводять до неприпустимих втрат точності вимірювання.

Серед основних напрямків усунення цих проблем, виявлених в ресурсах світової наукової періодики, можуть бути виділені такі:

- 1) застосування методів та засобів зовнішнього по відношенню до об'єкта неруйнівного контролю [5–9];
- 2) застосування вбудованих в об'єкт засобів неруйнівного контролю [10–14];
- 3) застосування комплексних засобів неруйнівного контролю, які вбудовуються в вимірюваний об'єкт лише частково [15–19].

Розглянемо ці напрямки докладніше.

1. При виробництві і експлуатації життєво важливих виробів, компонентів і конструкцій (будинків, залізничних рійок, літаків, морських суден, нафто та газопроводів та іншого обладнання) для виявлення внутрішніх дефектів об'єкта без його руйнування широко використовується неруйнівний контроль [5, 6]. До поширених методів неруйнівного контролю (вимірювання) також відносять такі, коли датчик цілком розташовується зовні об'єкта вимірювання (наприклад, тепловізор [7] або ультразвукова головка [8] (рис. 1, а)).

Зовнішні датчики потребують точного позиціонування відносно об'єкта та створення додаткових умов для взаємодії з останнім. Наприклад, для створення умов проникнення ультразвукових хвиль від вимірювальної головки до об'єкта та навпаки необхідно стежити за тим, щоб зазор між ними був заповнений спеціальною рідиною [9].

2. Згідно із ДСТУ 3400:2006, державні випробування засобів вимірювальної техніки проводять, щоб забезпечити єдність вимірювань в Україні. Коли мова йде про неруйнівне вимірювання внутрішніх параметрів суцільного (за власним кресленням) об'єкта, єдність вимірювань може бути забезпечена тим, що, вимірювальний засіб (наприклад, термopара) повністю вбудовується в нього вже при проектуванні (рис. 1, б), тобто стає елементом конструкції, а отже й частиною технічного завдання на об'єкт [10]. При надійному захисті такі засоби, як правило, не піддаються внутрішньому по відношенню до них відносному зміщенню окремих частин і не потребують компенсації відповідної девіації, яка впливає на точність та достовірність їхніх показників [11–13].

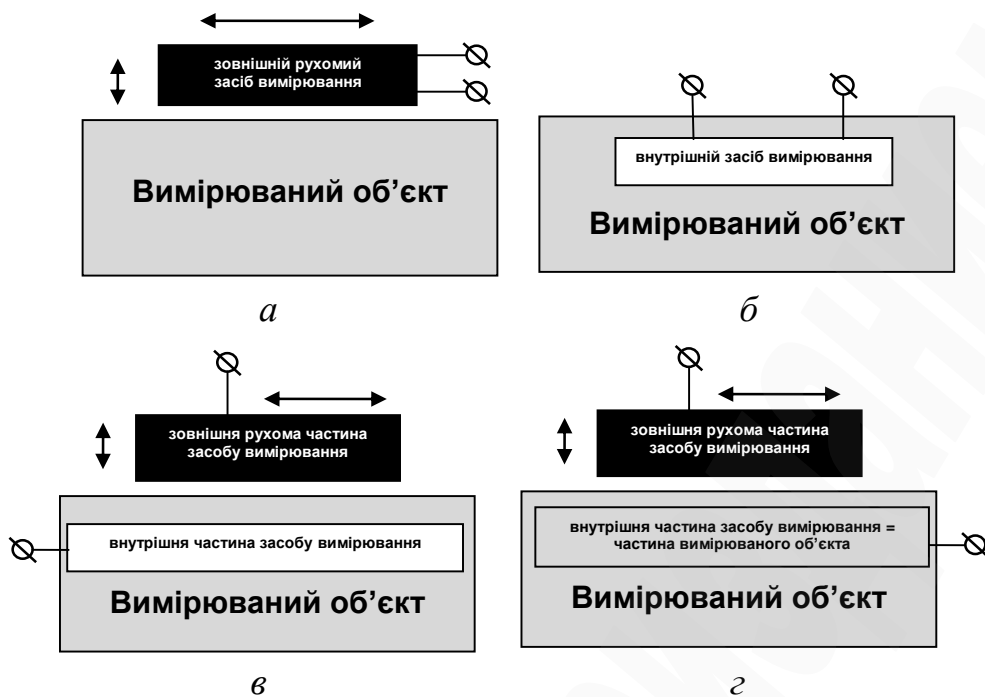


Рис. 1. Схеми розташування засобу вимірювання відносно вимірюваного об'єкта: *а* – зовні; *б*– всередині; *в* – частково всередині, частково зовні; *г* – внутрішні елементи засобу вимірювання є частиною об'єкта

Головний недолік «вбудованих» датчиків – їхня одноразовість, неможливість використання в інших об'єктах, робить їх незастосовними при масовому виробництві. Крім того, одноразові елементи засобів вимірювання, залишаючись назавжди чужорідними всередині вимірюваного об'єкта, можуть суттєво ускладнювати технологію його виготовлення. Вони здатні також змінювати його властивості (міцність, наявність металевих включень, загальні поруватість та теплопровідність, тощо), що, у підсумку, робить такий метод «не зовсім неруйнівним» [14].

Незрозуміло також, чому в джерелах літератури називають «неруйнівними» частково «занурені» в об'єкт, так звані, механічні методи. Наприклад, при вимірюванні властивостей бетону в готовому виробі останній піддають досить руйнівним впливам. До них відносяться: пластична деформація, пружний відскік, відрив (або відрив зі сколюванням), сколювання ребра, а також методи вибуху, забивання та висмикування деталей арматури, подрібнення, тощо [15].

Адже навіть незначне порушення структури або геометрії гетерогенного виробу, до якого, безумовно, відноситься бетон, може в майбутньому суттєво відбитися на його надійності взагалі.

3. Конструктивне розділення датчиків на дві частини: внутрішню вбудовану та зовнішню рухому (рис. 1, *в*) під час проектування як вимірюваних виробів, так і комплексних ЗВ, іноді частково розв'язує проблему «метрологічної» надійності [16]. Але це не усуває тепер вже сумарні недоліки, які впливають з одноразовості внутрішньої та неточності позиціонування зовнішньої частини.

Адже в цьому випадку залишається одноразовість (а, отже, й великі

витрати) по відношенню до внутрішніх частин засобу вимірювання, а до неї ще й додаються усі проблеми зовнішніх рухомих частин останнього, зокрема певна зв'язність між елементами засобу [17]. При великогабаритних об'єктах з'являється додатковий суттєвий недолік: необхідність зсовувати датчик на велику відстань, що створює передумови для значної динамічної девіації під час руху [18].

Додаткові можливості з'являються тоді, коли на етапі проектування ЗВ виконання ролі внутрішнього елемента комплексного датчика «доручається» частині самого об'єкта (рис. 1, з) [19]. При цьому усуваються всі проблеми «чужорідного тіла» в конструкції останнього та значно спрощується технологія його виготовлення. Але залишаються проблеми позиціонування зовнішньої частини та її руху

Зрозуміло, що в цьому випадку «втручатися» в майбутній процес вимірювання необхідно ще на ранішніх етапах проектування як самого об'єкта, так і метрологічного забезпечення до нього, що, у підсумку, робить цю проблему прерогативою САПР.

Таким чином, результати аналізу світового досвіду дозволяють зробити висновок про те, що значний вклад в точність вимірювань можна зробити лише на етапі проектування методів та засобів для останніх. Однак для цього необхідно розробити нові моделі виникнення та методи компенсації просторової девіації елементів засобів вимірювання в САПР.

5. Методи дослідження

В основу створення окремих підсистем САПР покладено теорію аналізу технічних систем, теорію вимірювань, теорію опору матеріалів та коливань, теорію автоматизованого проектування.

Для розробки ємнісного методу вимірювання щільності частин великогабаритних об'єктів з гетерогенних матеріалів (наприклад, залізобетонних) використовували методи розпізнавання образів та віртуального об'єкта.

Для перевірки адекватності методів, а також точності та достовірності моделей використовували лабораторну та виробничу базу ПАТ «Галененергобудпром» (Львівська обл., Україна).

6 Результати дослідження

6.1. Побудова моделей девіації (відхилень, переміщень, деформацій) елементів комплексних засобів вимірювань

На початку створення моделей елементів комплексних ЗВ виконаємо класифікацію девіації ЗВ за їхнім розташуванням відносно великогабаритного складного об'єкта вимірювання та причинами їхнього виникнення (табл. 1).

Статичні девіації є наслідками механічного або термічного навантаження на елементи метрологічних засобів, яке призвело до деформації та переміщення елементів.

Динамічні: девіації є наслідками механічної взаємодії із приводом та направляючими руху зовнішнього елемента метрологічного засобу або об'єкта.

Таблиця 1

Класифікація девіації елементів комплексних засобів вимірювання за розташуванням та причинами виникнення

Елементи комплексних ЗВ	Причини виникнення девіації		
	статичні	динамічні	технологічні
Внутрішні (вбудовані в об'єкт)	Зсув, поворот, вигін об'єкта вимірювання разом із внутрішніми ЕЗВ	3-D вібрація об'єкта вимірювання разом із внутрішніми ЕЗВ	Відхилення від креслення та зсув внутрішніх ЕЗВ відносно об'єкта вимірювання
Зовнішні по відношенню до об'єкта	Зсув, поворот, вигін зовнішніх ЕЗВ	3-D вібрація зовнішніх рухомих ЕЗВ від приводу та направляючих	Відхилення від креслення та зсув зовнішніх ЕЗВ відносно об'єкта вимірювання

Технологічні: девіації є наслідками порушення технології виготовлення виробів, наприклад, застосування металопрокату, який за розмірами не відповідає проекту виробу, неточності зварювання, металообробки, тощо, неточні встановлення та фіксація металевої арматури в прес-форму і т. п.

Розглянемо плоский конденсатор із паралельними обкладками площиною S на відстані d одна від одної. Ємність такого конденсатора, як відомо, визначається за формулою:

$$C = \varepsilon(\rho)\varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (1)$$

де C – ємність конденсатора, Ф; $\varepsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична постійна; ε – середня діелектрична проникність; ρ – середня щільність діелектрика, кг/м³, розташованого між обкладками конденсатора; S – площа обкладки конденсатора, м²; d – відстань між обкладками, м.

Очевидно, що в реальному засобі вимірювання усі перелічені параметри (крім електричної постійної) можуть бути визначені лише приблизно, а отже реальна ємність є девіацією розрахованої за (1). При цьому загальні моделі статичних девіацій складаються з їхніх елементарних переміщень (рис. 2, а, б, в).

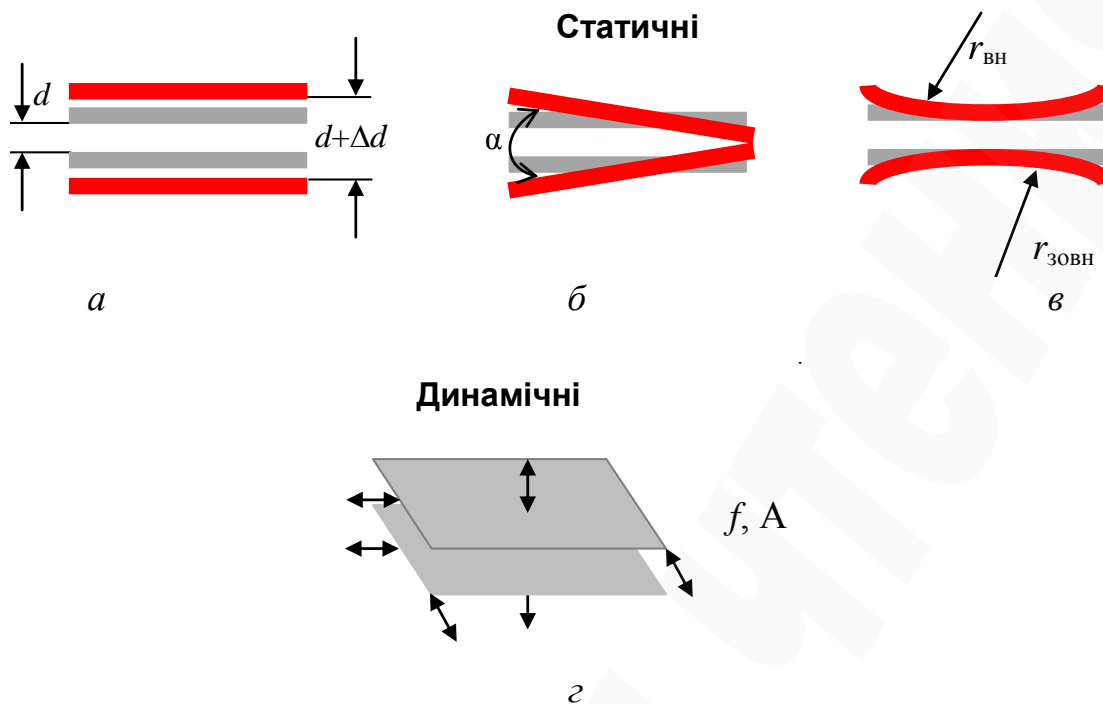


Рис. 2. Схеми елементарних переміщень елементів засобів вимірювання:
a – паралельний зсув; *б* – поворот; *в* – вигин, *г* – 3D-вібрація

Відповідно, математичною формою таких елементарних переміщень є зміна відстані між обкла�ками Δd при паралельному зсуві. Кут відносного повороту обкла�док α , радіуси вигинів обкла�док: внутрішньої $r_{\text{вн}}$ та зовнішньої $r_{\text{зовн}}$, відповідно та параметри коливань – частота f та амплітуда A . Моделі динамічних девіацій обумовлюються 3- D вібрацією технологічного обладнання та ЕЗВ при переміщенні останніх вздовж виробу по направляючих (рис. 2, *г*).

Реальний комплексний конденсатор в складному виробі, наприклад, конденсатор «арматура виробу – зовнішня пластина» в залізобетонному циліндрі, поруч з яким знаходиться ЗВ, звісно не є плоскопаралельним за кресленням і точним за технологією виготовлення. Так, на рис. 3 наведено зовнішній вигляд арматури майбутнього циліндричного великогабаритного (20 м) виробу, яку використовували також в якості внутрішньої вбудованої в об'єкт обкла�дки вже зовсім неплоского конденсатора.

Уявимо собі ідеальний комплексний конденсатор, внутрішньою обкла�динкою якого є сталева арматура виробу, а зовнішньою – деякий металевий елемент, розташований поруч із виробом на конструктивно визначеній відстані від нього (рис. 4, *а*).

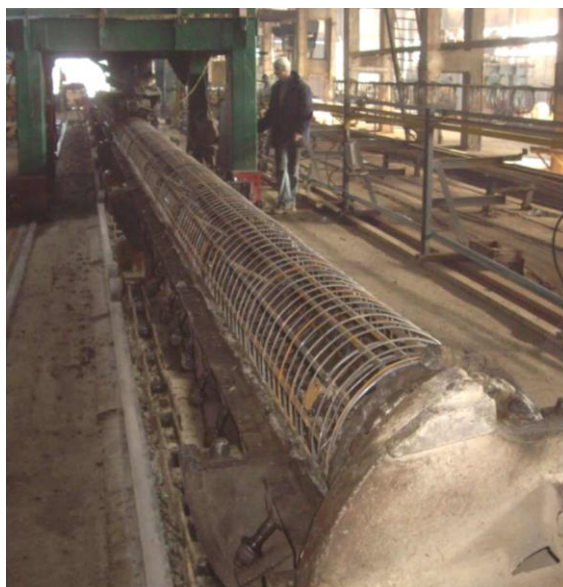


Рис. 3. Загальний вигляд готової зварної арматури для залізобетонного виробу «Опора лінії електропостачання» довжиною 20 м

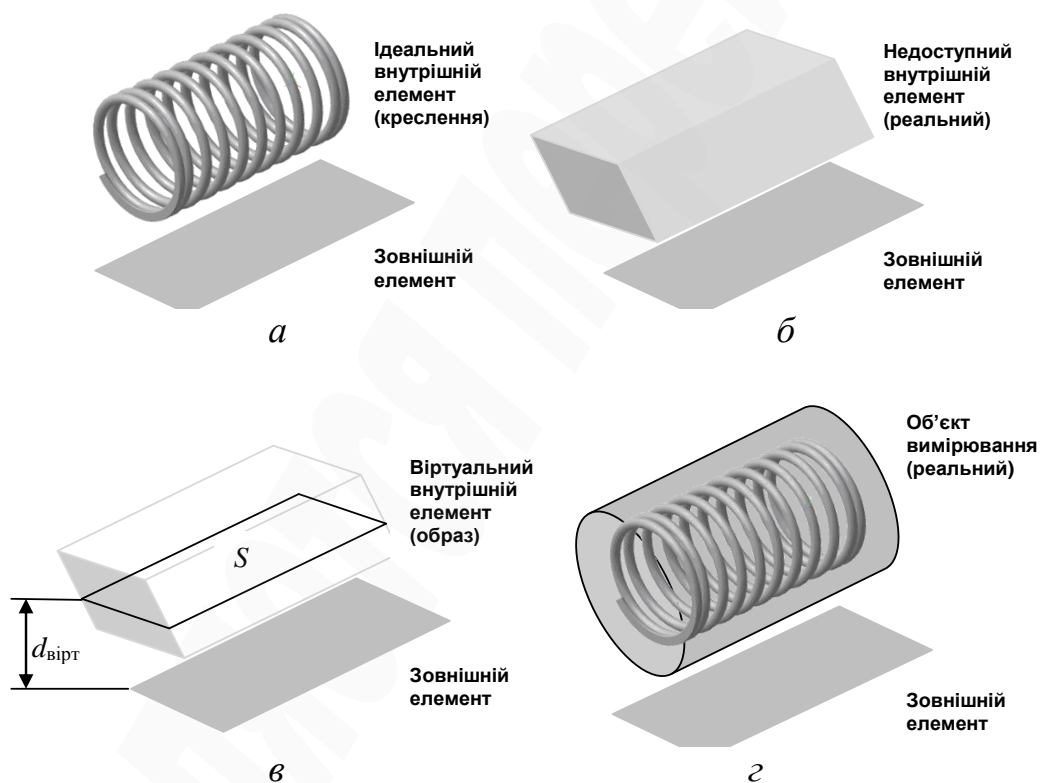


Рис. 4. Моделі конструкції комплексного конденсатора із однією недоступною для спостереження обкладкою:

- a* – модель «ідеального» комплексного конденсатора (за кресленням);
- б* – реальний конденсатор із недоступною для спостереження «внутрішньою» обкладкою; *в* – розпізнаний віртуальний образ реального конденсатора;
- г* – реальний об'єкт під час вимірювання

Зрозуміло, що навіть маючи точні креслення арматури зовнішнього елемента та їхнього взаємного розташування, з-за складності конфігурації

першої значення ємності цього конденсатора теоретично розрахувати вельми складно. З-за тієї ж складності неможливе також точне виготовлення арматури та встановлення її в опалубку перед заливанням. З цього стає очевидним, що й теоретичний розрахунок реальної ємності конденсатора із зазначеною внутрішньою частиною лише за кресленням також неможливий.

Фактично маємо конденсатор із невизначеною та недоступною для безпосереднього моніторингу внутрішньою частиною (рис. 4, б), що не дозволяє застосовувати при вимірюванні щільності бетону формулу (1). А також її пристосований до вимірювання щільності ρ обернений варіант:

$$\rho(\varepsilon) = C\varepsilon_0 \frac{S}{d}. \quad (2)$$

Для визначення ρ в якості результату вимірювання необхідно не тільки мати функцію $\rho(\varepsilon)$ у явному (наприклад, табличному) вигляді та виміряти значення C та S , але й отримати невимірюване значення d .

Для розв'язання останнього завдання застосовували розпізнавання образу реального конденсатора у вигляді рівного йому за ємністю за допомогою методу віртуального об'єкта.

В рамках цього методу будемо шукати віртуальний конденсатор із умовно плоскою внутрішньою обкладинкою, ємність якого $C_{\text{вирт}}$ дорівнювала б ємності $C_{\text{вим}}$ реального вимірюваного конденсатора із повітряним шаром між обкладками для поточного об'єкта, тобто $C_{\text{вим з повітрям}} = C_{\text{вирт}}$. Таким чином отримуємо віртуальний образ реального конденсатора (рис. 4, в).

Вимірювання $C_{\text{вим з повітрям}}$ здійснюється на робочому вимірювальному стенді [20] до заповнення опалубки із арматурою бетоном, тобто тоді, коли місце майбутнього бетону заповнене повітрям.

Далі заповнюємо опалубку із встановленою арматурою бетоном (рис. 4, г), виконуємо друге вимірювання ємності того ж конденсатора, але «з бетоном» і розраховуємо діелектричну проникність останнього за формулою:

$$\varepsilon_{\text{бетон}} = \frac{C_{\text{вим з бетоном}}}{C_{\text{вим з повітрям}}} \quad (3)$$

Для отримання залежності $\rho_{\text{бетону}}$ (а саме цей показник є метою метрологічного процесу) від вимірюваного значення $\varepsilon_{\text{бетон}}$ виконуємо експериментальне тарування засобу вимірювання, використовуючи віртуальне представлення об'єкта (рис. 4, в). Оскільки діелектрична проникність повітря $\varepsilon_{\text{пов}}$ практично дорівнює 1, маємо з (2):

$$d_{\text{вирт}} = \varepsilon_0 \frac{S}{C_{\text{вим з повітрям}}}. \quad (4)$$

Тарування виконували за допомогою окремого плоского конденсатора, в якому відстань між обкладками дорівнювала $d_{\text{вирт}}$. Його результати наведені на рис. 5.

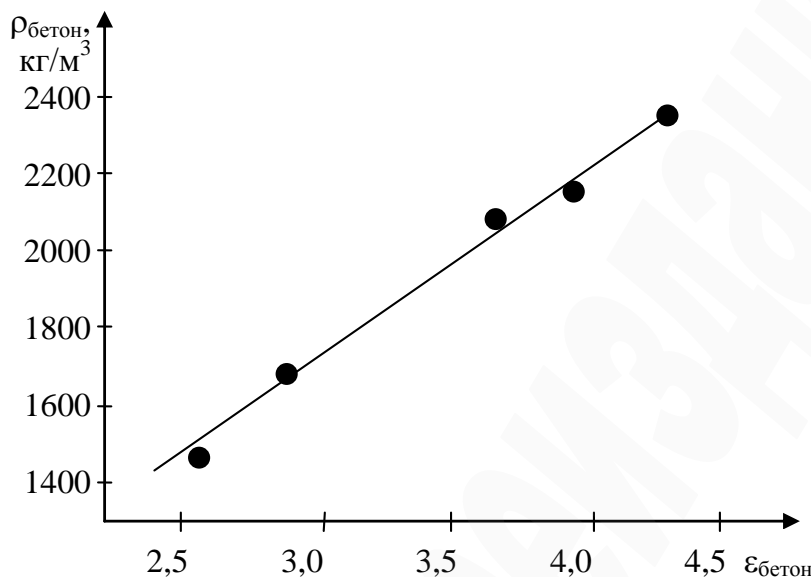


Рис. 5. Результати тарування віртуального конденсатора із $d_{\text{вирт}}=5,73$ см

В результаті були теоретично-експериментально отримані моделі, необхідні для використання в системах автоматизованого проектування комплексних засобів вимірювання щільності бетону, необхідних при управлінні технологічним процесом виготовлення залізобетонних виробів великих розмірів із геометрично складною арматурою.

6.2. Методи компенсації небажаних статичних, технологічних та динамічних девіацій на етапі автоматизованого проектування метрологічних засобів

Будь-яке просторове відхилення елементів вимірюючого пристрою від розрахункового (проектного) положення призводить до погіршення точності вимірювання [21]. Тому надійна компенсація девіацій сприяє підвищенню цієї точності, а отже ефективності управління технологічним процесом, в якому результати вимірювання використовуються в замкнутих циклах.

До методів компенсації небажаних девіацій будь-якого походження були пред'явлені такі вимоги.

По-перше, компенсація повинна відбуватися автоматично по мірі виникнення девіації.

По-друге, компенсація повинна відбуватися в найменші строки.

По-третє, передумовою такої поведінки елементів метрологічного засобу, девіація якого компенсується, повинні бути властивості останнього, закладені на етапі його автоматизованого проектування.

Розглянемо методи компенсації девіацій елементів комплексних засобів вимірювання на прикладі згаданого вище ємкісного методу вимірювання.

Математичний метод передбачає, що усі заходи з компенсації

виконуються лише за рахунок змін до обчислюваних моделей. Наприклад, при відомих законах зміни розмірів та/або конфігурації обкладок вимірюючого конденсатора математична компенсація передбачає введення до формули (1) додаткового коефіцієнта, який обчислюється за формулою:

$$K = \frac{C\Delta d}{\varepsilon_0\rho(\varepsilon)S}. \quad (5)$$

У підсумку маємо:

$$C = K\varepsilon_0\rho(\varepsilon)\frac{S}{d}. \quad (6)$$

Вираз (6) практично застосовний лише у тому випадку, коли проектувальнику відомі закони зміни відстані d під навантаженням та істинне значення C для «паспортного» конденсатора. Ці закони впливають із методів розрахунку деформацій та переміщень в опорі матеріалів.

Як впливає з рис. 4, віртуальна поверхня внутрішньої обкладки завжди плоска. Якщо ж зовнішня обкладка при девіації форми втрачає плоскостність, то формула обчислення ємності (1) значно ускладнюється. Хай, наприклад, у загальному випадку, поверхні $y_1(x_1^{k_1}, x_2^{k_2})$ та $y_2(x_1^{k_3}, x_2^{k_4})$, ємність між якими обчислюється, описуються виразами:

$$\begin{cases} y_1 = x_1^2 + x_2^2; \\ y_2 = -x_1^2 - x_2^2, \end{cases} \quad (7)$$

при обмеженнях:

$$x_{1\min} \leq x_1 \leq x_{1\max}; \quad (8)$$

$$x_{2\min} \leq x_2 \leq x_{2\max}. \quad (9)$$

Тоді ємність між цими поверхнями в межах (6) та (7) можна обчислити як [20]:

$$\begin{aligned} C &= \varepsilon\varepsilon_0 \int_{x_{1\min}}^{x_{1\max}} \int_{x_{2\min}}^{x_{2\max}} \frac{dx_1 dx_2}{|f_1(x_1, x_2) - f_2(x_1, x_2)|} = \\ &= \varepsilon\varepsilon_0 \int_{x_{1\min}}^{x_{1\max}} \int_{x_{2\min}}^{x_{2\max}} \frac{1}{(x_1^2 + x_2^2) - (-x_1^2 - x_2^2)} dx_1 dx_2 = \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 \int_{x_{1\min}}^{x_{1\max}} \int_{x_{2\min}}^{x_{2\max}} \frac{1}{(x_1^2 + x_2^2)} dx_1 dx_2, \end{aligned} \quad (10)$$

Механічний метод передбачає незмінні моделі обробки метрологічної інформації, натомість, сам конденсатор (частіше зовнішні елементи) піддаються геометричній трансформації, яка компенсує девіацію. Розглянемо методи, розроблені для статичних та динамічних девіацій.

Механічна компенсація статичних девіацій. Запропоновані методи компенсації статичних девіацій ЕМЗ розглянемо на прикладі проектування комплексного обладнання для ємнісного вимірювання щільності бетону. У відповідності до формули (1) при зміні d на $d+\Delta d$ необхідно, щоб S автоматично змінювалась на $S+\Delta S$, компенсуючи «додавання» відстані Δd :

$$\Delta S = \frac{C\Delta d}{\varepsilon_0\rho(\varepsilon)}. \quad (11)$$

Фактично таке додавання може здійснюватися, наприклад, зсувом частин обкладки (рис. 6, *а*) або її поворотом (рис. 6, *б*). Зсув або поворот здійснюються за допомогою простого механізму, в якому ΔS та Δd повинні бути зв'язані однозначно, наприклад, рейкового.

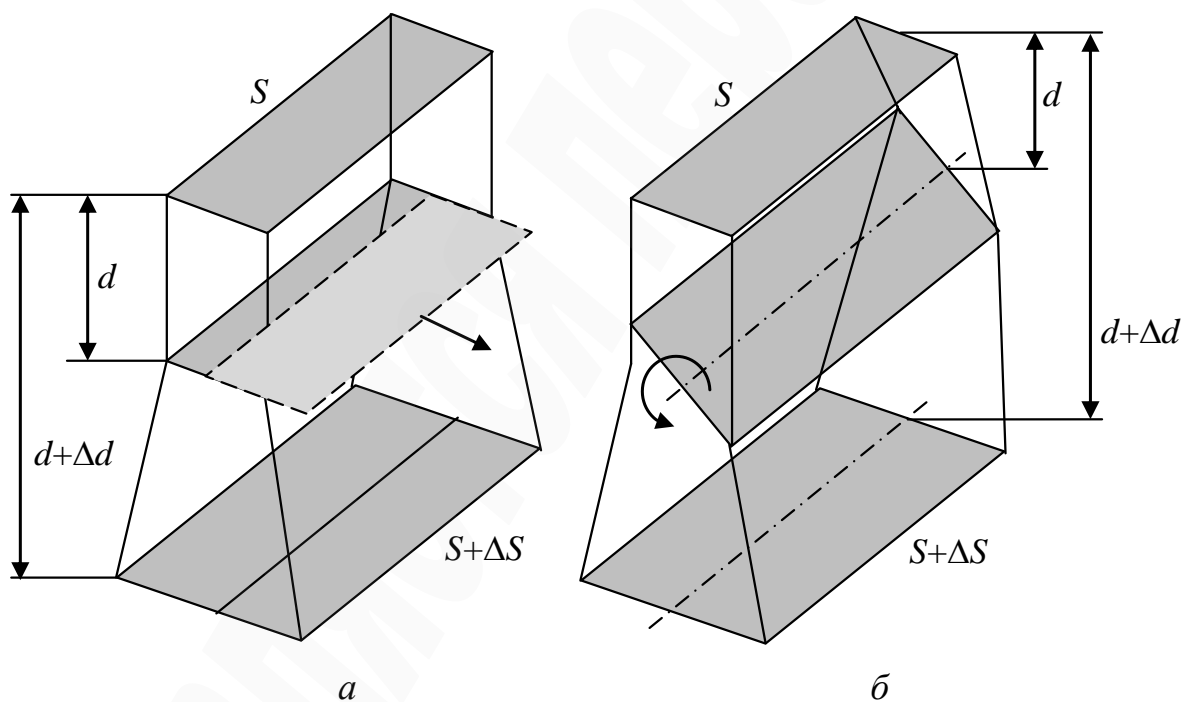


Рис. 6. Схема автоматичної геометричної компенсації збільшення відстані між обкладками збільшенням площі проекції однієї з обкладок:

а – компенсація зсувом; *б* – компенсація поворотом

Механічні компенсатори динамічних девіацій по суті є амортизаторами. В роботі для механічної компенсації динамічних девіацій використовували адаптивні амортизатори. Адаптивними називаються такі системи активної амортизації, параметри яких можуть змінюватися в процесі роботи таким чином, щоб забезпечити мінімум передачі вібрації від двигуна та направляючих

до зовнішнього елемента засобу вимірювання.

Такі системи працюють за двома головними схемами. Перша схема передбачає попередній моніторинг спектру частот механічних відхилень, які розповсюджуються від приводу та направляючих (рис. 7, *a*), і внесення майбутніх компенсуючих дій на попередньому етапі автоматизованого проектування відповідних амортизаторів.

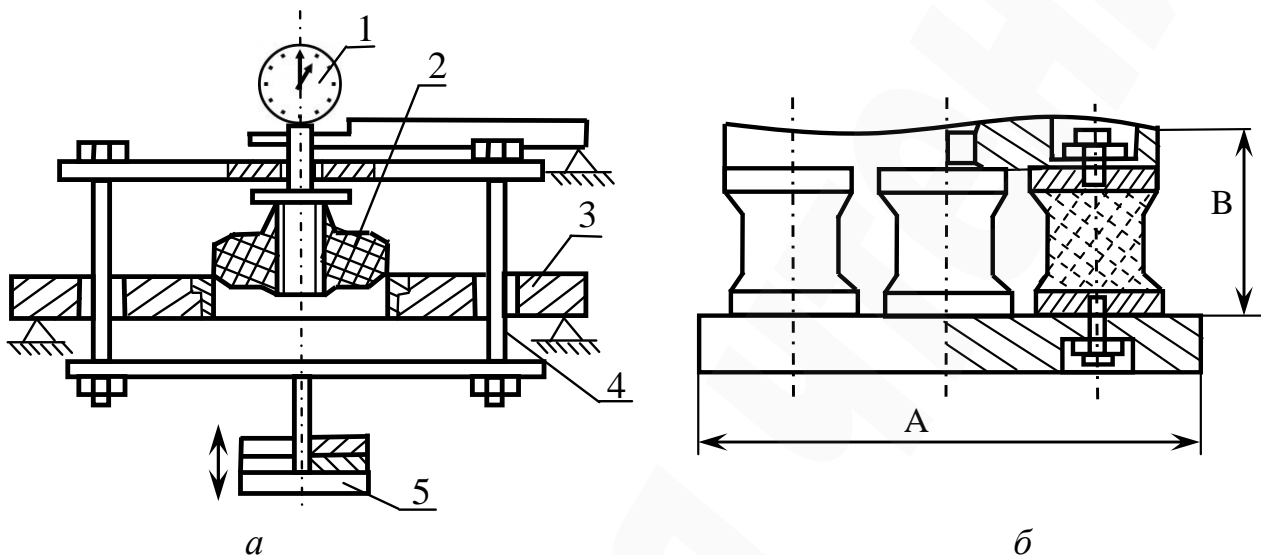


Рис. 7. Амортизатори гумометалеві для приладів по ГОСТ 11679.1-76:
a – схема приладу для попереднього моніторингу спектру частот механічних відхилень; *б* – проект 3-*D* гумометалевого амортизатора;
1 – вимірюючий пристрій; 2 – гумова частина приладу;
3 – нерухома платформа; 4 – скоба; 5 – вантаж

Спектр частот таких коливань відносно широкий [22], і діють вони в усіх напрямках (рис. 2, *г*). Тому амортизатори для їхньої компенсації обирали з класу 3-*D* гумометалевих багат шарових (рис. 7, *б*). Математичними моделями в САПР для їх розрахунку служили моделі електромеханічних фільтрів, використовуваних в радіотехніці [23, 24].

Друга схема передбачає отримання сигналу для адаптації систем амортизації безпосередньо під час пересування рухомих ЕЗВ. Такі системи значно складніші, але вони краще працюють в умовах малопередбачуваних заздалегідь девіацій елементів.

6.3. Практичне використання результатів дослідження

Схема постановки та вирішення завдання вимірювання щільності бетону в великогабаритних об'єктах підвищеної складності наведена на рис. 8.

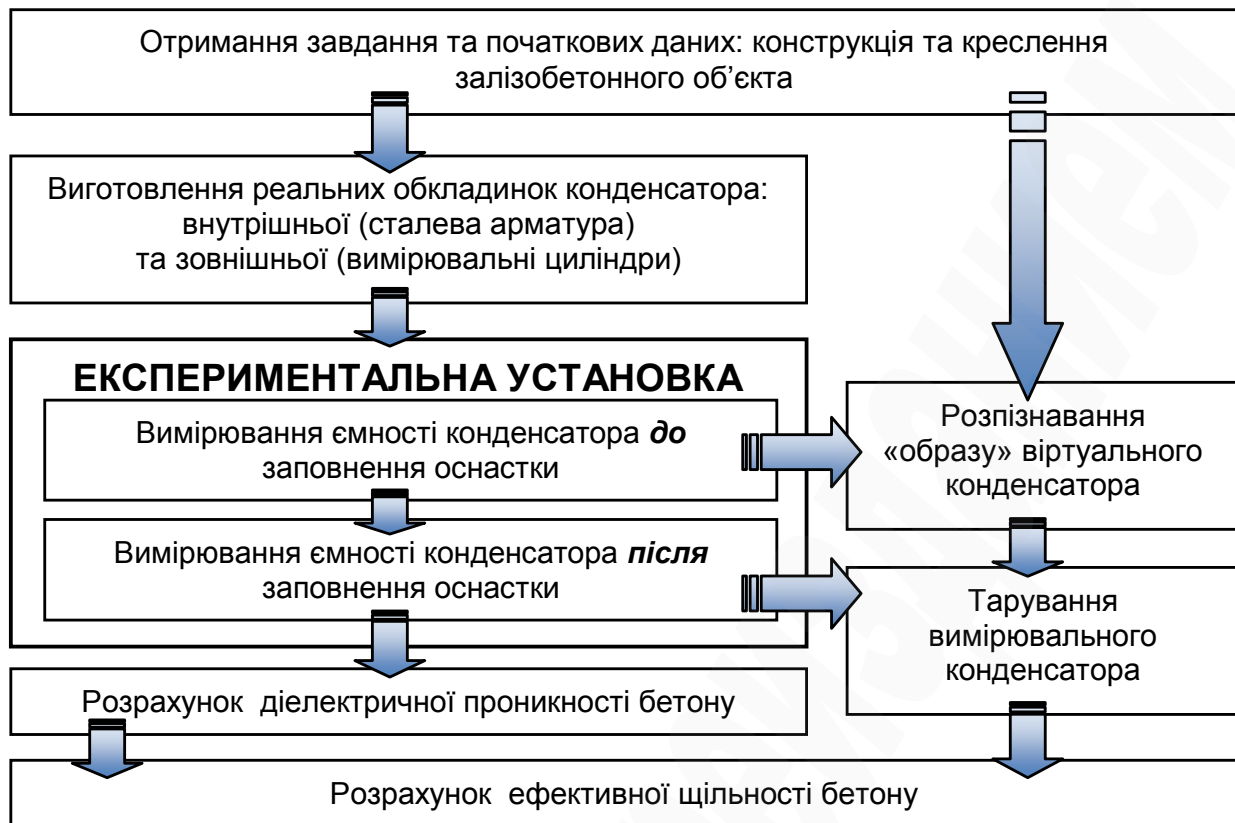


Рис. 8. Схема постановки та вирішення завдань створення засобу та вимірювання щільності бетону в великогабаритних об'єктах підвищеної складності за допомогою САПР «DEVICOM»

Вибір того чи іншого методу випробувань бетону залежить від мети випробування (контроль якості виробів на заводі, вибірковий або суцільний контроль міцності, випробування конструкцій з бетону з невідомими властивостями). Важливо також враховувати форми і розміри виробів (балки, плити, колони, масивні елементи з похилими поверхнями), вид бетону (важкий, пористий, на легкому заповнювачі), а також вимоги до точності одержуваних результатів і зручності проведення випробувань.

Розроблено загальну систему автоматизованого проектування елементів метрологічних засобів «DEVICOM» (*the compensation of deviation*) та її підсистеми для практичного використання. САПР «DEVICOM» дозволяє проектувати великі вимірювальні пристрої, захищені від впливу зовнішніх статичних, технологічних та динамічних навантажень.

За допомогою САПР «DEVICOM» були спроектовані 3-D амортизатори для системи ємнісного вимірювання щільності заповнення оснастки бетонною сумішшю. Амортизатори були призначені для компенсації динамічних відхилень при русі зовнішнього кільця вимірювального конденсатора уздовж залізобетонної опори довжиною 20 м.

На виробничих площах ПАТ «Галененергобудпром» були проведені випробування такого вимірювального конденсатора. Прилад було задіяно в управлінні технологічним процесом виготовлення залізобетонного виробу «Опора лінії електропостачання», що дало, у підсумку, можливість знизити

кількість бракованих виробів на 7,4 %.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. Головним позитивним впливом об'єкта дослідження на свої внутрішні чинники є створена можливість:

- вже на етапі проектування вибрати метод компенсації девіації елементів вимірюваних засобів та приладів;
- розробляти відповідні деталі та механізми компенсаційного вузла;
- завдяки наявним моделям, прогнозувати ступінь та надійність компенсації.

Це дозволяє значно покращити ефективність САПР в цілому, зокрема, – при використанні результатів проектування в управлінні технологічними процесами.

Weaknesses. Головним негативним впливом об'єкта дослідження на свої внутрішні чинники є необхідність повертатися до етапу проектування вимірюваного засобу після зміни конструкції вимірюваного об'єкта.

Opportunities. Перспективи подальших досліджень в цьому напрямку пов'язані як з розвитком теоретичної бази в частині створення нових методів та моделей для проектування вимірювальної техніки, так і з вдосконаленням методів і засобів підвищення точності вимірювання і достовірності результатів останнього.

Threats. Як в будь-якому випадку автоматизованого проектування, основні загрози для цієї діяльності випливають з адекватності використовуваних в САПР моделей предметної галузі. Зважаючи на великі габарити об'єктів проектування та їхню складність, а також на природну розбіжність технологічних параметрів виготовлення послідовних об'єктів серії, що призводить до їхньої постійної девіації, тому підтвердження адекватності необхідно робити частіше.

Раніше компенсаційні вузли використовували для протидії високочастотним коливанням на відносно невеликих об'єктах. Тому повних аналогів пропонованих моделей і методів в проектуванні не існує.

8. Висновки

1. Отримані теоретично-експериментальні віртуальні моделі електричних характеристик елементів засобів вимірювання та моделі їхньої девіації. Моделі використовуються в системах автоматизованого проектування комплексних засобів ємнісного вимірювання щільності бетону, необхідних при управлінні технологічним процесом виготовлення залізобетонних виробів великих розмірів із геометрично складною арматурою.

2. Запропоновані методи компенсації небажаних статичних, технологічних та динамічних переміщень на етапі автоматизованого проектування метрологічних засобів. Методи розподіляються на два класи. Перший – математичні, в яких компенсація виконується виключно за рахунок внесення змін до результатів вимірювання. Другий – механічні, в яких компенсація виконується за рахунок зміни геометрії засобу вимірювання (при статичних

девіація) або амортизації їхніх елементів (при динамічних).

3. Результати досліджень були втілені в підсистемі САПР «DEVICOM», за допомогою якої були спроектовані 3-D амортизатори для системи комплексного ємнісного вимірювання щільності заповнення оснастки бетонною сумішшю. Амортизатори були призначені для компенсації динамічних відхилень при русі зовнішнього кільця вимірювального конденсатора уздовж залізобетонної опори довжиною 20 м. На виробничих площах ПАТ «Галененергобудпром» (Львівська обл., Україна) були проведені випробування такого вимірювального конденсатора. Прилад було задіяно в управлінні технологічним процесом виготовлення залізобетонного виробу «Опора лінії електропостачання», що дало, у підсумку, можливість знизити кількість бракованих виробів на 7,4 %.

Література

1. Baranov V. V. Tekhnologicheskiiy audit predpriyatiya v semi shagakh // Elitarium. TSentr dopolnitel'nogo obrazovaniya. URL: http://www.elitarium.ru/tekhnologicheskijj_audit_predpriyatija/ (Last accessed: 03.05.2016).

2. Osnovni pytannia proektuvannia ta povirky tsyfrovyykh vymiriuvalnykh prykladiv. URL: http://elib.lutsk-ntu.com.ua/book/fepes/pruladobyd/2015/15-07/other/lekcziya_30_osnovni_pytannia_proektuvannia_ta_povirki_czifrovix_vimir_yuval_nix_prykladiv.pdf (Last accessed: 11.01.2018).

3. Selection of metrological support of management of complex foundry objects with hardly measurable parameters / Oborskiy G. A. et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2014. Vol. 6, No. 3 (72). P. 41–47. doi:[10.15587/1729-4061.2014.32420](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.32420)

4. Brignell J. E., Young R. Computer-aided measurement // Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1979. Vol. 12, No. 6. P. 455–463. doi:[10.1088/0022-3735/12/6/002](https://doi.org/10.1088/0022-3735/12/6/002)

5. Kuts Yu. V., Lysenko Yu. Yu., Protasov A. H. Pryntsypy proektuvannia zasobiv elektromahnitnoho neruinivnoho kontroliu: proceedings // Suchasni pryklady, materialy i tekhnologii dlia neruinivnoho kontroliu i tekhnichnoi diahnostryky mashynobudivnoho i naftohazopromyslovoho obladdannia. Ivano-Frankivsk, 2017. P. 44–45.

6. Shherbinskiy V. G., Pafos S. K., Gurvich A. K. Ul'trazvukovaya defektoskopiya: vchera, segodnya, zavtra // V mire nerazrushayushhego kontrolya. 2002. No. 4. P. 18.

7. Stanovskaia T. P., Dukhanyna M. A., Shykyhyreva Yu. V. Infrakrasnyi metod izmereniya teplovykh parametrov zatverdevaniya betona // Kholodylna tekhnika i tekhnologii. 2013. No. 2 (142). P. 112–115.

8. Detection and location of defects in electronic devices by means of scanning ultrasonic microscopy and the wavelet transform / Angrisani L. et al. // Measurement. 2002. Vol. 31, No. 2. P. 77–91. doi:[10.1016/s0263-2241\(01\)00032-x](https://doi.org/10.1016/s0263-2241(01)00032-x)

9. Review of Second Harmonic Generation Measurement Techniques for Material State Determination in Metals / Matlack K. H. et al. // Journal of

Nondestructive Evaluation. 2014. Vol. 34, No. 1. P. 273. doi:[10.1007/s10921-014-0273-5](https://doi.org/10.1007/s10921-014-0273-5)

10. Overview of Sensors and Needs for Environmental Monitoring / Ho C. et al. // Sensors. 2005. Vol. 5, No. 12. P. 4–37. doi:[10.3390/s5010004](https://doi.org/10.3390/s5010004)

11. Yakovlev M. Yu., Volobuev A. P. Otsinka metrolohichnoi nadiinosti zasobiv vymiriualnoi tekhniky aviatsiinykh radiotekhnichnykh system na etapi proektuvannia // Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. 2007. No. 2. P. 53–55.

12. Mishhenko S. V., Tsvetkov E. I., Chernyshova T. I. Metrologicheskaya nadezhnost' izmeritel'nykh sredstv. Moscow: Mashinostroenie, 2001. 96 p.

13. Chinkov V. N., Mel'nichenko A. E. Izbytochnaya model' nadezhnoy ekspluatatsii sredstv izmeritel'noy tekhniki // Ukrainskiy metrologicheskii zhurnal. 2004. No. 2. P. 57–60.

14. Prokopovych Y. V., Dukhanyna M. A., Monova D. A. Upravlenie svoistvamy strukturochuvstvytelnykh ob'ektov lyteinoho proyzvodstva // Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu. 2013. No. 2 (41). P. 13–18.

15. Mekhanichni metody neruinivnoho kontroliu mitsnosti betonu. BudMaister. URL: <http://budmayster.pp.ua/1511-mehanchn-metodi-neruynvnogo-kontrolyu-mcnost-betonu.html> (Last accessed: 11.11.2017).

16. Yakovlev M. Y., Volobuyev A. P. Evaluation of the metrological reliability of the means of measuring techniques of the aircraft radio systems: proceedings // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. Lviv-Slavske, 2006. P. 591–592. doi:[10.1109/tcset.2006.4404644](https://doi.org/10.1109/tcset.2006.4404644)

17. Optymizatsiia zviaznosti elementiv v zadachakh avtomatyzovanoho proektuvannia system / Stanovskiy O. L. et al. // Visnyk naukovykh prats NTU «KhPI». 2015. No. 49 (11/58). P. 170–175.

18. Porter B. E. Handbook of Traffic Psychology. Norfolk: Old Dominion University, 2011. 536 p. doi:[10.1016/c2009-0-01975-8](https://doi.org/10.1016/c2009-0-01975-8)

19. Rao, P. Manufacturing Technology: Foundry, Forming And Welding. New Delhi: Tata McGraw Hill, 2008. 485 p.

20. Metrolohichne zabezpechennia kontroliu shchilnosti heterohennykh materialiv / Prokopovych I. V. et al. // Visnyk NTU «KhPI»: Mekhaniko-tekhnologichni systemy ta kompleksy. 2016. No. 50 (1222). P. 22–28.

21. Measurement Error (Observational Error). Statistics How To. 2016. URL: <http://www.statisticshowto.com/measurement-error/> (Last accessed: 21.12.2017).

22. Stanovskaya T. P., Tonkonogiy V. M., Oparin A. V. Avtomatizirovannoe proektirovanie mekhanizmov s vnutrenney vibrozashhitoy // Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya. 2005. No. 2. P. 107–109.

23. Szhul'gin K. Osnovnye parametry diskovykh EMF na chastotu 500 kGts // Radio. 2002. No. 5. P. 59–61.

24. Carr J. J. Radio Society of Great Britain. RF components and circuits. Oxford: Newnes, 2002. P. 34–65. doi:[10.1016/b978-075064844-8/50004-9](https://doi.org/10.1016/b978-075064844-8/50004-9)