

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»
Кафедра радіотехніки та телекомунікацій

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

До лабораторних робіт з дисципліни
«Теорія і проектування радіотехнічних систем»
Для студентів спеціальності
172 «Електронні комунікації та радіотехніка»
ОПП «Радіотехніка»
всіх форм навчання

Лабораторна робота
«Автокомпенсатор активних завад»

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Теорія і проектування радіотехнічних систем» для студентів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» ОПП «Радіотехніка» усіх форм навчання: Лабораторна робота «Автокомпенсатор активних завад» / Укл. Д.М. Піза, М.П. Чорнобородов – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 18 с.

Укладачі: Д.М. Піза, професор, д.т.н.
М.П. Чорнобородов, доцент, к.т.н.

Рецензент: С.В. Морщавка, доцент, к.т.н.

Відповідальний
за випуск: Є.І. Колеснікова, зав. лаб.

Затверджено:
на засіданні кафедри
радіотехніки та телекомунікацій
Протокол № 4 від 15.02.2024 р.;

Рекомендовано до видання НМК
факультету інформаційної безпеки та електронних комунікацій
Протокол № 5 від 15.02.2024 р.

ЗМІСТ

1 АВТОКОМПЕНСАТОР АКТИВНИХ ЗАВАД.....	4
1.1 Мета роботи.....	4
1.2 Стислі теоретичні відомості	4
1.3 Опис установки.....	12
1.4 Правила безпеки.....	13
1.5 Підготовка до роботи.....	13
1.6 Порядок виконання роботи.....	14
2 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ.....	17
3 ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ	18

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА «АВТОКОМПЕНСАТОР АКТИВНИХ ЗАВАД»

1.1 Мета роботи

Зрозуміти особливості функціонування радіоелектронних засобів в умовах дії активних шумових завад, вивчити підходи до вирішення проблеми завадозахищеності, вивчити принцип дії та структурні схеми автокомпенсаторів завад, отримати уявлення про їх роботу та чинники, які впливають на їх ефективність.

1.2 Стислі теоретичні відомості

Активними завадами називаються радіосигнали, які створюються спеціальними радіопередавачами і використовуються для погіршення нормальної роботи радіотехнічних засобів. Найбільш універсальними є шумові завади з нормальним (гаусівським) розподілом амплітуди.

Щільність розподілу випадкових значень амплітуди $\omega(n)$ при цьому може бути показана у вигляді:

$$\omega(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{n^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (1.1)$$

де σ – середньоквадратичне значення завади.

Графічно щільність розподілу ймовірності наведено на рис. 1.1. Активні шумові завади можуть маскувати корисні сигнали на часовій і частотній осі. Вони використовуються для пригнічення радіотехнічних засобів різного призначення.

Для радіолокаційних засобів ефект пригнічення полягає у збільшенні ймовірності хибних тривог до рівня, при якому їх функціонування стає неможливим, або у зменшенні ймовірності правильного виявлення корисних сигналів.

Завадозахищеність радіолокаційних засобів характеризує їх спроможність виконувати свої функції при одночасному проведенні радіорозвідки та створенні радіозавад.

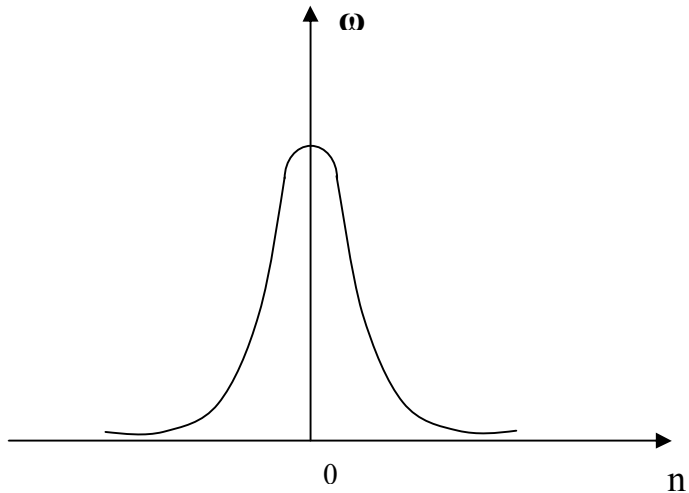


Рисунок 1.1

Принципово захист від завад базується на відмінностях структури і закономірностях зміни параметрів корисних сигналів та завад. Завадозахищеність забезпечується недопущенням перенавантаження приймачів, компенсацією активних шумових завад, а також селекцією корисних сигналів на фоні пасивних завад.

Ідея компенсації активних шумових завад полягає в наступному. Крім основного приймача, в якому обробляються корисні сигнали, використовується компенсаційний приймач, антена якого приймає переважно активну заваду. Компенсація виконується шляхом віднімання завадових сигналів компенсаційного каналу від завадових сигналів основного каналу.

Для забезпечення компенсації завади попередньо в компенсаційному каналі виконують амплітудно-фазову обробку сигналів. Мета попередньої обробки полягає в тому, щоб забезпечити отримання однакових по інтенсивності та протилежних по фазі завадових сигналів, які надходять на суматор Σ (див. рис. 1.2). При цьому завади на виході суматора Σ компенсуються, а корисні сигнали проходять на вихід і використовуються при подальшій обробці.

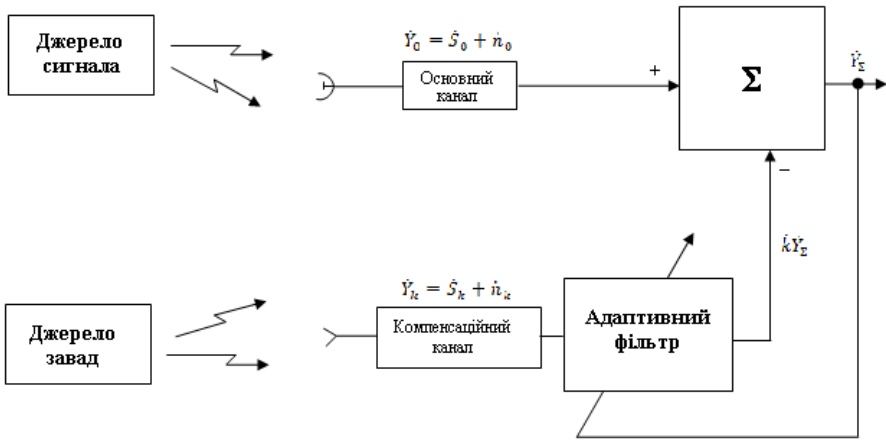


Рисунок 1.2

Технічно простіше когерентна обробка сигналів реалізується на проміжній частоті, або після їх перетворення в цифрову форму.

Для забезпечення однакових амплітуд та протифазності завадових сигналів в каналах на входах суматора Σ необхідне безперервне підстроювання параметрів сигналу в компенсаційному каналі у відповідності зі зміною зовнішніх факторів. Для цього використовують метод адаптивної компенсації завад, як це показано на рис. 1.2. При цьому на основний канал надходить адитивна суміш корисного сигналу \dot{S}_0 та завади \dot{n}_0 . На компенсаційний канал надходить завада \dot{n}_k та корисний сигнал \dot{S}_k меншого рівня, як це показано на рис. 1.3.

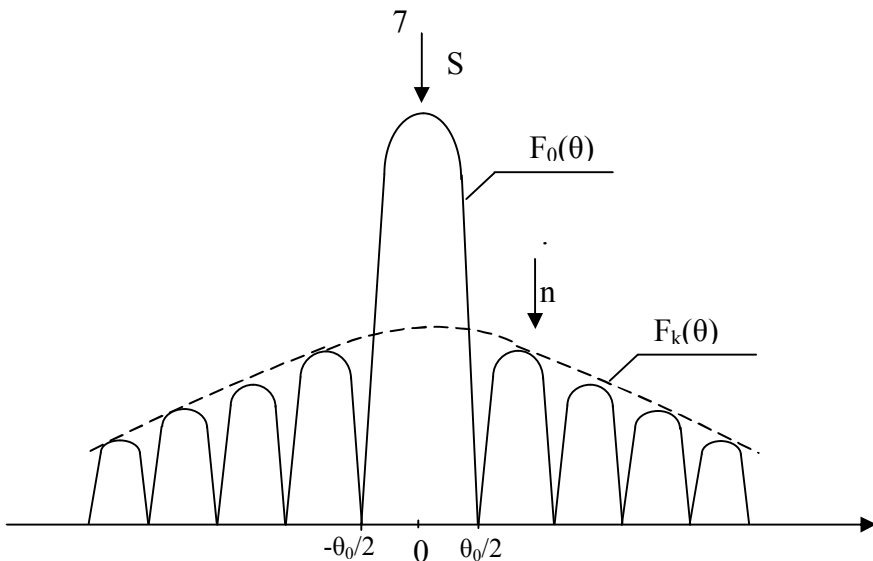


Рисунок 1.3

Оскільки активна шумова завада є маскуючою (має велику протяжність в часі), а корисний сигнал в імпульсній РЛС достатньо короткий (наприклад, $1 \cdot 10^{-6}$ с), то адаптивний фільтр настроює ваговий коефіцієнт \dot{k} тільки по заваді і забезпечує її компенсацію. Крім того за рахунок просторових відмінностей між напрямками дії корисного сигналу \dot{S} і завади \dot{n} (див. рис. 1.3) амплітуда сигналу в компенсаційному каналі набагато менша ніж в основному, а рівні завади приблизно однакові. За рахунок цих двох чинників корисний сигнал на виході адаптивного фільтра при ваговому коефіцієнті, настроєному на заваду, не компенсується. На виході суматора Σ формується сигнал:

$$\dot{Y}_{\Sigma} = \dot{n}_0 + \dot{S}_0 - \dot{k}(\dot{n}_k + \dot{S}_k), \quad (1.2)$$

де \dot{k} – ваговий коефіцієнт адаптивного фільтра.

Враховуючи, що $|\dot{S}_k| \ll |\dot{S}_0|$, а також те, що алгоритм формування вагового коефіцієнта \dot{k} , який забезпечує рівність інтенсивності завад \dot{n}_0 та \dot{n}_k , а також їх протифазність, вираз (1.2) можна подати у вигляді:

$$\dot{Y}_{\Sigma} = \dot{S}_0, \quad (1.3)$$

тора. Процес компенсації завади заключається в мінімізації дисперсії завади на виході суматора Σ шляхом формування відповідних коефіцієнтів передачі для кожного із квадратурних підканалів компенсаційного каналу. Оскільки коефіцієнти передачі квадратурних підканалів визначаються ваговими коефіцієнтами, які надходять з виходів інтеграторів, то процес компенсації полягає в формуванні оптимальних, в сенсі мінімуму дисперсії завади на виході автокомпенсатора, вагових коефіцієнтів. З рис. 1.4 виходить, що вагові коефіцієнти визначаються як:

$$k_{\parallel} = \mu \overline{\dot{U}_{\Sigma} U_{k\parallel}},$$

$$k_{\perp} = \mu \overline{\dot{U}_{\Sigma} U_{k\perp}},$$

де μ – скалярна величина, яка визначає глибину зворотного зв'язку.

В наведеній функціональній схемі автокомпенсатора усереднення вагових коефіцієнтів забезпечується інтегруванням.

Для подальшого розгляду різних алгоритмів роботи автокомпенсаторів припустимо, що обробка сигналів в компенсаційному каналі виконується в комплексному вигляді. При цьому функціональна схема, яка наведена на рис. 1.4, спрощується і має вигляд, поданий на рис. 1.5.

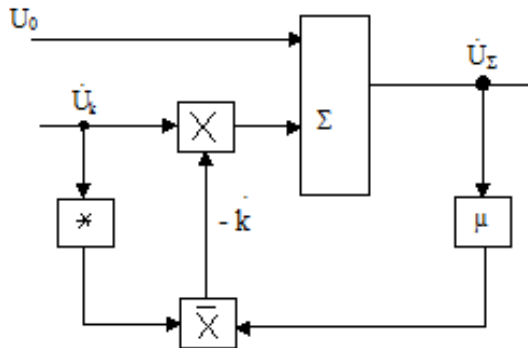


Рисунок 1.5

З рис. 1.5 виходить, що на виході суматора Σ формується сигнал:

$$\dot{U}_{\Sigma} = \dot{U}_0 - \dot{k}\dot{U}_k. \quad (1.4)$$

В колі кореляційного зворотного зв'язку на виході помножувача-усереднювача \bar{X} формується ваговий коефіцієнт:

$$\dot{k} = \mu \overline{\dot{U}_{\Sigma} U_k^*}, \quad (1.5)$$

де позначка $*$ означає операцію комплексного сполучення, яке забезпечує зсув фази сигналу \dot{U}_k для реалізації від'ємного зворотного зв'язку.

Підстановкою рівняння (1.4) в (1.5) можна встановити зв'язок між ваговим коефіцієнтом автокомпенсатора і сигналом активної завади \dot{U}_0 , яка діє в основному каналі та підлягає компенсації на виході суматора Σ :

$$\dot{k} = \frac{\mu \overline{\dot{U}_0 \dot{U}_k^*}}{1 + \mu \left(\overline{\dot{U}_k} \right)^2}, \quad (1.6)$$

Вираз (1.6) отримано з урахуванням того, що $\overline{\dot{U}_k \dot{U}_k^*} = \overline{\dot{U}_k}^2$. Підстановка отриманого значення вагового коефіцієнта (1.6) в рівняння (1.4) надає можливість отримати алгоритм роботи автокомпенсатора з кореляційним від'ємним зворотним зв'язком

$$\dot{U}_{\Sigma} = \dot{U}_0 - \frac{\mu \overline{\dot{U}_0 \dot{U}_k^*}}{1 + \mu \left(\overline{\dot{U}_k} \right)^2} \dot{U}_k. \quad (1.7)$$

З рівняння (1.7) виходить, що при достатньо великому підсиленню завади в колі зворотного зв'язку $\mu \rightarrow \infty$ і високій кореляції активної шумової завади в каналах прийому забезпечується її повна компенсація, тобто $\dot{U}_0 \rightarrow 0$.

З виразу (1.6) безпосередньо можна отримати алгоритм формування вагового коефіцієнта автокомпенсатора з прямим обчисленням, тобто без кореляційного зворотного зв'язку. Дійсно, якщо коефіцієнт

підсилення μ в колі зворотного зв'язку достатньо великий, то одиницею в знаменнику виразу (1.6) можна знехтувати. Тоді

$$\dot{k} = \frac{\overline{\dot{U}_0 \dot{U}_k^*}}{(\overline{\dot{U}_k})^2}, \quad (1.8)$$

де в чисельнику наведена оцінка кореляційного моменту між завадами основного і компенсаційного каналів, а в знаменнику – дисперсія завади, яка діє в компенсаційному каналі.

Автокомпенсатор з прямим обчисленням вагового коефіцієнта має переваги. Він забезпечує більш високу стабільність (стійкість) і швидкодію.

При проектуванні систем захисту радіолокатора від активних шумових завад швидкодія автокомпенсатора обмежується допустимою компенсацією корисного сигналу. Тому тривалість перехідного процесу t_n вибирають рівною

$$t_n \geq (5 \dots 10) \tau_i, \quad (1.9)$$

де τ_i – тривалість корисного сигналу.

Ефективність дії автокомпенсатора характеризується коефіцієнтом ослаблення завади:

$$K_n = 10 \lg \sigma_0^2 / \sigma_\Sigma^2 \text{ [дБ]}, \quad (1.10)$$

де σ_0^2 і σ_Σ^2 – дисперсія завади на основному вході і на виході автокомпенсатора, відповідно.

Коефіцієнт ослаблення залежить від величини дисперсії активної завади відносно власних шумів приймальних пристроїв, а також від ідентичності завад на входах автокомпенсатора і визначається величиною модуля нормованого міжканального коефіцієнта кореляції ρ у відповідності з формулою:

$$K_n = \frac{1}{1 - \rho^2}. \quad (1.11)$$

Область визначення ρ визначається інтервалом $[0, 1]$. При проектуванні радіолокатора з метою збільшення міжканальної кореляції завад і, відповідно, коефіцієнта ослаблення необхідно забезпечити

ідентичність амплітудно-частотних і фазочастотних каналів прийому в динамічному діапазоні заводових сигналів.

1.3 Опис лабораторної установки

Функціональна схема лабораторної установки наведена на рис. 1.6.

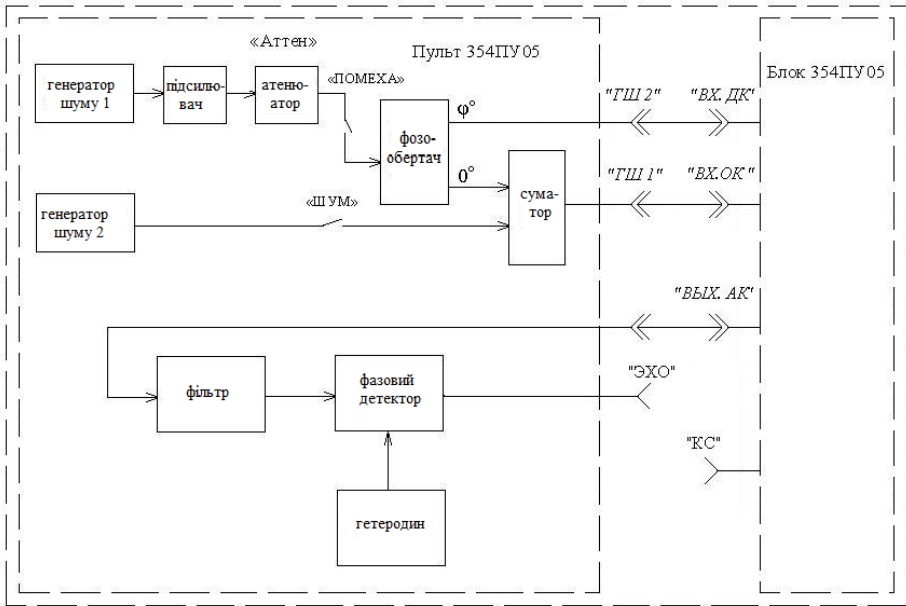


Рисунок 1.6

Установка складається з двох основних частин: блока 354ПУ05, який містить автокомпенсатор, та пульта управління 354ПУ05. Пульт управління містить два генератори шуму, підсилювач, атенюатор, фазообертач, суматор, вузькосмуговий фільтр, фазовий детектор, гетеродин. Генератори шуму 1 і 2 включаються тумблерами «ПОМЕХА» і «ШУМ», відповідно. Регулювання рівня завади задається перемикачем «АТТЕН». Генератор шуму 2 імітує власний шум основного каналу автокомпенсатора і в суматорі складається з сигналом завади. На

виходах фазообертача різниця фаз може змінюватися в діапазоні $0 - 360^{\circ}$ з кроком 45° (для вимірювання фазової характеристики автокомпенсатора). Згенеровані сигнали надходять на входи блока 354ПУ05 «ВХ. ОК» и «ВХ. ДК». Крім того, на вхід КС блока 354 ПУ05 надходить імпульсний сигнал. Він змішується з завадою, яка надходить на вхід основного каналу автокомпенсатора «ВХ. ОК» і слугує для імітації ехо-сигналу. З виходу автокомпенсатора «ВЫХ. АК» сигнал надходить через вузькосмуговий фільтр на вхід фазового детектора, на вході якого вимірюються основні параметри та характеристики автокомпенсатора завод.

1.4 Правила безпеки

Блок живлення, який використовується в лабораторній установці, та вимірювальні прилади підключені до електричної мережі напругою 220 В. Тому забороняється торкатися блоків живлення та кабелів підключення вимірювальних приладів після їх під'єднання до мережі. При необхідності треба звернутися до викладача.

1.5 Підготовка до роботи

Зберіть робоче місце у відповідності до рис. 1.7.

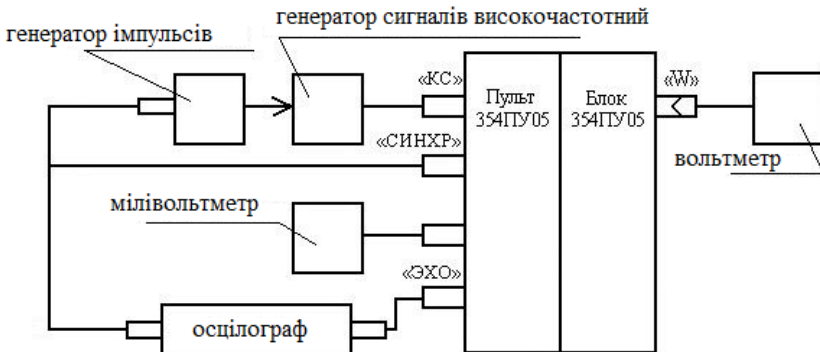


Рисунок 1.7

Перевірте наявність заземлення корпусів приладів.

Включить вимірювальні прилади.

Перед підключенням приладу в коло, що контролюється, перевірте правильність установки перемикача роду роботи. Перемикач меж вимірів встановлюйте в положення, що відповідає максимальному значенню.

Генератор імпульсів має працювати в режимі зовнішнього запуску. Органи управління установіть в положення, які забезпечуть на його виході формування імпульсів позитивної полярності з амплітудою 2В, тривалістю 2мкс, затримані відносно імпульсів запуску на 10 мкс. Генератор сигналів високочастотний включити в режим імпульсної модуляції та встановіть частоту генератора, що дорівнює 24МГц.

Встановіть органи управління пульта в наступні положення:

- тумблери в нижнє положення;
- перемикачі: «ПОЛОСА» – F4, «РЕЖИМ» – ИЗ10, «ФАЗА» – 0, «АТТЕН» – 30;
- тумблер «ВКЛ» в верхнє положення.

Переконайтесь в наявності всіх напруг живлення.

1.6 Порядок виконання роботи

Пункти 1 – 4 виконуються на другому рівні вищої освіти, пункти 1 – 7 на третьому рівні вищої освіти.

1. Виміряйте рівень власних шумів основного каналу автокомпенсатора $U_{в.ш.}$. Для цього включіть тумблер «ШУМ» і виміряйте мілівольтметром напругу на виході фазового детектора (гніздо «ЕХО») пульта та замалуйте осцилограму сигналу з осцилографа, підключивши його замість мілівольтметра.

2. Сформуєте ехо-сигнал. Для цього включіть генератор високочастотних сигналів та встановіть рівень його вихідного сигналу таким, щоб амплітуда імпульсу на виході фазового детектора дорівнювала $2 \cdot 10^2$ мВ. Замалуйте осцилограму на виході фазового детектора.

3. Включіть активну шумову заваду тумблером «ПОМЕХА». Встановіть перемикач «АТТЕН» в положення 20 дБ. Виміряйте мілівольтметром напругу на виході фазового детектора – U_1 . За формулою:

$$\gamma = 20 \lg \frac{U_1}{U_{\text{в.ш.}}} , [\text{дБ}]$$

розрахуйте відношення завади / власний шум. Замалюйте осцилограму на виході фазового детектора.

Включіть тумблер «АП» на панелі блока 354ПУ05. Виміряйте напругу на виході фазового детектора – U_2 . Замалюйте осцилограму сигналу на виході фазового детектора. За формулою:

$$K_{\text{п}} = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} , [\text{дБ}]$$

розрахуйте коефіцієнт ослаблення завади. Виключіть тумблер «АП». Виключіть генератор сигналів височастотний.

4. Виміряйте амплітудну характеристику автокомпенсатора. Для цього перемикач «АТТЕН» встановіть в положення 0 дБ. Виміряйте напругу на виході фазового детектора – U_3 . Включіть тумблер «АП» і виміряйте напругу на виході фазового детектора – U_4 . Виключіть «АП». За формулою:

$$K_{\text{п}} = 20 \lg \frac{U_3}{U_4} , [\text{дБ}]$$

розрахуйте коефіцієнт ослаблення завади. За цією методикою виміряйте коефіцієнт ослаблення завади у всіх положеннях перемикача «АТТЕН». Результати вимірювань зведіть в таблицю 1 і збудуйте залежність коефіцієнта ослаблення від інтенсивності завади відносно власних шумів:

$$K_{\text{п}} = 20 \lg \frac{U_4}{U_{\text{в.ш}}} , [\text{дБ}].$$

5. Виміряйте перехідну характеристику автокомпенсатора. Для цього підключіть осцилограф до гнізда «ЭХО». Включіть тумблер «АП» та «СБРОС» блока 354ПУ05. По осцилографу розгляньте перехідний процес автокомпенсатора (див. рис. 1.8). До моменту часу t_1 діє власний шум основного каналу. В момент t_1 по передньому фронту імпульсу синхронізації ИЗ 16 включається активна завада. В момент часу t_2 по задньому фронту імпульсу ИЗ 16 активна завада виключається. Замалюйте осцилограму напруги. Виміряйте інтервал часу від початку до кінця перехідного процесу $t_{\text{перех}}$.

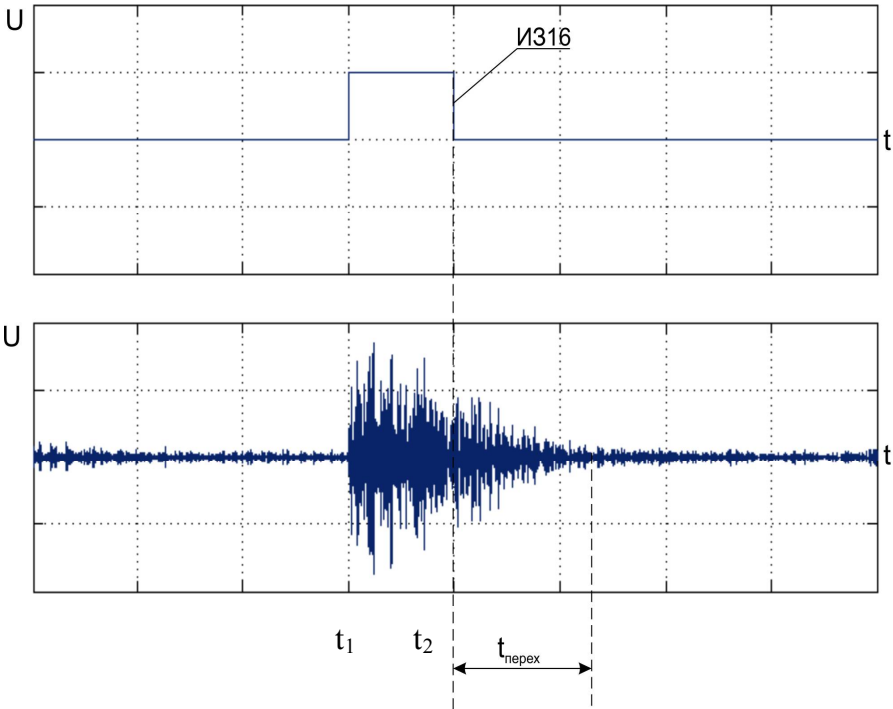


Рисунок 1.8

6. Проведіть дослідження фазової характеристики автокомпенсатора завад. Для цього виміряйте залежність вагових коефіцієнтів від різниці фаз завади в основному і компенсаційному каналі. Установіть перемикач «АТТЕН» в положення 20дБ. Підключіть вольтметр до гнізд W на боковій стороні блока 354ПУ05. Включіть тумблер АП. Повертаючи вісь перемикача ФАЗА по часовій стрілці, виміряйте величину напруги A на гніздах W в кожному положенні згаданого перемикача та зведіть отримані результати залежності вагового коефіцієнта W_1 квадратурного підканала від зсуву фази φ між основним і компенсаційним каналом автокомпенсатора в таблицю 2.

Включіть тумблер ДИФФ і таким же чином, повертаючи вісь перемикача ФАЗА, визначте залежність вагового коефіцієнта W_2 іншого квадратурного каналу від зсуву фази φ між основним і компен-

саційним каналом автокомпенсатора. Зведіть отримані результати в таблицю 3.

Обидві залежності представте на рисунку 1.9 в декартовій системі координат: по осі ординат – амплітуда напруги A ; по осі абсцис – фаза φ . Визначте величину похибки квадратурної обробки та запропонуйте метод її зменшення.

7. Проведіть дослідження ефективності адаптивного просторового фільтра на базі автокомпенсатора завад в діапазоні між каналних фазових зсувів $[0^\circ - 360^\circ]$. Оцінку ефективності проведіть шляхом вимірювання коефіцієнта ослаблення завади при її фіксованій потужності. Для цього вимкніть тумблер ДИФФ та зафіксуйте перемикач АТТЕН в положенні 0дБ. В кожному положенні перемикача ФАЗА виміряйте напругу на виході фазового детектора: як при виключеному автокомпенсаторі – U_3 , так і включеному тумблером АП на панелі блока 354ПУ05 – U_4 . Результати вимірювань зведіть в таблицю 4. Розрахуйте коефіцієнт ослаблення за наведеною формулою.

Залежність коефіцієнта ослаблення завади K_{Π} просторового фільтра від міжканального зсуву фази, що виникає при скануванні антени РЛС, представте на рисунку 1.10. Проведіть сумісний аналіз результатів досліджень, отриманих в п.п. 6 та 7. Визначте причину погіршення коефіцієнта ослаблення активної завади в діапазоні фазових зсувів $[0^\circ - 360^\circ]$. Запропонуйте можливі методи підвищення ефективності адаптивних просторових фільтрів.

За результатами проведення роботи оформіть звіт. Користуючись переліком літератури та контрольними питаннями, підготуйтеся до її захисту.

2 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що собою являє активна шумова завада?
2. Принцип компенсації активних шумових завад.
3. Необхідні умови для реалізації компенсації.
4. Основні характеристики автокомпенсаторів.
5. Структурна схема квадратурного автокомпенсатора.
6. Чим викликана необхідність квадратурної обробки сигналів в автокомпенсаторі?

7. У чому полягає основна відмінність автокомпенсаторів зі зворотним зв'язком і з прямим обчисленням вагових коефіцієнтів?
8. Що собою являє перехідний процес автокомпенсатора?
9. Які вимоги висуваються до тривалості перехідного процесу?
10. Як реагує автокомпенсатор на появу завади?

3 ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пиза Д.М. Теорія і проектування радіолокаційних систем: навчальний посібник [Текст] / Д.М. Пиза, Б.М. Бондарев. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2015. – 82 с.
2. Васюта К.С. Основи побудови радіолокаційних засобів розвідки повітряного простору: конспект лекцій / К.С. Васюта, О.В. Тесленко, В.М. Купрій, О.А. Малишев. – Х.: ХУПС, 2013. – 212 с.: іл.
3. Яновський Ф.Й. Метеонавігаційні радіолокаційні системи повітряних суден / Ф.Й. Яновський. – К.: НАУ, 2003. – 307 с.
4. Яновський Ф.Й. Радіолокаційні системи повітряних суден: підруч. / Ф.Й. Яновський. – К.: НАУ, 2012. – 688 с.
5. Пиза Д.М. Проектирование радиолокационных систем [Электронный ресурс]: монография / Д.М. Пиза, Д.С. Семенов, Т.И. Бугрова; под. общ. ред. Д.М. Пизы. Электронные данные. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. <http://eir.zp.edu.ua/handle/123456789/2216?mode=full>
6. Сумик М.М. Космічні радіотехнічні комплекси / М.М. Сумик – Львівська політехніка, 2004. – 183 с.