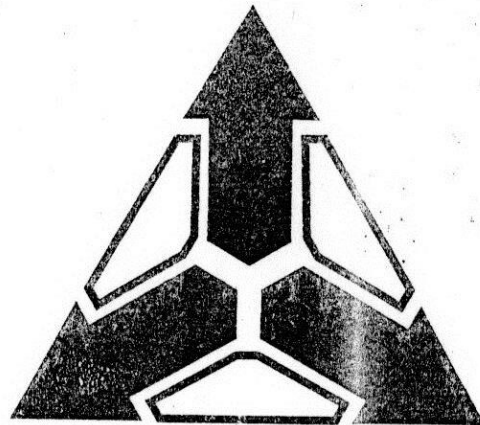


# **Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах**



**Збірник наукових праць  
випуск №7 (2000)**

**За результатами  
VII науково-технічної конференції  
“Вимірювальна та обчислювальна техніка  
в технологічних процесах”**

**(25-27 травня 2000р., м.Хмельницький)**

**Хмельницький 2000**

# **Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах**



**Збірник наукових праць**  
випуск №7(2000)

присвячується 10-річчю кафедри  
“Конструювання радіоелектронних засобів”  
Технологічного університету Поділля

За результатами

VII науково-технічної конференції  
*“Вимірювальна та обчислювальна техніка  
в технологічних процесах”*  
(25-27 травня 2000р., м. Хмельницький)

Хмельницький 2000

Підготовлено редакцією та рекомендовано до друку  
редакційною колегією міжнародного науково-технічного журналу  
*“Вимірювальна та обчислювальна техніка  
в технологічних процесах”*

Редакційна колегія:

к.т.н. О.А. Вдовін, д.т.н. В.І. Водотовка, к.х.н.В.А. Венгржановський,  
д.х.н. Л.І. Ганзюк, к.т.н. Г.Ф. Гордієнко, д.т.н. В.Б. Дудикевич,  
д.т.н. В.М. Локазюк, к.ф.-м.н. В.В. Календін, д.т.н. С.А. Кравченко,  
д.т.н. Г.О. Козлик, д.т.н. В.П. Кожем'яко, к.т.н. В.Т. Кондратов,  
к.т.н. В.Д. Косенков, д.т.н. І.В. Кузьмін, д.т.н. Ю.Ф. Павленко,  
д.ф.-м.н. О.М. Петренко, д.т.н.В.О. Піджаренко, к.т.н.В.Ю. Попов,  
д.т.н. С.І. П'ятін, д.т.н. В.П. Ройзман, д.т.н. В.М. Тарасевич,  
д.т.н. Ю.О. Скрипник (голова редакційної колегії),  
д.т.н. М.М. Сурду, д.т.н. Й.І. Стенцель

Головний редактор к.т.н. І.В. Троцишин

**Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах:** Збірник наукових праць. -Хмельницький: ТУП, 2000.-272с.

В даному збірнику опубліковані наукові праці за результатами VII науково-технічної конференції *“Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”* (25-27 травня 2000р. м.Хмельницький) науковців провідних вузів України і відображають результати наукових досліджень за напрямками: *“Прилади та методи контролю параметрів природного середовища, речовин, матеріалів та виробів”*; *“Фазочастотні вимірювання в науці, приладобудованні і технологічних процесах”*; *“Обчислювальна техніка в технологічних процесах”*.

інфляційного, податкового та ін. Тому при розробці інвестиційної програми треба одразу визначити міри, які необхідно застосувати для усунення негативних наслідків дії ризиків систематичної групи.

**Висновки.** У роботі розглянута задача формування інвестиційного портфеля. Розглянуто функції, які треба оптимізувати при розробці стратегії інвестування, а також загальні принципи, обмеження та пріоритети, необхідні для роботи описаної експертної системи. Розроблено критерій ефективності, який дозволяє розглядати багатокритеріальну задачу оптимізації портфеля інвестицій, як задачу з одним критерієм та кількома обмежувальними параметрами. Розробка систем автоматизованого проектування стратегічного інвестування регіону на основі ефективних оптимізаційних рівнянь сприятиме активізації та підвищенню ефективності інвестиційної діяльності та досягненню найбільш значущих цілей соціальної політики.

### Література

1. Трояновский В.М. Математическое моделирование в менеджменте. Учебное пособие.- М.: Русская деловая литература, 1999.- 240с.
2. Дж. фон Нейман, О. Моргенштерн. Теория игр и экономическое поведение.- М.: Наука, 1970.- 708с.
3. Вітлінський В.В., Наконечний С.І. Ризик у менеджменті.- К.: ТОВ "Борисфен-М", 1996.- 336с.

**УДК 621.317.28**

А.В. Рудик, І.В. Барановський, Г.І. Майхрук

### ОПТИЧНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ МАЛИХ АМПЛІТУД МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ

Безконтактні методи вимірювання параметрів механічних коливань, засновані на оптичній інтерферометрії, поширені при градуюванні та повірці вібровимірювальної апаратури, приладів для вимірювання змінних тисків та для акустичних вимірювань.

Такі методи вимірювання параметрів коливань довільної форми засновані на використанні ефекту Доплера. Інформація про амплітуду механічного коливання міститься в індексі кутової модуляції сигналу, відбитого від об'єкта:

$$\theta = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta l_m,$$

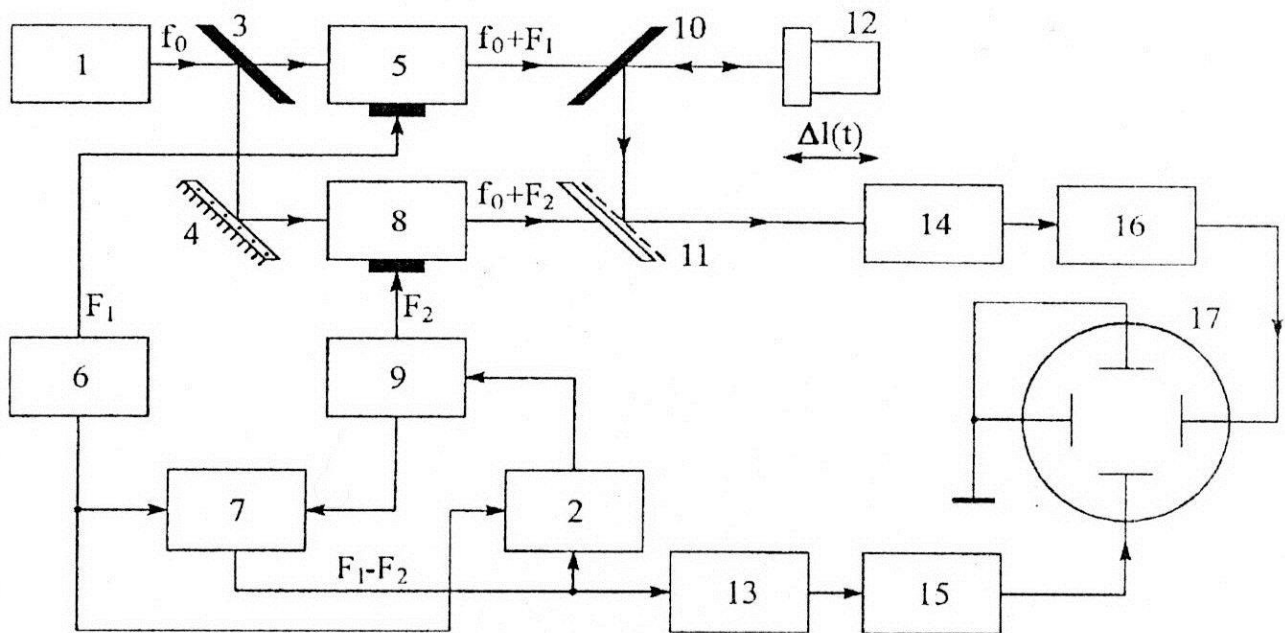
де  $\theta$  - індекс кутової модуляції;  $\lambda$  - довжина хвилі випромінення;  $\Delta l_m$  - амплітуда механічної вібрації.

Для виділення інформації про амплітуду механічного

---

Віницький державний технічний університет

коливання використовують інтерферометри постійного та змінного струму. Останні дозволяють виключити вплив шорсткуватості поверхні об'єкта контролю на результат вимірювання. Структурна схема оптичної гетеродинної установки для вимірювання малих амплітуд механічних коливань наведена на рис.1.



**Рис. 1.** Структурна схема оптичної гетеродинної установки для вимірювання малих амплітуд механічних коливань

Установка працює таким чином. Випромінення лазера 1 за допомогою напівпрозорого 3 та відбивального 4 дзеркал ділиться на два випромінення, на шляху яких під кутом Бреґґа встановлені акустооптичні модулятори (АОМ) 5 в першому та 8 в другому каналах відповідно. На електричні входи АОМ подається напруга збудження акустичних хвиль від генераторів 6 та 9 радіодіапазону (40÷110 МГц), які синхронізовані системою фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ) 2. Гармонічні напруги, що подаються на АОМ, мають частоти  $F_1$  та  $F_2$ , при цьому різниця між частотами  $F = F_1 - F_2$  вибирається в діапазоні 50÷600 кГц. В результаті акустооптичної взаємодії лазерного випромінення з частотою  $f_0$  та хвиль збудження з частотами  $F_1$  в першому та  $F_2$  в другому каналах на виходах АОМ за рахунок дифракції випромінення лазера з'являються дифраговані промені +1 порядку. Промінь в першому каналі через напівпрозоре дзеркало 10 потрапляє на об'єкт контролю 12, при вібрації якого просторова фаза змінюється на величину  $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta l_m \gamma(t) = \theta \gamma(t)$ , де  $\gamma(t)$  – закон зміни амплітуди механічного коливання об'єкта контролю. Відбитий від об'єкта контролю 12 та напівпрозорого дзеркала 10 промінь першого каналу суміщується з променем другого каналу за допомогою оптичного змішувача 11. Дифраговані співпалі промені з виходу оптичного змішувача 11 інтерферують на апертурі фотоприймача 14. Детектування цих променів у квадратичному

режимі дозволяє отримати напругу:

$$U_1(t) = bE_1E_2 \sin \{[(\omega_0 + \Omega_1)t + \Delta\varphi + \varphi_0] - (\omega_0 + \Omega_2)t\} = \\ = bE_1E_2 \sin \{(\Omega_1 - \Omega_2)t + \theta\gamma(t) + \varphi_0\},$$

де  $E_1$  та  $E_2$  - інтенсивності випромінювання відбитого та опорного променів;  $b$  - коефіцієнт, який характеризує чутливість фотоприймача 14.

В опорному каналі змішувач 7 формує напругу з частотою, яка дорівнює різниці частот генераторів 6 та 9. Далі напруга в опорному каналі проходить через фазообертач 13, помножується в  $n$  разів помножувачем частоти 15 та подається на першу пару пластин осцилографа 17. На другу пару пластин осцилографа подається підсилена підсилювачем 16 вихідна напруга фотоприймача 14, яка несе інформацію про амплітуду вібрації об'єкта контролю.

Розглянемо методику вимірювання малих індексів кутової модуляції за допомогою фігури Ліссажу. Якщо на одну пару пластин осцилографа подати коливання з кутовою модуляцією  $U_1(t)$ , а на другу - з частотою  $n(\Omega_1 - \Omega_2)$ , тобто  $U_2(t) = U_{m_2} \sin n(\Omega_1 - \Omega_2)t$ , де  $n = 1, 2, 3, \dots$  - коефіцієнт кратності частот, то на екрані осцилографа при  $\varphi_0 = 0$  (що завжди можна отримати за допомогою фазообертача 13) буде спостерігатися багатократна фігура Ліссажу, зображена на рис.2, а (при  $\varphi_0 = 0$ ,  $n$  - парне). Ординати точок цієї кривої визначаються рівнянням  $y = m_y U_{m_2} \sin n(\Omega_1 - \Omega_2)t$ , а абсциси - рівнянням:

$$x = m_x U_{m_x} \sin \{(\Omega_1 - \Omega_2)t + \theta\gamma(t)\}, \quad (1)$$

де  $U_{m_x} = bE_1E_2K_{16}$ ;  $m_x$  та  $m_y$  - чутливості відхилення осцилографу 17 за осями X та Y відповідно;  $K_{16}$  - коефіцієнт передачі підсилювача 16.

Позначимо  $m_x U_{m_x} = A$  та  $m_y U_{m_2} = B$ . Точки перетину кривої, яку описує промінь на екрані трубки, з віссю асцис мають  $y=0$ , тобто будуть при  $n(\Omega_1 - \Omega_2)t = k\pi$ , де  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Підставивши значення  $(\Omega_1 - \Omega_2)t = k\pi/n$  в рівняння (1), отримуємо абсциси точок перетину кривої з віссю X у вигляді:

$$x = A \sin \{k\pi/n + \theta\gamma(t)\}.$$

Відстань між двома симетричними відносно осі Y точками перетину кривої з віссю X дорівнює:

$$x_k - x_{k+n} = -2A \cos \left\{ \frac{2k+n}{2n} \pi + \theta\gamma(t) \right\}. \quad (2)$$

При  $k=0$  рівняння (2) приймає вигляд:

$$x_0 - x_n = 2A \sin \theta\gamma(t). \quad (3)$$

Якщо  $\theta=0$ , то рівняння (2) приймає вигляд:

$$x'_k - x'_{k+n} = -2A \cos \frac{2k+n}{2n} \pi. \quad (4)$$

В цьому випадку всі точки перетину кривої при  $\varphi_0 = 0$  та  $\theta = 0$  лежать на осі X. Це дозволяє легко визначити положення осі при вимірюванні. Розділивши співвідношення (3) на співвідношення (4), отримаємо:

$$\sin \theta \gamma(t) = -\frac{x_0 - x_n}{x'_k - x'_{k+n}} \cos \frac{2k+n}{2n} \pi. \quad (5)$$

На рис.2 б зображено інтерференційну картину при відсутності кутової модуляції,  $\varphi_0 = 0$  та  $n$  – парне. Точка  $b'$  має номер перетину  $k=1$ , точці  $b$  відповідає  $k=n+1$ , а відстань  $x_1 - x_{1+n} = bb'$ . Точки  $x_{k=0}$  та  $x_{k=n}$  у випадку  $\theta=0$  співпадають з початком координат. Якщо  $\theta \neq 0$ , то ці точки зміщуються відносно початку координат. При цьому відстань між ними визначається як  $x_0 - x_n = cc'$ . За довжиною відрізків  $bb'$  та  $cc'$  легко обчислити індекс кутової модуляції. Підставивши в співвідношення (5) значення  $x_k - x_{k+n} = bb'$  при  $k=1$  та  $x_0 - x_n = cc'$ , отримаємо:

$$\sin \theta \gamma(t) = -\frac{cc'}{bb'} \cos \frac{2+n}{2n} \pi. \quad (6)$$

Враховуючи, що у випадку  $\theta < 90^\circ$  максимальна розмитість  $cc'_{max}$  буде при  $\gamma(t)=1$ , з рівняння (6) отримаємо:

$$\theta = \arcsin \left( -\frac{cc'_{max}}{bb'} \cos \frac{2+n}{2n} \pi \right). \quad (7)$$

Максимальна розмитість інтерференційної картини  $cc'_{max}$  при парному  $n$  буде в центрі фігури (див. рис.2 а). На рис.2, в наведена інтерференційна картина при наявності кутової модуляції,  $\varphi_0 = 0$  та  $n$  – непарне.

У випадку рівних частот відстань  $bb'$  треба визначати з формули (4) при  $k=0.5$ , тобто користуватися проекцією фігури на вісь X, що дорівнює  $2A$  (див. рис.2 г). Розрахункова формула при  $n=1$  та  $\varphi_0 = 0$  набуває вигляду:

$$\theta = \arcsin \frac{cc'_{max}}{2A}. \quad (8)$$

Таким методом можна користуватися і при вимірюванні індексу кутової модуляції у сигналу з більшою частотою. Однак чутливість вимірювання індексу модуляції при цьому зменшується в  $n$  разів.

В процесі вимірювання відбувається зміна інтенсивності відбитого від об'єкта контролю променя, тому доцільно розглянути, чи буде впливати наявність амплітудної модуляції (АМ) у одного з сигналів на розмитість в центрі фігури Ліссажу вздовж осі X.

Якщо АМ є у сигналу з меншою частотою, то, як показано в [1], в початку координат розмитості немає (рис.2 д), а максимальна розмитість вздовж осі X буде спостерігатися на краях фігури. При наявності АМ у сигналу з більшою частотою розмитість фігури вздовж осі X також відсутня (рис.2 ж).

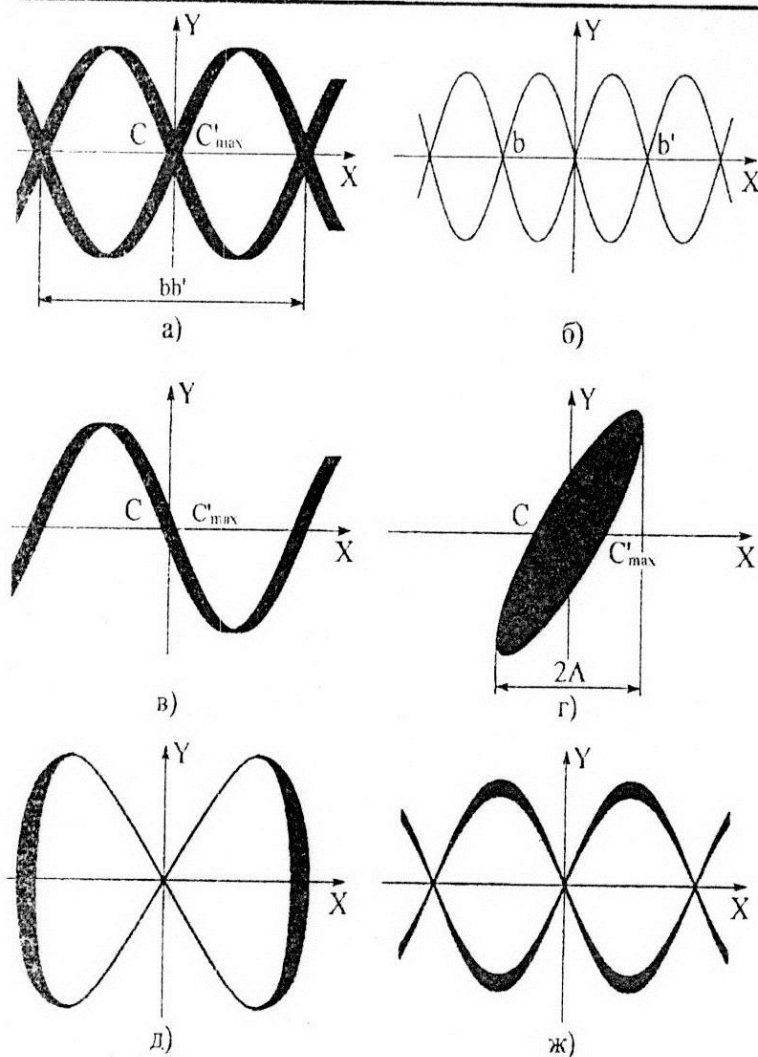


Рис. 2. Інтерференційні карини

модуляції для гранично можливих значень  $\theta_1$  та  $\theta_2$  з урахуванням похибки у вимірюванні відстаней  $cc'_{max}$  та  $2A$ , отримаємо:

$$\sin \theta_1 = \frac{cc'_{max} + d}{2A - d} \quad \text{та} \quad \sin \theta_2 = \frac{cc'_{max} - d}{2A + d}. \quad (9)$$

Прийнявши  $\theta = 0.5(\theta_1 + \theta_2)$ ,  $\Delta\theta_d = 0.5(\theta_1 - \theta_2)$  та знехтувавши малими величинами, отримаємо межі зміни  $\sin \Delta\theta_d$  (при  $0 \leq \sin \Delta\theta_d \leq \pi/n$ ):

$$\frac{d}{2A} \leq \sin \Delta\theta_d \leq \frac{d}{2A} \cdot \frac{1 + \sin \pi/n}{\cos \pi/n}. \quad (10)$$

Наприклад, при діаметрі екрану трубки 125 мм можна отримати довжину відрізка  $2A = 100$  мм, тоді при  $d = 1$  мм та  $n = 9$  маємо  $\Delta\theta_{max} = 0.82^\circ$ . Похибку від нелінійності трубки визначають через коефіцієнт, який залежить від максимального відхилення чутливості на робочій ділянці екрану, тобто  $\alpha = m_{max}/m_{min} - 1$ . Задамося законом зміни чутливості, при якому похибка у визначенні відношення відрізків  $Z = cc'_{max}/2A$  буде максимальною. Тоді:

$$\begin{cases} cc'_{max} = m_{max}U_1(t); \\ 2A = m_{max}U_1(t) + m_{min} \{U_2(t) - U_1(t)\}. \end{cases}$$

Таким чином, АМ не дає розмитості в центрі фігури Ліссажу вздовж осі X і тому не вносить похибки у визначення індексу кутової модуляції.

Похибки вимірювання індексу кутової модуляції розглянутим методом в основному обумовлені кінцевими розмірами світлової плями на екрані осцилографа, кривизною екрану та наявністю нелінійних спотворень сигналів [2].

Діаметр світлової плями у осцилографів можна встановити 0.5–1 мм. Відстань між двома точками осцилограми можна визначити з точністю  $d$ , де  $d$  – товщина лінії, яка дорівнює діаметру світлової плями. Визначивши за виразом (8) індекс кутової



Відношення відрізків з урахуванням такої нерівномірності чутливості дорівнює  $Z' = Z(1 - \alpha)/(1 + Z\alpha)$ . З останнього виразу  $\sin \theta = Z$ ,  $\sin \Delta\theta_\alpha = Z'$ . Після знехтування малими величинами другого порядку отримаємо:

$$\sin 0.5 \Delta\theta_{\alpha, \max} \approx \alpha \operatorname{tg} \theta.$$

При малих значеннях індексу кутової модуляції  $\Delta\theta_\alpha \approx 2\alpha\theta$ , тому максимальна похибка вимірювання більш ніж на порядок менше вимірюваної величини, що цілком припустимо (у сучасних трубках  $\alpha \leq 0.05$ ).

Нелінійні спотворення напруг  $U_1(t)$  та  $U_2(t)$  призводять до похибки у визначенні відрізків  $cc'_{\max}$  та  $2A$ . Представивши напругу  $U_1(t)$  сумою гармонічних складових, отримаємо рівняння, які описують криву у такому вигляді:

$$\begin{cases} x = \sum_{p=1}^{\infty} A_p \sin p \{(\Omega_1 - \Omega_2)t + \theta\gamma(t)\}; \\ y = B \sin n(\Omega_1 - \Omega_2)t. \end{cases} \quad (11)$$

Прийнявши в останньому співвідношенні  $y=0$ , тобто  $(\Omega_1 - \Omega_2)t = k\pi/n$ , знаходимо абсциси точок перетину фігури Ліссажу з віссю  $X$  з (11) у вигляді:

$$x_k = \sum_{p=1}^{\infty} A_p \sin p \left\{ \frac{k\pi}{n} + \theta\gamma(t) \right\}. \quad (12)$$

З співвідношення (12) можна визначити ширину розмитості по осі  $X$ , яка симетрична осі  $Y$ , поклавши  $k = 0, n, 2n, \dots, hn$ :

$$2x_{0, n} = 2 \sum_{p=1}^{\infty} A_p \sin p \left\{ \frac{k\pi}{n} + \theta\gamma(t) \right\}. \quad (13)$$

З виразу (13) можна визначити відносну похибку вимірювання у вигляді:

$$\frac{\Delta\theta_\beta}{\theta} = \frac{A_2 \sin 2\theta}{A \sin \theta} + \frac{A_3 \sin 3\theta}{A \sin \theta} + \dots = \sum_{p=2}^{\infty} \frac{A_p \sin p\theta}{A \sin \theta}.$$

Для малих  $\theta \ll 1$  отримаємо  $\Delta\theta_\beta \approx \theta \sum_{p=2}^{\infty} p\beta_p$ , де  $\beta_p$  - коефіцієнт нелінійних спотворень за гармоніками.

Таким чином, невеликі нелінійні спотворення досліджуваного сигналу не призводять до суттєвих похибок у вимірюванні індексу кутової модуляції.

Враховуючи, що розглянуті похибки є незалежними випадковими величинами, можна вважати, що загальна відносна похибка вимірювання буде незначною (менше 5%), а максимальна абсолютна похибка вимірювання буде складати  $\Delta_{\max} l = 0.05 \Delta l_m = \lambda/160$  і зменшуватися при збільшенні  $n$ .

Розрізнявальна здатність методу складає  $\lambda/320 \div \lambda/400$ , що при використанні

лазера з довжиною хвилі 0,63 мкм складає  $(1.58 \div 1.97) \text{ нм}$ . Неточність установки  $\varphi_0 = 0$  не призводить до суттєвих похибок при визначенні довжини відрізка  $cc'_{\max}$ , тому що він обмежений паралельними лініями фігури Ліссажу.

Запропонована в роботі оптична гетеродинна установка може використовуватися при градуюванні та повірці вібровимірювальної апаратури.

### Література

1. Шульженко К.М., Супьян В.Я. Измерение малых индексов фазовой модуляции с помощью интерференционных картин // Известия Томского политехнического института, 1960. – Том 105. – С. 137-143.
2. Супьян В.Я. Измерение индексов фазовой модуляции при рациональном отношении частот // Известия Томского политехнического института, 1962. – Том 116. – С. 14-22.

УДК 621.319.45

Г.Ф. Гордієнко

### МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛІВОК ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ КОНДЕНСАТОРІВ ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ПАРАМЕТРІВ

Виробництво електролітичних конденсаторів базується на одержанні на розвинутій поверхні оксидного шару шляхом анодного окислення. Очевидно, що властивості отриманого оксидного шару багато в чому визначають доброякість, тривалість служби та експлуатаційні характеристики готових виробів.

Відомо, що величина ємності будь-якого конденсатора знаходиться у прямій залежності від величини діелектричної проникності діелектрика. В більшості випадків шар діелектрика, тобто оксидний шар, формується прямо на металі в результаті анодного оксидування в розчинах електролітів і він характеризується малою товщиною та достатньо високими діелектричними властивостями, що в поєднанні з високорозвинутою поверхнею, отриманою на попередньому етапі, дозволяє отримати високі питомі ємності.

Найбільшого поширення набули електролітичні конденсатори, в яких у якості металічних електродів використовують алюміній, дякуючи ряду позитивних якостей, а саме, легкості механічної та електрохімічної обробки. Певне значення має дешевизна алюмінію в порівнянні з іншими металами.

На структуру оксиду, кінетику його росту, хімічний склад істотний вплив має рН середовища, в якому виконують формування оксиду. В кислих середовищах отримують пористі плівки, а в нейтральних- утворюються тонкі безпористі плівки бар'єрного типу. Тому практичне значення має можливість передбачити хімічний склад та структуру анодних продуктів, а з їх допомогою, можливо, діелектричні властивості