

## АКУСТООПТИЧНИЙ СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ МАЛИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ

Асп. Рудик А. В., студ. Суп'ян О. В.

Акустооптика базується на взаємодії звуку зі світлом. Звук, який поширюється в речовині, викликає зміну її щільності; це, в свою чергу, спричиняє зміну коефіцієнта заломлення з періодом, рівним довжині хвилі. Світловий промінь дифрагує на цій просторовій періодичній структурі, відхиляючись від попереднього напрямку.

Дифракція, в якій спостерігається лише один дифрагований промінь, називається дифракцією Брегга. На практиці такий режим виникає, якщо звукове поле має достатньо велику глибину і світловий промінь на своєму шляху перетинає один чи більше періодів зміни коефіцієнта заломлення.

Враховуючи, що частота ультразвуку ( $10^8$  Гц) набагато менша частоти світлової хвилі ( $10^{15}$  Гц), кут  $\Theta$  між фронтом звукової хвилі і напрямком світла

$$\sin \Theta = \frac{K}{2k} = \frac{\lambda}{2\Lambda}, \quad \Theta = \frac{\lambda f}{2V}, \quad (1)$$

де  $f = \frac{\Omega}{2\pi}$  — частота звукової хвилі, а її хвильовий вектор має величину  $|K| = \frac{\Omega}{V}$ ,  $V$  — швидкість ультразвуку;  $\lambda$  — довжина хвилі падіння світлового променя;  $\Lambda$  — довжина хвилі ультразвуку;  $|k| = \frac{2\pi}{\lambda}$  — хвильовий вектор світлового променя.

Критерієм, що визначає режим дифракції, є величина

$$Q = \frac{K^2 L}{k} = 2\pi \frac{\lambda L}{\Lambda^2}, \quad (2)$$

де  $L$  — глибина звукового поля в напрямку поширення світла. Якщо  $Q \geq 4\pi$ , то рахують, що дифракція відбувається в режимі Брегга.

У випадку слабкої взаємодії напруженість поля вихідного світлового пучка можна виразити через амплітуду світлового пучка, що падає таким чином [1]:

$$U_1(t) \approx U_0(t) - \frac{1}{4} j k C L U_0 \left\{ t - \frac{\Delta X}{V} \right\} \exp [j(\omega + \Omega)t - jK \Delta X] - \\ - \frac{1}{4} j k C L U_0^* \left\{ t - \frac{\Delta X}{V} \right\} \exp [j(\omega - \Omega)t + jK \Delta X], \quad (3)$$

де  $C$  — константа;  $U_0$  — енергія електромагнітного поля світлового потоку;  $\Delta X$  — мале лінійне переміщення.

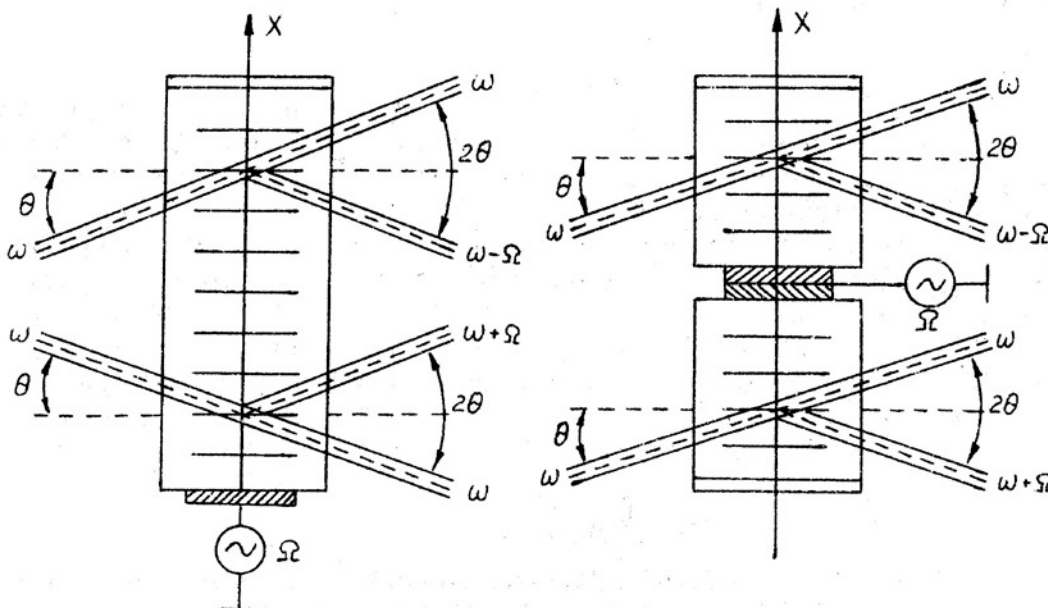


Рис. 1. Дифракція в режимі Брегга: зміщення дифрагованого пучка по частоті

Якщо акустооптична система обробки сигналу працює на основі дифракції Брегга, то світловий пучок повинен спрямовуватись на неї під відповідним кутом Брегга. В цьому випадку вихідний пучок описується виразом (3) з тією лише різницею, що другий, або третій член відсутній. У виразі (3) зірочка означає комплексно-спряжену величину.

На рис. 1 показано схему взаємодії пучка, спрямованого на звукопровід, в якому поширюється акустична хвиля.

Якщо світловий пучок падає під тупим кутом до напрямку поширення фронтів акустичної хвилі, то між напрямком поширення акустичної хвилі і дифрагованим світловим пучком також утворюється тупий кут. Таким чином, якщо акустична хвиля набігає на світлову, то дифрагований пучок зміщується по частоті донизу на величину  $\Omega$  (верхня частина рис. 1, а). Рис. 1, а (нижня частина) ілюструє дифракцію Брегга із зміщенням частоти доверху, тобто тоді, коли акустична хвиля відходить від світлової хвилі.

Якщо звукопроводи розташовані так, як показано на рис. 1, б, то акустична хвиля буде набігати на світлову (дифрагований пучок зміщується по частоті донизу), або бігти від падаючої світлової хвилі (дифрагований пучок зміщується по частоті доверху). При цьому переміщення звукопроводів вздовж осі X на величину  $\Delta X$  призводить до того, що дифрагований пучок у верхній частині рис. 1, б набуває негативний фазовий зсув  $K\Delta X$ , а дифрагований пучок у нижній частині рис. 1, б — позитивний фазовий зсув  $K\Delta X$ . При інтерференції дифрагованих пучків фазовий зсув за рахунок переміщення на величину  $\Delta X$  подвоюється, що призводить до збільшення дозвільної спроможності вимірювання малих лінійних переміщень і спрощує структуру інтерферометра.

Як показали дослідження [2], використання гетеродинних методів детектування оптичних полів на підставі акустооптичної взаємодії, а також двочастотних лазерів дозволяє забезпечити передачу кута фазового зсуву між сигналами радіодіапазону в оптичний діапазон і навпаки без суттєвих похибок та розробити фазовий радіооптичний міст [3, 4].

Використання фазового компаратора лінійно-кутових переміщень допомагає створити універсальний метрологічний засіб атестації робочих вимірювачів довжини, плоского кута, кута фазового зсуву електричних процесів в радіооптичному діапазоні по загальній перевіірчій схемі з прийнятими в метрології еталонами часу та частоти [4].

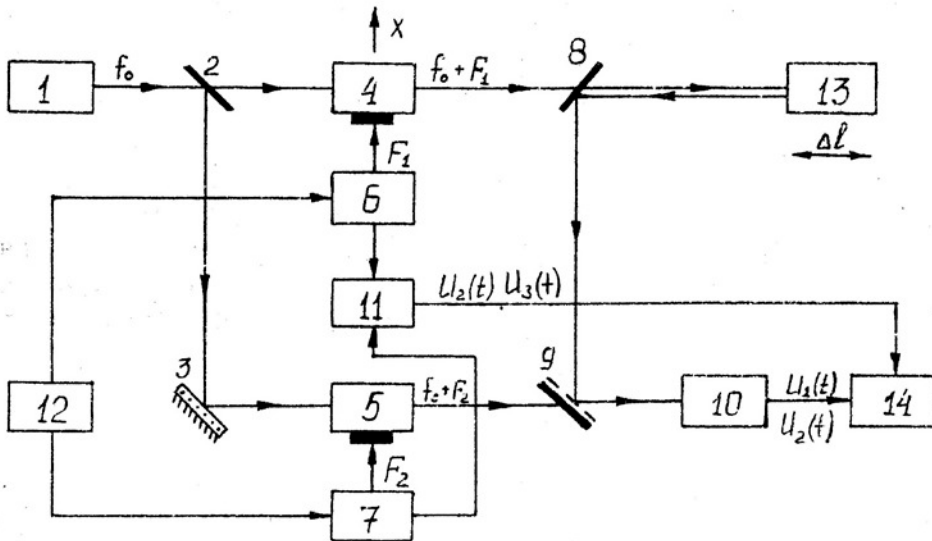


Рис. 2. Структурна схема вимірювача малих переміщень з системою ФАПЧ

На підставі аналізу виразу (3) пропонується компенсаційний метод вимірювання малих переміщень при допомозі акустооптичних модуляторів (АОМ), які працюють в режимі дифракції Брегга. Структурна схема пристрою зображена на рис. 2.

Пристрій містить лазер 1, напівпрозорі дзеркала 2 і 8, відображальне дзеркало 3, АОМ 4 і 5, генератори електричних коливань 6 і 7 з фазовою автопідстройкою 12, оптичний змішувач 9, фотоприймач 10, радіочастотний змішувач 11, об'єкт контролю 13 та фазовий індикатор 14.

Пристрій працює таким чином. Випромінювання лазера 1 за допомогою дзеркала 2 і відображального дзеркала 3 ділиться на два випромінювання, на шляху яких під кутом Брегга встановлені АОМ 4 в першому та 5 в другому каналах відповідно. На електричні входи модуляторів подається напруга збудження акустичних хвиль від генераторів 6 і 7 радіочастотного діапазону (50+100 МГц). Гармонічні напруги цих генераторів мають частоти  $F_1$  та  $F_2$  відповідно, які мало відрізняються одна від одної. Різниця між частотами  $F = F_1 - F_2$  вибирається рівною 50+100 кГц, щоб  $F \ll F_1$  та  $F \ll F_2$ . В результаті акустичної взаємодії лазерного випромінювання з частотою  $f_0$  та хвилі збудження з частотою  $F_1$  в першому каналі та з частотою  $F_2$  в другому на виходах АОМ за рахунок дифракції

випромінювання лазера з'являються дифраговані промені +1 порядку в кожному каналі, які мають частоти  $f_0 + F_1$  в першому каналі та  $f_0 + F_2$  в другому каналі. Ці промені на виходах АОМ 4 та 5 випромінюють під кутом Бреґга  $\Theta$ , який визначається за формулою (1). Промінь в першому каналі через напівпрозоре дзеркало 8 потрапляє на об'єкт контролю 13, під час переміщення якого на величину  $\Delta l$  просторова фаза зміниться на величину  $\Delta \varphi = k 2 \Delta l = \frac{2\pi}{\lambda} 2 \Delta l$ . Відбитий від об'єкту контролю 13 і напівпрозорого дзеркала 8 промінь каналу співпадає з променем другого каналу за допомогою оптичного змішувача 9. Дифраговані співпалі промені з оптичного змішувача 9 інтерферують на апертурі фотоприймача 10. Детектування інтерферованого променя у випадку квадратного режиму дозволяє отримати на виході фотоприймача напругу

$$U_2(t) = b E_1 E_2 \cos [ (\omega_0 + \Omega_1) t + \Delta \varphi_{ш1} + \Delta \varphi_1 + \Delta \varphi_{31} + \Delta \varphi_0 ] - [ (\omega_0 + \Omega_2) t + \Delta \varphi_{ш2} + \Delta \varphi_2 + \Delta \varphi_{32} ] ] = b E_1 E_2 \cos [ (\Omega_1 + \Omega_2) t + (\Delta \varphi_{ш1} - \Delta \varphi_{ш2}) + (\Delta \varphi_1 - \Delta \varphi_2) + (\Delta \varphi_{31} - \Delta \varphi_{32}) + \Delta \varphi_0 ],$$

де  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $\Omega_1 = 2\pi F_1$ ,  $\Omega_2 = 2\pi F_2$ ;  $\Delta \varphi_{ш1}$  та  $\Delta \varphi_{ш2}$  — фазові нестабільності, які вносяться АОМ 4 та 5 при вібраціях;  $\Delta \varphi_1$  та  $\Delta \varphi_2$  — фазові нестабільності, які виникають в АОМ 4 та 5 за рахунок відхилення частоти генераторів електричних коливань 6 та 7;  $\Delta \varphi_{31}$  та  $\Delta \varphi_{32}$  — фазові затримки світла в першому та другому каналах інтерферометра;  $\varphi_0 = \frac{2\pi}{\lambda} 2 \Delta l$  — фазовий зсув, який вноситься об'єктом контролю 13 при його переміщенні на величину  $\Delta l$ ;  $b$  — коефіцієнт, який характеризує чутливість фотоприймача 10.

В опорному каналі радіочастотний змішувач 11 формує напругу з частотою, що дорівнює різниці частот генераторів електричних коливань 6 та 7 і має вигляд

$$U_3(t) = U_{мз} \cos (\Omega_1 - \Omega_2) t,$$

де  $U_{мз}$  — амплітуда вихідної напруги радіочастотного змішувача 11.

Після цього напруги  $U_2(t)$  та  $U_3(t)$  подаються на входи фазового індикатора 14, який вимірює кут фазового зсуву між прикладеними до нього напругами. Показник фазового індикатора дорівнює

$$\varphi_{вим} = (\Delta \varphi_{ш1} - \Delta \varphi_{ш2}) + (\Delta \varphi_1 - \Delta \varphi_2) + (\Delta \varphi_{31} - \Delta \varphi_{32}) + \Delta \varphi_0 = \Delta \varphi_{дод} + \Delta \varphi_0,$$

де  $\Delta \varphi_{дод}$  — додаткове набігання фази за рахунок вібрацій АОМ 4 та 5, за рахунок відхилення частоти генераторів електричних коливань 6 та 7 та зарахунок нерівності шляхів проходження оптичними променями у каналах фазової системи.

Для того, щоб виключити додаткове набігання фази в оптичних каналах  $\Delta \varphi_{дод}$ , пропонується переміщувати один з АОМ, наприклад 4, на величину  $\Delta X$  в площині, перпендикулярній променю лазера. В цьому випадку можна добитися нульового показника фазового індикатора 14 перед початком вимірювання малого переміщення об'єкта контролю 13 на величину  $\Delta l$ . Показник індикатора 14 дорівнює

$$\varphi_{вим} = \varphi_0 = \frac{2\pi}{\lambda} 2 \Delta l.$$

Якщо зміщувати АОМ 4, до забезпечення нульового показника фазового індикатора 14, то переміщення об'єкта контролю 13 на величину  $\Delta l$  компенсується переміщенням АОМ на величину  $\Delta X_{вим} = \frac{\lambda}{\Lambda} 2 \Delta l$ , де  $\frac{\lambda}{\Lambda} \gg 1$ . Таким чином, реалізується компенсаційний метод вимірювання малих переміщень із збільшенням масштабу у  $m = 2 \frac{\lambda}{\Lambda}$  разів. Наприклад, для АОМ з плавленого кварцу, при дифракції світла на ультразвуці з частотою 80 МГц, довжина хвилі ультразвуку у матеріалі АОМ дорівнює 75 мкм.

При компенсаційному методі вимірювання можна оцінити підвищення дозвільної здатності вимірювання малих лінійних переміщень:

$$m = \frac{\Delta X_{вим}}{\Delta l} = 2 \frac{\lambda}{\Lambda} = \frac{2 \cdot 75 \cdot 10^{-6}}{0,63 \cdot 10^{-6}} = 240,$$

де  $\lambda = 0,63$  мкм — робоча довжина хвилі лазера.

З підвищенням масштабного коефіцієнта  $m$  підвищується точність вимірювання малих переміщень. Наприклад, при довжині хвилі лазера  $\lambda = 0,63$  мкм та похибці вимірювання фазового зсуву  $0,1^0$  абсолютна похибка вимірювання переміщення  $\delta l = 10^{-4}$  мкм.

Переміщення об'єкта контролю 13 може перевищувати довжину хвилі випромінювання лазера  $\lambda$ , якщо фазовий індикатор 14 спроможний вести рахунок фазових циклів, тобто цілого числа  $2\pi$ .

Недоліком описаного вище вимірювача малих переміщень з системою ФАПЧ (рис. 2) є те, що на результат вимірювання у динаміці суттєвий вплив має додаткове набігання фази  $\Delta\varphi_{\text{дод}}$  за рахунок вібрацій АОМ 4 і 5 та відхилю частоти генераторів електричних коливань 6 і 7. Складові додаткового набігання фази  $\Delta\varphi_{\text{дод}}$  в кожному з каналів слабо корельовані, тому не компенсуються і впливають на точність вимірювання малих переміщень.

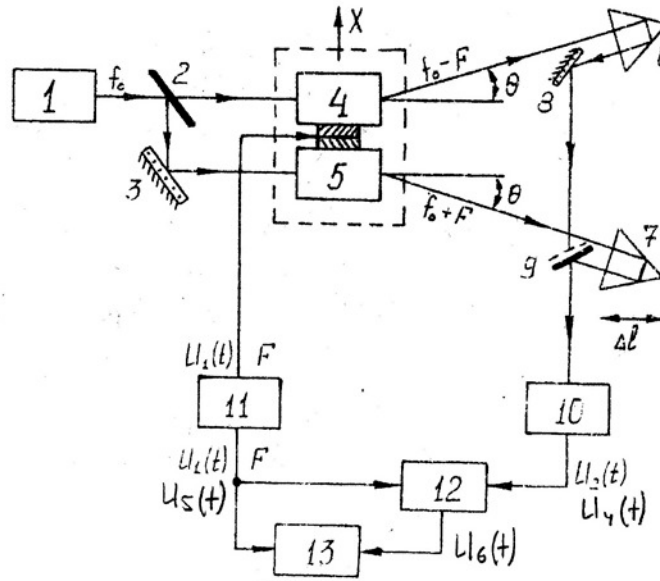


Рис. 3. Структурна схема вимірювача малих переміщень з одним генератором збудження АОМ

Пропонується компенсаційний вимірювач малих переміщень, вільний від цього недоліку. Структурна схема пристрою наведена на рис. 3.

Пристрій містить лазер 1, напівпрозоре дзеркало 2, відображальні дзеркала 3 і 8, АОМ 4 і 5, кутові відбивачі 6 і 7, оптичний змішувач 9, фотоприймач 10, генератор електричних коливань 11, радіочастотний змішувач 12, фазовий індикатор 13.

В результаті акустичної взаємодії лазерного випромінювання з частотою  $f_0$  та хвилі збудження з частотою  $F$  на виходах АОМ за рахунок дифракції випромінювання лазера з'являються дифраговані промені  $-1$  порядку в першому каналі та  $+1$  порядку в другому каналі. Промені нульового порядку,  $+1$  порядку в першому каналі та  $-1$  порядку в другому каналі не використовуються. Оскільки  $\lambda \ll \Lambda$ , то на порівняно невеликій базі можна забезпечити просторову фільтрацію променів на виході АОМ 4 та 5. Промінь в другому каналі, який має частоту  $f_0 + F$ , потрапляє на кутовий відбивач 7, при переміщенні якого на величину  $\Delta l$  просторова фаза змінюється на величину  $\Delta\varphi = k 2 \Delta l = \frac{2\pi}{\lambda} 2 \Delta l$ . Цей промінь за допомогою відображувального дзеркала 8 та оптичного змішувача 9 сумішують з променем другого каналу. Дифраговані співпалі промені з оптичного змішувача 9 інтерферують на апертурі фотоприймача 10. Детектування інтерферованого променя у випадку квадратичного режиму дозволяє отримати на виході фотоприймача напругу

$$U_4(t) = b E_1^{-1} E_2^1 \cos [ (\omega_0 - \Omega) t + \Delta\varphi_{\text{ш1}}^{-1} + \Delta\varphi_1^{-1} + \Delta\varphi_{31}^{-1} - \Delta\varphi_{\text{м1}}^{-1} ] - [ (\omega_0 + \Omega) t + \Delta\varphi_{\text{ш2}}^1 + \Delta\varphi_2^1 + \Delta\varphi_{32}^1 + \Delta\varphi_{\text{м2}}^1 + \varphi_0 ] ] \approx b E_1^{-1} E_2^1 \cos [ 2\Omega t + (\Delta\varphi_{\text{ш2}}^2 - \Delta\varphi_{\text{ш1}}^{-1}) + (\Delta\varphi_2^1 - \Delta\varphi_1^{-1}) + (\Delta\varphi_{32}^1 - \Delta\varphi_{31}^{-1}) + (\Delta\varphi_{\text{м2}}^1 + \Delta\varphi_{\text{м1}}^{-1}) + \varphi_0 ],$$

де  $\Delta\varphi_{\text{м1}}^{-1} = \Delta\varphi_{\text{м2}}^1 = \frac{2\pi}{\Lambda} \Delta X$  — фазовий зсув, який виникає при переміщенні на величину  $\Delta X$  АОМ 4 або 5 відповідно.

Фазові набігання між каналами  $\Delta\varphi_3 = \Delta\varphi_{32}^1 - \Delta\varphi_{31}^{-1}$  за рахунок різниці ходу променів у каналах можна виключити встановленням «нуля» фазового індикатора 13 перед початком вимірювання малого переміщення.

Оскільки канали оптичної частини вимірювача мають ідентичні нахили фазочастотних характеристик, та АОМ 4 і 5 збуджуються від одного генератора 11 електричних коливань, то  $\Delta\varphi_1^{-1} = \Delta\varphi_2^1$ . Пропонується АОМ 4 і 5 встановити на одній платформі, яка переміщується таким чином, що для

одного променя в першому каналі акустична хвиля набігає на світлову, а для променя в другому каналі — відхиляється від світлової хвилі, що падає, тобто  $\Delta \varphi_{m1}^{-1}$  та  $\Delta \varphi_{m2}^1$  мають протилежні знаки. В інтерферуючому промені маємо

$$\Delta \varphi_{m2}^1 - (-\Delta \varphi_{m1}^{-1}) = \frac{2\pi}{\Lambda} \Delta X + \frac{2\pi}{\Lambda} \Delta X = \frac{2\pi}{\Lambda} 2\Delta X = \Delta \varphi_m.$$

Далі напруги  $U_4(t)$  та  $U_5(t) = U_{m3} \cos \Omega t$  подаються (рис. 3) на вході радіочастотного змішувача 12, напруга на виході котрого має вигляд

$$U_6(t) = U_{m3} \cos [\Omega t + (\Delta \varphi_{ш2}^1 - \Delta \varphi_{ш1}^{-1}) + \Delta \varphi_m + \varphi_0],$$

де  $U_{m3}$  — амплітуда вихідної напруги радіочастотного змішувача 12.

Після перетворення частоти, напруги  $U_4(t)$  та  $U_6(t)$  подаються на вході фазового індикатора 13, котрий вимірює кут фазового зсуву, рівний

$$\varphi_{\text{вим}} = (\Delta \varphi_{ш2}^1 - \Delta \varphi_{ш1}^{-1}) + \Delta \varphi_m + \varphi_0.$$

Оскільки АОМ 4 та 5 у каналах розташовані на одній платформі, фазові нестабільності  $\Delta \varphi_{ш2}^1$  та  $\Delta \varphi_{ш1}^{-1}$ , які виникають за рахунок вібрацій, корельовані і при вимірюванні взаємно компенсуються. Це дозволяє збільшити точність вимірювання величини малого переміщення при реалізації компенсаційного методу:

$$\varphi_{\text{вим}} = \varphi_0 = \Delta \varphi_m = \frac{2\pi}{\Lambda} 2\Delta l = \frac{2\pi}{\Lambda} 2\Delta X.$$

У цьому випадку масштаб перетворення

$$m = \frac{\Delta X}{\Delta l} = \frac{\Lambda}{\lambda} = \frac{75 \cdot 10^{-6}}{0,63 \cdot 10^{-6}} = 120$$

зменшується, але спрощується структура інтерферометра.

Таким чином, запропонований компенсаційний метод вимірювання малих переміщень за допомогою АОМ дозволяє вимірювати переміщення з похибкою не більше  $10^{-4}$  мкм. Підвищення точності вимірювання відбувається тому, що АОМ розташовані на одній платформі та збуджуються від одного генератора електричних коливань, що приводить до зменшення впливу вібрацій та виключення температурної та частотної взаємної нестабільності генераторів збудження АОМ. Запропоновані пристрої можна використовувати у прецизійному машинобудуванні та мікроелектроніці.

## ЛІТЕРАТУРА

1. A. Korpel. «Acousto — optic signal processing», in Optical Information Processing, Yu. E. Nesterikhin and G. W. Stoke E ds. New York: Plenum, 1976, ch. 10, pp. 171—194.
2. Календин В. В., Кухтович В. И., Супьян В. Я., Федосеев В. А. Високоточний цифровой фазометр ИК2 диапазона с преобразованием частоты лазерного излучения // ПТЭ. — 1981. — № 4.
3. А. С. № 1392363 (СССР). Фазовый компаратор линейно-угловых перемещений / В. В. Календин, С. А. Кравченко, И. В. Троцишин, В. Я. Супьян. // Бюл. изобр. — 1988. — № 16.
4. Супьян В. Я., Горбатько С. Н., Календин В. В. и др. Применение лазерных фазовых систем и комплексов в метрологии // Радиотехнические устройства контроля и обработки информации. — Киев: УМК ВО, 1992.

Кафедра радіотехніки

УДК 621.307.312

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ВІД'ЄМНИЙ ОПІР ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ

Асп. Осадчук О. В.

Прилади з від'ємним опором, зокрема  $\lambda$ -транзистори, знайшли широке застосування як підсилювачі, генератори, ключові пристрої в різноманітних галузях радіоелектроніки [1—3]. Однак, залежність від'ємного опору таких пристроїв від дії зовнішніх факторів, таких як світло, не досліджена досить повно. Знання цієї залежності дозволяє застосувати прилади з від'ємним опором в оптоелектронних схемах, що розширює їх можливості і дозволяє створити якісно нові багатофункціональні прилади. Тому ця стаття присвячена вивченню залежності від'ємного опору від дії оптичного випромінювання на  $\lambda$ -транзисторну структуру.