

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ДІЕЛЕКТРИЧНОГО ПОКРИТТЯ НА МЕТАЛЕВІЙ ПОВЕРХНІ

В статті проаналізовано задачу створення інформаційно-виміральної системи для визначення товщини діелектричного покриття на металевих поверхнях. Запропонований варіант системи автоматичного регулювання процесом нанесення покриття. Запропонований новий вид вимірального перетворювача для використання у безперервному режимі вимірювань, обґрунтована доцільність використання такого перетворювача в умовах промислового виробництва.

Ключові слова: інформаційно-виміральною системою, виміральною перетворювачем, товщиною, покриття, керування.

Вступ

В сучасній промисловості, при нанесенні різноманітних діелектричних покриттів на металеві поверхні виникає необхідність контролювати товщину таких покриттів для забезпечення оптимального співвідношення якості – витрати. В умовах сучасної ринкової економіки доводиться постійно нарощувати темпи виробництва, не знижуючи при цьому показники якості, залишаючи рівень витрат мінімальним. Процес нанесення діелектричних покриттів на металеві поверхні в умовах промислового виробництва як правило автоматизовано, а готова продукція (металеві елементи покриті шаром захисного діелектричного покриття) сходить з конвеєра неперервним потоком. А от процес контролю якості таких покриттів залишається на рівні лабораторного аналізу, для якого з великої партії готової продукції вибирається один – два зразки, за результатами дослідження яких робиться висновок про якість всієї партії. Окрім того, що такий підхід не дає адекватної оцінки якості, він ще й вимагає багато часу.

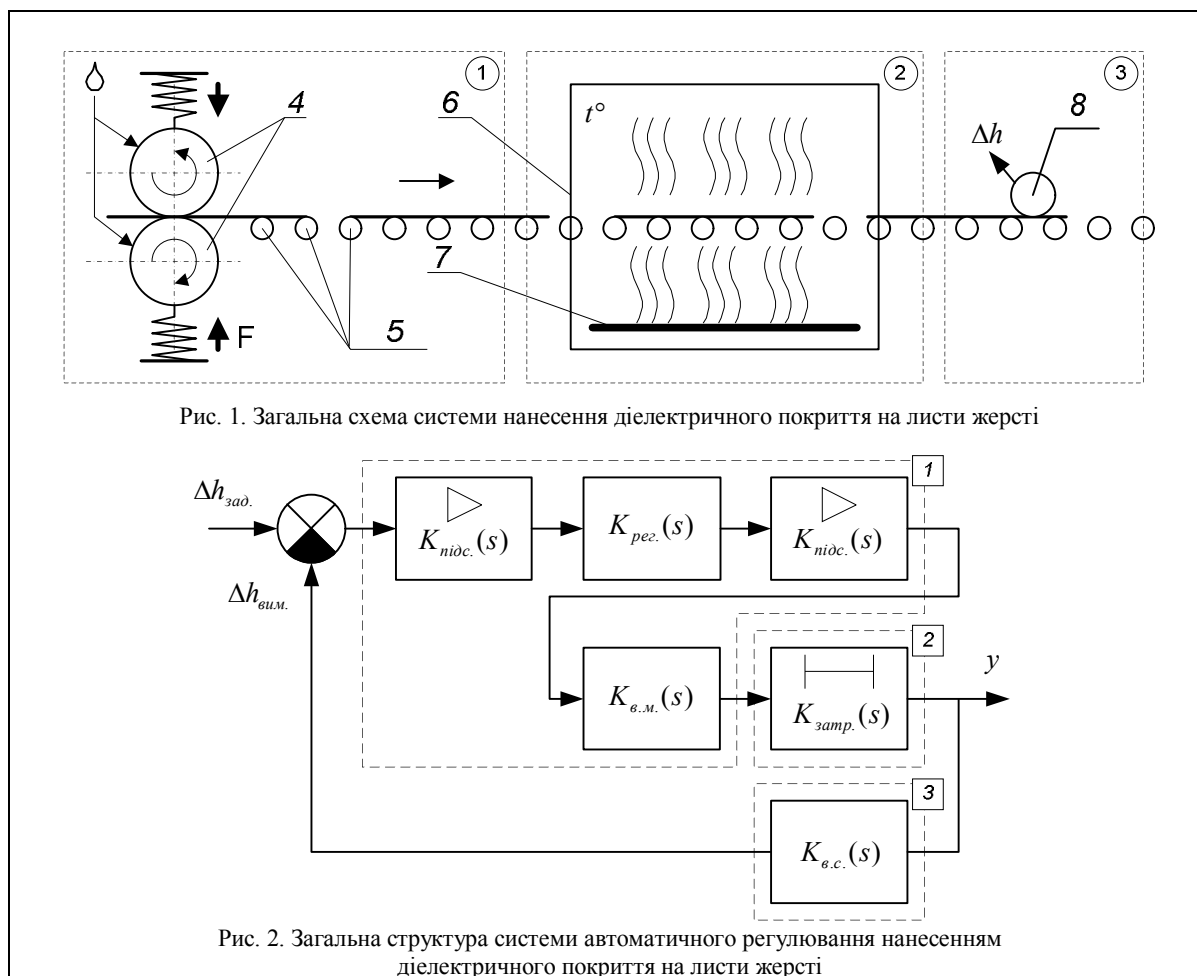
Тому актуальною є задача створення інформаційно-виміральної системи для автоматичного визначення товщини діелектричного покриття металевих поверхонь.

Постановка задачі дослідження. Розробити концептуальні, структурні та математичні засади для створення інформаційно-виміральної системи у комплексі автоматичного регулювання процесу нанесення діелектричного покриття на металеві поверхні на основі нового виду вимірального перетворення.

Аналіз проблеми. Вирішення поставленої вище задачі пов'язане з більш широкою проблемою отримання та опрацювання виміральної інформації, та створення взаємодії з виконуючими органами системи нанесення покриття на металеві поверхні. В

конкретному випадку, для процесу нанесення діелектричних покриттів на металеві листи жерсті загальна структура системи має вигляд представлений на рис. 1. Процес нанесення лакофарбового покриття на металеві листи жерсті відбувається у першій зоні умовно показаній на рисунку цифрою 1. Процес нанесення покриття відбувається під час проходження листа жерсті крізь вали 4 змочені лаком, а товщина лакового покриття що утворюється на листі жерсті регулюється силою стискання валів. Одразу після нанесення лакового покриття листи жерсті по конвеєрній стрічці 5 потрапляють у зону сушіння 2. На протязі визначеного проміжку часу в камері для сушіння 6 нагрівачем 7 відповідно до заданих технологічних умов, створюється висока температура, покриття твердне, набуваючи потрібних захисних властивостей. Вимірювання товщини нанесеного покриття доцільно проводити після процесу затвердіння матеріалу покриття, і набуття ним сталих механіко-експлуатаційних характеристик. Зона вимірювання товщини покриття позначена на рис. 1 цифрою 3. В границях виміральної зони розташовуються засоби вимірювання товщини покриття 8. В загальному випадку товщина нанесеного покриття h є функцією від сили, що прикладена до валу F і інших факторів. Для спрощення аналізу зробимо припущення про те, що при затвердінні діелектричне покриття набуваючи захисних властивостей змінює свою товщину у незначних межах і цими змінами можна знехтувати. Тому вважатимемо, що товщина покриття залежить тільки від значення сили прикладеної до валу.

Проведені дослідження показали, що залежність товщини покриття від сили, з якою вали тиснуть на оброблювану поверхню має наближений до лінійного характеру, а тому у визначених межах може бути апроксимована прямою.



Теоретичні засади побудови комплексу автоматичного регулювання

Для дотримання оптимального ходу технологічного процесу необхідно оперативно отримувати достовірну інформацію про значення товщини лакофарбового покриття. Дану задачу пропонується вирішувати за допомогою виміральної системи яка інтегрована в комплекс управління технологічним процесом нанесення лакофарбового покриття на металеві поверхні. Об'єкт контролю нанесення діелектричного покриття на металеві поверхні можна представити передатною функцією другого порядку з запізненням. Загальна структура системи автоматичного регулювання буде мати вигляд представлений на рис. 2., де $K_{\text{підс.}}(s)$ – підсилювач; $K_{\text{рег.}}(s)$ – регулятор; $K_{\text{в.м.}}(s)$ – виконуючий механізм (зона нанесення покриття з виконуючими механізмами позначена на загальній схемі цифрою 1); $K_{\text{затр.}}(s)$ – затримка (зона сушіння позначена цифрою 2 на загальній схемі нанесення діелектричного покриття на листи жерсті); $K_{\text{в.с.}}(s)$ – вимірвальна система з жорстким зворотним зв'язком (позначена на загальній схемі цифрою 3). Для побудови системи регулювання був використаний стандартний підхід побудови систем з від'ємним зворотним зв'язком.

Розробка виміральної системи

Для вимірювання товщини діелектричних покриттів металевих поверхонь в умовах конвеєрного виробництва сучасної промисловості використовують в основному контактні методи вимірювання. Безконтактні методи вимірювання товщини покриття хоча і дозволяють уникати фізичного контакту деталей та механізмів виміральної системи з поверхнею об'єкту вимірювання, що запобігає псуванню поверхні покриття, однак є складними у реалізації та мають багато обмежень у використанні. Застосування відомих засобів та методів вимірювання товщини діелектричного покриття металевих поверхонь з контактним принципом роботи не дозволяє проводити вимірювання рухомих об'єктів, тому пропонується вдосконалений контактний вимірвальний перетворювач придатний до використання з рухомими об'єктами вимірювань.

Вимірвальний перетворювач побудований на базі індуктивного вимірального перетворювача з часовим представленням інформації [1]. Запропонований вимірвальний перетворювач виконаний у формі циліндра, радіальна поверхня якого поділена на сектори. Кожен сектор містить коливальний LC-контур осердя котушки індуктивності якого розташовується радіально, а вільні кінці осердь є утво-

рюючими частинами циліндричної поверхні. Причому, під час вимірювання, циліндрична сенсорна поверхня вимірювального перетворювача вільно перекочується по вимірювальній поверхні. Це дозволяє здійснювати безперервний режим вимірювань без механічних пошкоджень вимірювальних поверхонь і реалізувати спосіб вимірювання товщини діелектричних покриттів металевих поверхонь [2].

Схематичне зображення вимірювального перетворювача показано на рис. 3.

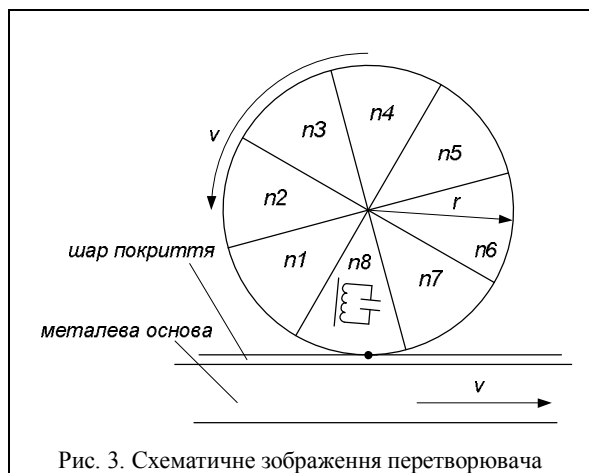


Рис. 3. Схематичне зображення перетворювача

Кількість коливальних контурів у вимірювальному перетворювачі прийемо $n = 8$, а вісі симетрії осердь кожної з котушок рівномірно розташовані по колу. Припустимо, що вимірювання будуть проводитись при обертанні вимірювального перетворювача з торканням поверхні об'єкта без проковзування при постійній швидкості об'єкта вимірювання v . В ідеальному випадку точка торкання вимірювального перетворювача з поверхнею покриття буде пересуватись по периметру перетворювача з тією ж лінійною швидкістю v . Тоді час торкання поверхні одного з восьми вимірювальних секторів буде дорівнювати:

$$t_{\text{вим}} = 1/(vn), \quad (1)$$

де $t_{\text{вим}}$ – час на протязі якого поверхні об'єкта буде торкатись один сектор вимірювального перетворювача; l – довжина кола вимірювального перетворювача. Як видно з формули (1) час торкання сектора залежить тільки від швидкості з якою рухається об'єкт вимірювання і може бути різним для кожного з секторів при нерівномірній швидкості руху об'єкта.

Еквівалентна електрична схема вимірювального перетворювача наведена на рис. 4.

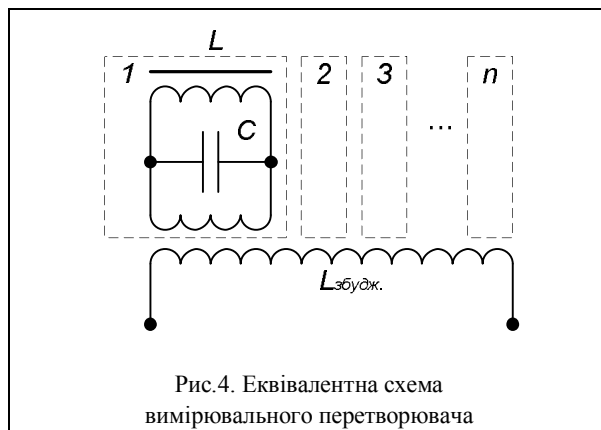


Рис.4. Еквівалентна схема вимірювального перетворювача

Як видно з рис. 4 вимірювальний перетворювач складається з n однакових чутливих елементів. Кожен з таких елементів містить коливальний LC-контур індуктивно зв'язаний з котушкою збудження $L_{\text{збудж}}$, яка конструктивно розташовується на вісі обертання вимірювального перетворювача таким чином, що при обертанні вимірювального перетворювача відбувається збудження саме того чутливого елемента який знаходиться в положенні вимірювання, тобто осердя котушки чутливого елемента торкається поверхні покриття і складає з поверхнею покриття кут близький до прямого.

В загальному випадку тривалість перехідного процесу після збудження котушки індуктивності контуру вимірювального сенсора, з урахуванням того, що контур працює у резонансному режимі вільних коливань, визначатиметься із співвідношення:

$$\tau_k = \frac{2L}{Z_0 + Z_{\text{вн}}}, \quad (2)$$

де τ_k – постійна часу згасання коливань збуджених у коливальному контурі перетворювача; L – індуктивність котушки; Z_0 – повний опір котушки при відсутності в її полі електропровідного матеріалу; $Z_{\text{вн}}$ – додатковий опір (внесений), який виникає при появі в полі котушки електропровідного матеріалу. Проведені дослідження [1] показують, що внесений опір $Z_{\text{вн}}$ залежить від розмірів, провідності, орієнтації та інших параметрів електропровідного матеріалу основи, а залежність для визначення часу згасання вільних коливань в коливальному контурі вимірювального перетворювача з урахуванням відзначених параметрів приймає вигляд (3):

$$\tau_k = \frac{-2L \frac{K}{Z_0} (9 + 54P + 81P^2 + 4\beta^4 P^2)}{(-9K - 54KP - 81KP^2 - 4K\beta^4 P^2 + 4Y\beta^2 P^2 \frac{K}{Z_0} + 6Y\beta^2 \sqrt{\frac{2K}{Z_0} - 18} + 4Y\beta^4 P \sqrt{\frac{2K}{Z_0} + 18} + 18\beta^2 P \sqrt{\frac{2K}{Z_0} - 18})}, \quad (3)$$

де τ_k – час згасання вільних коливань збуджених у коливальному контурі чутливого елемента вимірювального перетворювача; $K = Z_0 \sqrt{81 + 16\beta^4}$;

$P = \text{th}\left(\frac{1}{4}\gamma\right)$; $Y = \pi f M_0 e^{-6h/d_e}$; $\beta = \frac{d_e}{2} \sqrt{2\pi f \mu \sigma}$;
 $\gamma = 4h_b / d_e$; h – товщина покриття; h_b – товщина

основи; d_e – еквівалентний діаметр котушки індуктивності; μ – магнітна провідність матеріалу металевої поверхні; σ – питома електропровідність матеріалу металевої поверхні.

Графічний результат комп'ютерного моделювання залежності часу згасання вільних коливань у коливальному контурі вимірювального перетворювача з заданими параметрами $L = 355\mu\text{H}$, $C = 0,22\mu\text{F}$, при товщині металевої основи $h_b = 1,2\text{ мм}$, від товщини діелектричного покриття, показаний на рис. 5.

Отримана залежність має близький до лінійного характер в діапазоні вимірюваних товщин, що дозволяє застосовувати запропонований вимірювальний перетворювач без додаткової лінеаризації його характеристик.

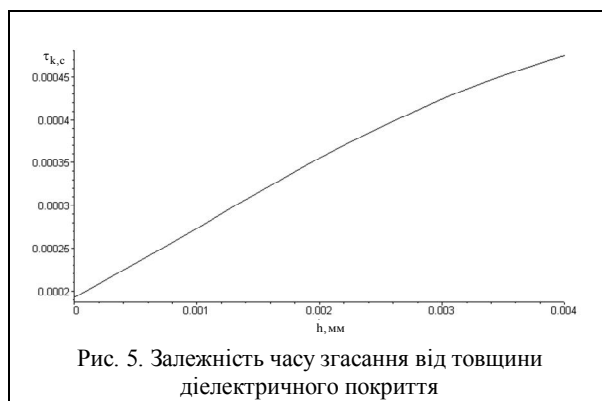


Рис. 5. Залежність часу згасання від товщини діелектричного покриття

Як видно з рис. 5 тривалість згасання вільних коливань у коливальному контурі вимірювального перетворювача при зміні товщини покриття від 0 до 0,004 мм змінюватиметься від 0,0002 до 0,00045 с. Це свідчить про високу чутливість вимірювального перетворювача, а застосування сучасних засобів вимірювання часових інтервалів дозволяє отримувати високу роздільну здатність.

Як вже відмічалось вище, вимірювання потрібно проводити в моменти часу коли осердя котушки індуктивності чутливого елемента знаходиться в положенні близькому до перпендикулярного. Тому виникає необхідність відслідковувати кутове положення вимірювального перетворювача відносно об'єкту вимірювання. Для цього доцільно використати вимірювальний перетворювач характеристик обертованих рухів [2], який конструктивно буде об'єднаний з вимірювальним перетворювачем товщини покриття.

Вимірювальний перетворювач характеристик обертованих рухів складається з джерела випромінювання, модулятора здатного відбивати випромінювання та приймача випромінювання відбитого від модулятора. Модулятор нанесено на вал обертання і виконано таким, що при обертанні вала на виході вимірювального перетворювача пропорційно до кута повороту змінюється напруга. Зміна напруги від кута повороту визначається з рівняння перетворення:

$$U(\psi) = \begin{cases} p \cdot \frac{1}{2} \frac{R\ell\psi\varphi}{\pi} + \frac{1}{4} \frac{R\ell\varphi^2}{\pi}, & \psi \in [0; 2\pi - \varphi]; \\ p \cdot \frac{1}{4} \frac{R\ell(\psi^2 + 4\psi\varphi - 8\psi\pi - 8\varphi\pi + 12\pi^2 + 2\varphi^2)}{\pi}, & \psi \in (2\pi - \varphi; 2\pi), \end{cases} \quad (4)$$

де p – коефіцієнт пропорційності; R – радіус вала на який нанесено модулятор; ℓ – ширина модулятора; ψ – кут повороту модулятора; φ – кут під яким видно ширину чутливої зони модулятора з центру обертання. Оскільки інформативною є частина сигналу яка відповідає кутам повороту вала від 0 до $2\pi - \varphi$, то функція перетворення прийме вигляд:

$$U(\psi) = p \cdot \frac{1}{2} \frac{R\ell\psi\varphi}{\pi} + \frac{1}{4} \frac{R\ell\varphi^2}{\pi}. \quad (5)$$

Форма залежності вихідної напруги вимірювального перетворювача від кута повороту зображена на рис. 6.

Лінійна швидкість переміщення металевої основи з нанесеним покриттям є відносно невеликою, а оскільки тривалість перехідного процесу в коливальному контурі чутливого елемента вимірювального перетворювача набагато менша за час вимірювання $t_{\text{вим}}$ тому вважатимемо, що в процесі одноразового вимірювання вимірювальний перетворювач є нерухомий по відношенню до об'єкту вимірювання, а кількість збуджень коливального LC-контур перетворювача на протязі часу вимірювання може досягати десятків раз. Причому, максимальна кількість імпульсів на одному секторі складатиме:

$$N_{\text{ім}} = \frac{t_{\text{вим}}}{t_{\text{ім}}}. \quad (6)$$



Рис. 6. Залежність вихідної напруги вимірювального перетворювача обертованих рухів від кута повороту

За результат вимірювання в такому випадку потрібно брати усереднене значення вимірювань на одному секторі вимірювального перетворювача, а загальну інформацію про товщину покриття отримаємо по результатам вимірювання за визначену кількість обертів вимірювального перетворювача. Така статистична обробка результатів вимірювань суттєво підвищує точність і зменшує як загальну похибку, так і невизначеність кінцевого результату вимірювань.

Для визначення положення точки торкання вимірювального перетворювача відносно секторів доцільно використати вимірювальний перетворювач для визначення кількості обертів, кутової швидкості та кутового прискорення [4] який дозволяє врахувати динаміку поведінки обертального руху вимірювального перетворювача.

Таким чином, в розробленій інформаційно-вимірювальній системі будуть функціонувати три вимірювальних канали: канал вимірювання температури; канал вимірювання товщини діелектричного покриття; канал вимірювання характеристик обертальних рухів. Канал вимірювання температури побудований на класичних засадах. Він забезпечує комплекс автоматичного регулювання технологічного процесу інформацією про значення температури на відповідальних ділянках цього процесу. Канали вимірювання товщини покриття і характеристик обертальних рухів побудовані на нових засадах. Їх об'єднує та обставина, що в обох каналах інформація про значення вимірюваних фізичних величин формується у вигляді часових інтервалів. А оскільки сучасні засоби вимірювання часових

інтервалів є простими, надійними і найточнішими у вимірювальній техніці в цілому, тому розроблена ІВС найкраще виконує поставлену задачу.

Об'єднана часова діаграма комп'ютерного моделювання роботи вимірювальних каналів товщини і характеристик обертального руху показана на рис. 7.

У наведеній на рис. 7 діаграмі використані такі позначення: $U_{пор}$ – напруга на виході вимірювального перетворювача обертальних рухів; $n1 \dots n8$ – зони часових проміжків дотикання сегментів робочих поверхонь відповідних чутливих елементів вимірювального перетворювача товщини покриття, вони визначаються за часовими моментами досягнення заданих рівнів напруги $U_{пор}$; $U_{вп}$ – напруга на виході вимірювального перетворювача товщини покриття; $U_{комп.Н}$ і $U_{комп.Л}$ – значення рівнів амплітуди за якими проводиться визначення часового інтервалу $t_{зе}$ згасання вільних коливань збуджених в контурі вимірювального перетворювача і визначається товщина покриття [3].

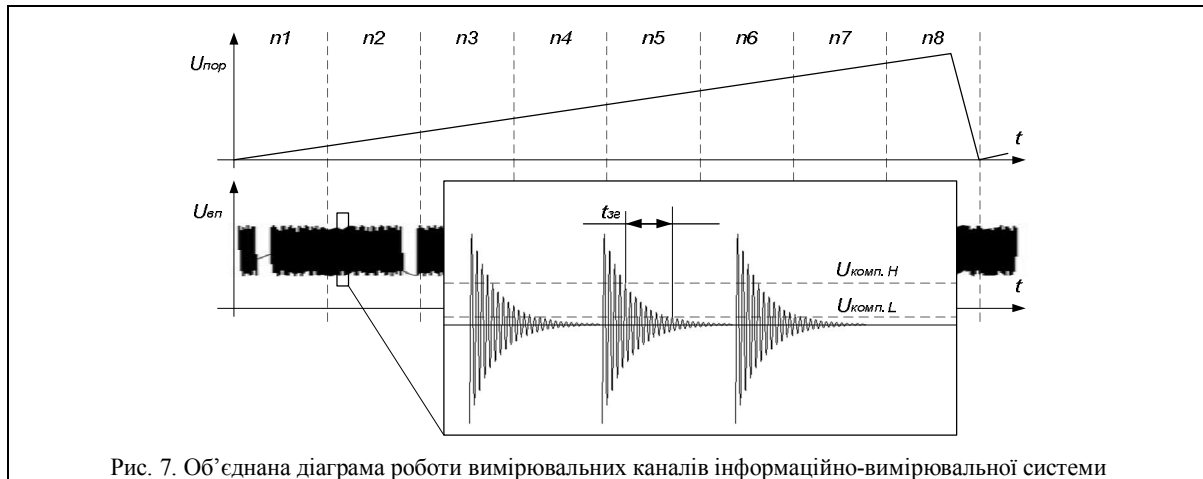


Рис. 7. Об'єднана діаграма роботи вимірювальних каналів інформаційно-вимірювальної системи

Висновки

В статті розроблені концептуальні, структурні і математичні засади для побудови інформаційно-вимірювальної системи для визначення товщини діелектричного покриття на металевих поверхнях, які можуть перебувати в русі. Обґрунтовано пропонуються нові принципи побудови вимірювальних каналів, які здатні забезпечити суттєві метрологічні і функціональні переваги по відношенню до відомих. Застосування розробленої інформаційно-вимірювальної системи в комплексі автоматичного регулювання технологічного процесу нанесення діелектричного покриття на металеві поверхні вирішує задачу його безперервного оптимального регулювання.

Список літератури

1. Шабатура Ю.В. Дослідження вимірювальних перетворювачів товщини діелектричного покриття металевих поверхонь з часовим представленням інформації / Ю.В. Шабатура, К.В. Овчинников // Вісник Національного

університету «Львівська політехніка». Сер. Автоматика, вимірювання та керування. – 2006. – № 551. – С. 63-68.

2. Шабатура Ю.В. Моделювання вимірювального перетворювача для визначення характеристик обертальних рухів / Шабатура Ю.В., Овчинников К.В. // Міжнародний науково-технічний журнал «Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології». – 2005. – № 2 (10). – С. 181-186.

3. Пат. 26546 Україна, МПК G01B 5/00. Спосіб вимірювання товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях / Шабатура Ю.В., Овчинников К.В.; Власник Вінницький національний технічний університет. – № u200705608; дата подання заявки 21.05.2007; опублікований 25.09.2007, Бюл. №15. – 4 с..

4. Пат. 9702. Україна, МПК 7 G01P1/00. Вимірювальний перетворювач для визначення кількості обертів, кутової швидкості та кутового прискорення / Шабатура Ю.В., Овчинников К.В.; Власник Вінницький національний технічний університет. – № u200502298; дата подання заявки 14.03.2005; опублікований 17.10.2005, Бюл. №10. – 3 с.

Надійшла до редколегії 27.04.2009

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних сил ім. І. Кожедуба, Харків.

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Ю.В. Шабатура, Н.В. Чёрный, К.В. Овчинников

В статье проанализирована задача создания информационно-измерительной системы для определения толщины диэлектрического покрытия на металлических поверхностях. Предложен вариант системы автоматической регуляции процессом нанесения покрытия. Предложен новый вид измерительного преобразователя для использования в непрерывном режиме измерений, обоснована целесообразность применения такого преобразователя в условиях промышленного производства.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, измерительный преобразователь, толщина, покрытие, управление.

**INFORMATIVELY-INSTRUMENTATION SYSTEM FOR DETERMINATION OF THICKNESS OF DIELECTRIC COVERAGE
ON A METALLIC SURFACE**

Yu.V. Shabatura, N.V. Chorniy, K.V. Ovchinnikov

In the article the task of creation is analysed to informatively-instrumentation systems for determination of thickness of dielectric coverage on metallic surfaces. The variant of the system of automatic control is offered by the process of applying. The new type of measuring transformer is offered for the use in the continuous mode of measuring, expedience of application of such transformer is grounded in the conditions of industrial production.

Keywords: informatively-instrumentation system, measuring transformer, thickness, coverage, management.