

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

ШУМИ. ЕКВІВАЛЕНТНА ТЕМПЕРАТУРА

Методичні рекомендації
до виконання лабораторної роботи ТЕЗ-4
з дисципліни «Теорія електричного зв'язку»
для студентів спеціальності
172 Телекомунікації та радіотехніка

Дніпро
2020

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»



ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій

ШУМИ. ЕКВІВАЛЕНТНА ТЕМПЕРАТУРА

Методичні рекомендації
до виконання лабораторної роботи ТЕЗ-4
з дисципліни «Теорія електричного зв'язку»
для студентів спеціальності
172 Телекомунікації та радіотехніка

Дніпро
НТУ «ДП»
2020

Шуми. Еквівалентна температура. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи ТЕЗ-4 з дисципліни «Теорія електричного зв'язку» для студентів спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка / В.І. Корнієнко, О.Ю. Гусєв, О.І. Нікольська, І.Г. Олішевський ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2020. – 17 с.

Автори:

В.І. Корнієнко, д-р техн. наук, проф. ;
О.Ю. Гусєв, канд. фіз.-мат. наук, проф. ;
О.І. Нікольська, ст. викл. ;
І.Г. Олішевський, асист.

Затверджено методичною комісією за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка (протокол № 1 від 15.10.2020) за поданням кафедри безпеки інформації та телекомунікацій (протокол № 3 від 13.10.2020).

Методичні рекомендації призначено для виконання лабораторних робіт з дисципліни «Теорія електричного зв'язку» студентами спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка.

Орієнтовано на активізацію навчальної діяльності бакалаврів та закріплення практичних знань з даної дисципліни.

Відповідальний за випуск завідувач кафедри безпеки інформації та телекомунікацій В.І. Корнієнко, д-р техн. наук, проф.

Зміст

Мета та програма роботи.....	4
1 Попередня підготовка до роботи.....	4
2 Визначення шуму.....	4
3 Визначення теплового шуму.....	5
4 Визначення дробового шуму.....	7
5 Розрахунок напруги теплового та дробового шумів.....	8
6 Визначення флікер-шуму.....	9
7 Ефективна шумова температура.....	9
8 Шуми в радіосистемах.....	10
9 Розрахунок ефективної шумової температури та потужності шуму на виході ланцюга.....	12
Вимоги до оформлення звіту.....	14
Контрольні питання.....	14
Список літератури.....	15
Додаток. Зразок титульного аркуша для лабораторних робіт.....	16

Мета та програма роботи

Мета – засвоїти різні типи шумів, навчитися розраховувати величину шумів і еквівалентну шумову температуру в апаратурі зв'язку.

Програма роботи

1. Попередня підготовка до роботи.
2. Визначення шуму.
3. Визначення теплового шуму.
4. Визначення дробового шуму.
5. Розрахунок напруги теплового і дробового шумів.
6. Визначення флікер-шуму.
7. Ефективна шумова температура.
8. Шуми в радіосистемах.
9. Розрахунок ефективної шумової температури і потужності шуму на виході кола.

1 Попередня підготовка до роботи

Використовуючи конспект лекцій та літературу, засвоїти види та властивості шумів.

2 Визначення шуму

Електричний шум можна визначити, як небажану енергію, що супроводжує сигнал в електронній системі. У будь-якій точці системи, крім сигналу, завжди присутні шуми. Це явище – невід'ємна властивість електронного кола. Воно виникає внаслідок спільного впливу ряду як подібних, так і зовсім різних процесів. Можна припустити, що присутність шумів у системі призводить до порушення її працездатності, однак насправді більшість систем функціонує цілком нормально, якщо рівень шумів не перевищує деякого рівня.

У системах зв'язку розрізняють два типи шумів. Шуми одного типу називаються *промисловими* або *штучними*. Їхній рівень можна зменшити

шляхом поліпшення конструкції систем зв'язку, наприклад, приглушаючи джерела перешкод і екрануючи чуттєві елементи схеми. Штучні шуми виникають у результаті впливу на систему різноманітних електромагнітних випромінювань, джерелами яких можуть служити промислове устаткування, потужнострумові комутаційні кола та інше.

Шуми другого типу є *природними*. На відміну від штучних, багато типів природних шумів усунути не можна, оскільки вони виявляються в результаті природних явищ: шуми атмосферні (розряди блискавок), космічні (випромінювання зірок) та ін.

Частину шумів у систему вносять електричні й електронні компоненти.

3 Визначення теплового шуму

Унаслідок теплового руху атомів провідника чи резистора в речовині виникають вільні електрони. Ці електрони хаотично рухаються в різних напрямках з різними швидкостями. Їхній рух приводить до появи випадкової різниці потенціалів на кінцях провідника чи резистора. Середнє значення цієї різниці потенціалів дорівнює нулю. Таким чином, ми маємо справу із шумовим, тобто стохастичним, процесом. Виникаючий при цьому шум зветься *тепловим шумом*, тому що його енергія зростає зі збільшенням температури.

Спрощена модель теплового шуму включає еквівалентне джерело шумової напруги E_u з внутрішнім опором R_u (безшумним). Значення напруги цього джерела змінюється в часі згідно з гауссовою функцією розподілу ймовірностей, і його середнє значення дорівнює нулю. Це значить, що знак шумової напруги не постійний і випадково змінюється, а його спектр рівномірно розподілений у діапазоні від 0 до 10^{13} Гц. Якщо джерело шуму замкнути накоротко, то потужність шуму, що розсіюється на опорі R_u , визначається такою формулою:

$$P_u = 4kTB,$$

де k – постійна Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – абсолютна температура,

виражена в градусах за шкалою Кельвіна, K ; B – розглянута ширина смуги частот, наприклад, смуга пропускання вимірювального приладу системи.

Потужність, що розсіюється на резисторі R_u в коротко замкнутій схемі, можна визначити в такий спосіб:

$$P_u = 4kTB = E_u^2 / R_u,$$

звідкіля напруга шуму

$$E_u = \sqrt{(4kTB R_u)}. \quad (1)$$

З рівняння (1) видно, що напруга, що виникає на резисторі в результаті впливу теплового шуму, є функцією температури, смуги частот і номіналу резистора.

На практиці важливо знати шуми, що надійшли в навантаження. Звичайно в системі зв'язку джерело сигналу та навантаження погоджені з метою досягнення передачі максимальної енергії. *Еквівалентною шумовою потужністю* називається максимальна шумова потужність, що може розсіюватися при заданих умовах на навантажувальному опорі. Розглянемо джерело шуму, підключене до опору навантаження R_n (безшумного).

Еквівалентна шумова потужність, що розсіюється на навантаженні,

$$P_n = \hat{E}_u^2 R_n / (R_u + R_n)^2,$$

де \hat{E}_u – напруга шуму, що виникає на внутрішньому опорі R_u джерела шумової напруги при температурі T_u . За умови узгодження джерела напруги з навантаженням (тобто $R_u = R_n$) потужність P_n можна виразити як:

$$P_n = \hat{E}_u^2 / (4R_n),$$

чи з урахуванням (1) –

$$P_n = kT_u B. \quad (2)$$

Звідси, якщо джерело шуму погоджене з навантаженням, легко розрахувати еквівалентну шумову потужність, що розсіюється в навантаженні в заданій смузі частот B , знаючи температуру внутрішнього опору джерела шуму. На практиці навантаженням може служити вхідний опір проміжної підсистеми.

За аналогією з білим світлом, що складається із суміші кольорів веселки, цей шум одержав назву *білого шуму*, тому що в його спектрі присутні всі частоти.

4 Визначення дробового шуму

Дробовий шум – наступний за значимістю вид електричних шумів після теплового. Скрізь, де через який-небудь активний пристрій (напівпровідниковий чи вакуумний) тече постійний чи змінний (що має ненульове середнє значення) струм, відбуваються випадкові коливання величини цього струму, що накладаються на сигнал і спотворюють його. Це відбувається внаслідок різниці в часі приходу частинок – носіїв електричного заряду на один з електродів; відповідно виникає випадкова чи шумова компонента струму, що складається із середнім значенням сигналу.

Дробовий шум, на відміну від теплового, має місце тільки в активних пристроях. Однак з погляду практичних задач він має дуже схожі властивості, а його потужність також пропорційна смузі частот. Назва дробового шуму походить від специфічного потрiскування, яке можна почути в навушниках, якщо підсилити сигнал за допомогою підсилювача низької частоти. Це потрiскування нагадує стукіт дробинок, що падають на металеву поверхню.

Середньоквадратичне значення струму I_u дробового шуму, аж до частот гігагерцового діапазону, можна описати таким виразом:

$$I_u = \sqrt{(2qI_{cm}B)},$$

де q – заряд електрона, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; I_{cm} – постійний струм зсуву;
 B – смуга частот.

Динамічний опір R_D переходу напівпровідникового діода має формулу

$$R_D = k / (qI_{cm}). \quad (3)$$

5 Розрахунок напруги теплового та дробового шумів

Через напівпровідниковий діод при температурі T протікає струм, середнє значення якого дорівнює $I_{см}$. Діод послідовно з'єднаний з навантажувальним резистором з опором R_n . Визначіть шумову напругу на навантаженні V_n . Смуга частот дорівнює B .

Розв'язок

Напруга шуму V_n , що виникає на навантаженні, є результатом впливу напруг від дробового V_{dp} і теплового V_m шумів відповідно.

Щоб визначити напругу V_{dp} , спочатку необхідно розрахувати опір R_d динамічного переходу напівпровідникового діода.

Визначимо R_d відповідно до рівняння (3).

Тоді напруга дробового шуму буде

$$V_{dp} = I_{см} R_d.$$

Тепер знайдемо значення напруги теплового шуму відповідно до (1):

$$V_m = \sqrt{kTB R_n}.$$

Напруги різних типів шумів на навантаженні можна знайти за правилом розподілу напруги на двох послідовно з'єднаних резисторах. Напруга на R_n , викликана дробовим і тепловим шумами, має такі формули:

$$\widehat{V}_{dp} = V_{dp} R_n / (R_d + R_n),$$

$$\widehat{V}_m = V_m R_n / (R_d + R_n).$$

Загальну напругу шумів V_n на навантаженні знайдемо як середньоквадратичне значення суми напруг теплового і дробового шумів, тобто

$$V_n = \sqrt{(\widehat{V}_m^2 + \widehat{V}_{dp}^2)}.$$

Величина напруги теплового шуму на кілька порядків менше напруги дробового шуму, а загальна напруга шумів на навантаженні практично дорівнює напрузі дробового шуму. Таке співвідношення ступеня впливу цих шумів досить близько відповідає практиці й у цьому сенсі є типовим.

6 Визначення флікер-шуму

У напівпровідникових пристроях *флікер-шум* виникає внаслідок дефектів кристалічної структури матеріалу, що приводять до флуктуацій провідності. Флікер-шуми практично неможливо змоделювати, тому що вони можуть варіюватися від пристрою до пристрою. При цьому вони властиві не тільки напівпровідниковим, але і багатьом іншим приладам, наприклад, вакуумним. Потужність цього виду шуму пропорційна струму зсуву і зворотно пропорційна частоті. Завдяки останній властивості флікер-шум часто називають також шумом $1/f$, щоб підкреслити характер його залежності від частоти f . Це означає, що в спектральній області практично вся потужність флікер-шуму плавно падає з ростом частоти, а не рівномірно розподілена по всій спектральній області, як у випадку теплового шуму. З цієї причини такий шум ще називають *рожевим*. У більшості практичних застосувань на частотах понад 1 кГц флікер-шумом можна знехтувати (умовно вважають, що цей шум займає смугу $0,1 \dots 10^3$ Гц).

7 Ефективна шумова температура

Еквівалентну потужність шуму, створювану джерелом сигналу на навантаженні, можна знайти за допомогою еквівалентної електричної схеми, наприклад, схеми заміщення з джерелом напруги (схеми Тевеніна). Користуючись подібною моделлю, можна швидко і точно визначити еквівалентну потужність шуму. Однак, якщо навантаження підключене до джерела через проміжну ланку, то набагато менш очевидно, яка еквівалентна потужність шуму виділиться на навантаженні, особливо (як звичайно і буває на практиці), якщо сама проміжна ланка також є джерелом шумів.

Еквівалентну потужність шуму на навантаженні, що складають джерело сигналу і проміжні ланки схеми, можна подати за допомогою спеціального параметра: *шумової температури*, зв'язаної з температурою внутрішнього опору джерела R_u . Ця температура є сумою температури T_u опору джерела та ефективної шумової температури проміжних ланок, T_s .

Ефективною шумовою температурою називається температура опору R_u , що приводить до появи на ньому такої ж потужності шуму, як і створювана проміжними ланками системи. За умови узгодження навантаження маємо

$$P_{вих} = GP_{ex} + P_3, \quad (4)$$

де P_3 – потужність шуму в навантаженні, що виникає внаслідок шумів проміжних ланок схеми за умови узгодження навантаження; G – коефіцієнт підсилення проміжних ланок.

Можна застосувати й інший підхід. До входу абсолютно не шумливої схеми підключається джерело шуму потужністю P'_{ex} , що при передачі через ланки схеми призводить до появи на навантаженні потужності шуму $P_{вих}$:

$$P_{вих} = GP'_{ex} = Gk(T_u + T_3)B = GP_{ex} + GkT_3B.$$

У цьому випадку $P_3 = GkT_3B$, звідкіля ефективна шумова температура проміжних ланок визначається як

$$T_3 = P_3 / (GkB). \quad (5)$$

8 Шуми в радіосистемах

Шуми в радіочастотному діапазоні можуть виникати внаслідок різних природних явищ. Наприклад, електростатичний розряд, викликаний блискавкою, призводить до виникнення *атмосферних шумів*. Як правило, частотний діапазон цих завад не перевищує 20 МГц. Через періодичні атмосферні розряди в радіоприймачі виникає імпульсний шум. Цей шум передається на великі відстані, тому характерне потріскування можна чути в приймачі практично завжди. Іноді розряди відбуваються настільки часто, що шум переростає з імпульсного в майже безперервний. Іншим видом атмосферних завад є *квантові шуми*, що найбільш помітні на частотах понад 10 ГГц. Квантові шуми виникають унаслідок зміни станів атомів та молекул атмосферних частинок. Крім того, сама Земля випромінює додаткові теплові шуми: земні чи *геошуми*. Вони помітні на частотах більш 200 МГц, а інтенсивність їх підвищується з ростом частоти.

Крім ефектів, зв'язаних з природними процесами, які відбуваються в атмосфері та на поверхні Землі, існують зовнішні шуми, що називаються *космічними*. Сонце випромінює відчутний шум, що називається *сонячним шумом*. Його частоти лежать у діапазоні від 10 МГц до 10 ГГц. Інші зірки Всесвіту також випромінюють перешкоди на радіочастотах, але, внаслідок величезних відстаней до Землі, ці шуми помітні лише на частотах до 1 ГГц.

Вплив зовнішнього випромінювання, що надходить у приймач з атмосфери та космосу, можна об'єднати, назвавши їх *небесними* шумами. Рівень цих шумів, як правило, значно менше рівня внутрішніх шумів приймача, за винятком тих випадків, коли антена спрямована безпосередньо на Сонце. Небесні шуми мінімальні в мікрохвильовому діапазоні частот (порядку декількох гігагерц), і саме з цієї причини перші супутники зв'язку працювали в гігагерцовому діапазоні (наприклад, на частоті 6,4 ГГц, де існує так назване "вікно прозорості"). На частотах понад 10 ГГц переважає атмосферний шум, виникнення якого зв'язане з озоновим шаром; його амплітуда збільшується з ростом частоти.

Небесні шуми, що надходять в антену, можна подати як ефективну шумову температуру в смузі частот, асоційовану з опором антенного пристрою. Ця температура є дуже корисним параметром при аналізі впливу шумів на радіосистеми.

Виробники антен часто зазначають у специфікації величину температури, щоб врахувати небесні шуми і внутрішні шуми в самій антені. Ефективна шумова температура додатково до власних шумів антени може також характеризувати шумовий внесок підсилювача і фідерного тракту (провідника, що з'єднує вихід антени з устаткуванням приймача).

Типова система супутникового зв'язку має ефективну шумову температуру порядку 20 К в приймачі та 20 К в антені. Порівняйте ці цифри з радіосистемами, що працюють у діапазоні високих частот (ВЧ): температура шумів у приймачі досягає 290 К, а в антені – 2000 К. Очевидно, що рівень шумів у приймачі супутникової системи буде відчутно менше. Це має дуже

важливе значення для таких систем, оскільки в них сигнали передаються на величезні відстані.

Тепер розглянемо ефективну шумову температуру пасивного кола, такого як фідерний тракт антени. Припустивши, що всі компоненти електричного кола знаходяться при одній і тій же фізичній температурі T , вираз для потужності шуму на навантаженні згідно з формулою (4) з урахуванням (2) можна записати так:

$$kTB = GkTB + P_3,$$

звідси
$$P_3 = (1-G)kTB \quad (6)$$

Підставивши у вираз (5) замість P_3 вираз (6), одержимо формулу для ефективної шумової температури ланок кола:

$$T_3 = (1-G)/G T \quad (7)$$

Якщо коефіцієнт підсилення якої-небудь ланки менше 1, що, наприклад, справедливо для фідерного тракту, рівняння (7) може бути перетворене в більш зручну форму:

$$T_3 = (L-1)T, \quad (8)$$

де L – коефіцієнт втрат, зворотно пропорційний коефіцієнту підсилення G .

9 Розрахунок ефективної шумової температури та потужності шуму на виході кола

Приклад задачі

Коло з температурою T прокладене від джерела із шумовою температурою T_u . Потужність вхідного сигналу $P_{c\text{ вх}}$, а ширина смуги B . Коефіцієнт втрат кола L . Визначіть ефективну шумову температуру ланок кола T_3 , потужність вихідного сигналу $P_{c\text{ вих}}$ і потужність шуму на виході кола $P_{\text{вих}}$. Вихідні дані наведені в табл. 1.

Розв'язок

Ефективна шумова температура ланок кола T_3 визначається відповідно до виразу (8). Потужність вихідного сигналу має формулу

$$P_{c\text{ вих}} = P_{c\text{ вх}} / L$$

Потужність шуму на виході кола дорівнює сумі потужності шуму джерела P_n (визначається відповідно до виразу (2), зведеної до виходу кола, і потужності шуму ланок кола P_3 (визначається виразом (6)):

$$P_{\text{вих}} = P_n / L + P_3 = kT_u B / L + (1 - 1/L)kTB$$

Таблиця 1

Вихідні дані для етапу 4

<i>Варіант</i>	<i>T [°C]</i>	<i>I_{см} [мА]</i>	<i>R_n [кОм]</i>	<i>B [МГц]</i>
1	27	1	2	0,2
2	34	1,5	3	1
3	45	1,2	1	3
4	20	2	1,4	2
5	35	3	1,6	1,3
6	40	2,3	2,4	3
7	18	2,6	2,7	3
8	15	1,9	1,8	0,5
9	25	1,5	1,5	0,8
10	20	1,3	3	1

Таблиця 2

Вихідні дані для етапу 8

<i>Варіант</i>	<i>T [K]</i>	<i>T_u [K]</i>	<i>P_{c вх} [нВт]</i>	<i>B [МГц]</i>	<i>L / G</i>
1	270	1000	200	1000	2/ –
2	340	1500	300	500	1
3	450	1200	100	800	– / 3
4	200	2000	140	600	– / 2
5	350	1300	160	1200	3/ –
6	400	1200	240	850	– / 2
7	280	1600	270	960	3 / –
8	250	1900	180	750	– / 5
9	350	1500	150	600	2 / –
10	320	1300	300	820	1

Вимоги до оформлення звіту

Кожен студент повинен отримати допуск до захисту роботи. Для цього він виконує наведені далі завдання.

1. Подати викладачеві роздрукований звіт, що складається з титульного аркуша (див. додаток), **виконаних завдань** та **висновків**. Звіт має бути оформлений у текстовому редакторі MS Word. Текст потрібно набирати шрифтом Times New Roman, 14 pt, вирівнювати по ширині, формат сторінки А4, книжка, абзацний відступ 10 мм, поля 20 мм з кожного боку. Формули додавати за допомогою Microsoft Equation або редактора формул. Усі таблиці та рисунки мають бути підписані.

2. Відкрити на комп'ютері файл з виконаним завданням для перевірки.

3. Відповісти на всі питання стосовно виконаної роботи.

Звіт повинен містити:

1. Назву та мету роботи.

2. Розрахунок напруги теплового і дробового шумів.

3. Розрахунок ефективної шумової температури і потужності шуму на виході кола.

Контрольні питання

1. Штучні та природні шуми. У чому їх відмінності?

2. Як залежить еквівалентна шумова потужність теплового шуму від смуги частот?

3. Яка фізична природа дробового шуму?

4. На яких частотах фліккер-шумом можна знехтувати?

5. Чим визначається ефективна шумова температура ланок системи?

6. Які шуми діють у радіочастотному діапазоні?

Список літератури

1. Теорія електричного зв'язку: навч. посіб. / О.Ю. Гусев, Г.Ф. Конахович, В.І Корнієнко, Г.В. Кузнецов, О.Ю. Пузиренко. – Львів: Магнолія, 2006, 2010. – 364 с.
2. Gusev O.Yu. Theory of adaptive filtration: tutorial / O.Yu. Gusev, V.M. Gorev, V.I. Kornienko; Ministry of Education and Science of Ukraine, National Technical University “Dnipro Polytechnic”. – Dnipro: NTU “DP”, 2019. – 156 p.
3. Рид Р. Основы теории передачи информации / Р. Рид. – Москва: Вильямс, 2005. – 320 с.
4. Бендат Дж. Применение корреляционного и спектрального анализа / Дж. Бендат, А. Пирсол. – Москва: Мир, 1983. – 312 с.
5. Дьяконов В. МАТЛАБ 6. Учебный курс / В. Дьяконов. – Санкт-Петербург: Питер, 2001. – 592 с.
6. Friis H. T. Noise Figure of Radio Receivers / H.T. Friis // Prdc. IRE. – July. – 1994. – P. 419–422.

Зразок титульного аркуша для лабораторних робіт

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Факультет інформаційних технологій
Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій

Лабораторна робота ТЕЗ-4
«Шуми. Еквівалентна температура»
Варіант № 1

Виконав: ст. гр. 172-20-1
Петров Іван Петрович
Перевірив: професор Гусєв О.Ю.

Дніпро
НТУ «ДП»
2021

Корнієнко Валерій Іванович
Гусєв Олександр Юрійович
Нікольська Олена Ігорівна
Олішевський Ілля Геннадійович

ШУМИ. ЕКВІВАЛЕНТНА ТЕМПЕРАТУРА

Методичні рекомендації
до виконання лабораторної роботи ТЕЗ-4
з дисципліни «Теорія електричного зв'язку»
для студентів спеціальності
172 Телекомунікації та радіотехніка

Редактор Ю.В. Рачковська

Підписано до друку 11.11.2020. Формат 30x42/4.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.
Обл. - вид. арк. 0,9. Тираж 10 пр. Зам. №

НТУ «Дніпровська політехніка»
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.