

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Захист акустичної інформації Комп'ютерний практикум

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра
за освітньо-науковою програмою
«Електроніка»,
спеціальності 171 Електроніка*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Захист акустичної інформації: комп'ютерний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка» / уклад: А. М. Продеус; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,0 Мбайт). - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 101 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 2 від 09.12.2021 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол № 10/12 від 27.10.2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Захист акустичної інформації

Комп'ютерний практикум

Укладач: *Продеус Аркадій Миколайович, д-р техн. наук, проф.*

Відповідальний
редактор *Лазебний В.С., канд. техн. наук, доц.*

Рецензент: *Шуляк О. П., канд. техн. наук, доц., доцент кафедри електронної інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського*

Даний навчальний посібник складається із шести частин - шести лабораторних робіт із завданнями до комп'ютерного практикуму дисципліни «Захист акустичної інформації». Посібник призначений для здобувачів освіти рівня «магістр». Окрім практичних завдань, він містить необхідні теоретичні відомості. Метою лабораторних робіт є практичне закріплення питань прогнозування та вимірювання розбірливості мовлення формантним, модуляційним та формантно-модуляційним методами. В додатках до завдань викладено тексти відповідних комп'ютерних програм для середовища Matlab.

Навчальний посібник не тільки забезпечує проведення лабораторних робіт у формі комп'ютерних практикумів, але й буде корисним на лекційних заняттях із дисципліни «Захист акустичної інформації».

Крім того, навчальний посібник буде корисним студентам акустичних та телекомунікаційних спеціальностей технічних навчальних закладів, що навчаються за спеціальністю «Електроніка», а також фахівцям в галузі акустичної експертизи та корекції комунікаційних каналів.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

Вступ	5
Лабораторна робота №1. Прогнозування розбірливості мовлення, замаскованого шумовою завадою	6
Контрольні запитання	7
Додаток 1.1. Прогнозне оцінювання розбірливості мовлення замаскованого шумовою завадою методом аналітичного моделювання	8
Додаток 1.2. Аналітичний опис коефіцієнтів сприйняття для семи октавних смуг частот	19
Додаток 1.3. Керуюча програма Matlab для розрахунку розбірливості мови	20
Додаток 1.4. Програма-калькулятор для розрахунку розбірливості мови	27
Лабораторна робота №2. Вимірювання розбірливості мовлення, замаскованого шумовою завадою	30
Контрольні запитання	32
Додаток 2.1. Деякі особливості вимірювань розбірливості мовлення в умовах переважання шумової завади	33
Додаток 2.2. Програма генерування тестового шумового сигналу із мовоподібним спектром	41
Додаток 2.3. Програма запису та обробки тестового сигналу	42
Лабораторна робота №3. Прогнозування розбірливості мовлення, замаскованого реверберацією	47
Контрольні запитання	48
Додаток 3.1. Аналітичні вирази для прогнозування розбірливості мовлення, спотвореного реверберацією	49
Додаток 3.2. Програма прогнозування розбірливості мовлення, спотвореного реверберацією	50

Лабораторна робота №4. Вимірювання розбірливості мовлення, замаскованого реверберацією52

Контрольні запитання53

Додаток 4.1. Аналітичні вирази та приклад вимірювань розбірливості мовлення, спотвореного реверберацією54

Додаток 4.2. Програма вимірювання розбірливості мовлення, спотвореного реверберацією63

Лабораторна робота №5. Прогнозування розбірливості мовлення, замаскованого шумом та реверберацією 67

Контрольні запитання69

Додаток 5.1. Аналітичні вирази для прогнозування розбірливості мовлення, спотвореного шумом та реверберацією70

Додаток 5.2. Програма прогнозування розбірливості мовлення, спотвореного шумом та реверберацією71

Додаток 5.3. Програма розрахунку парціальних відношень сигнал-шум73

Лабораторна робота №6. Вимірювання розбірливості мовлення, замаскованого шумом та реверберацією 75

Контрольні запитання78

Додаток 6.1. Швидка версія формантно-модуляційного методу оцінки розбірливості мови 80

Додаток 6.2. Програми вимірювання розбірливості мовлення, спотвореного шумом та реверберацією 86

Література96

Вступ

Кредитний модуль "Захист акустичної інформації" є складовою частиною дисциплін, які включені до циклу професійної та практичної підготовки нормативної частини програми для студентів напряму 171 "Електроніка", що навчаються за програмами професійного спрямування «Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації».

Метою кредитного модуля є формування у студентів здатностей проведення суб'єктивного та об'єктивного оцінювання розбірливості мовних сигналів, спотворених шумом та реверберацією; калібрування систем об'єктивного оцінювання розбірливості мовних сигналів за допомогою результатів суб'єктивного оцінювання; володіння основами методик інженерного аналізу, моделювання та розрахунку систем активного та пасивного захисту акустичної інформації від витоку; знання стандартної термінології.

Виходячи із зазначеної мети, в навчальному посібнику сформовано завдання для практичного виконання в рамках кредитного модуля "Захист акустичної інформації", що допомагають краще засвоїти відповідний теоретичний матеріал. Наведено перелік літературних джерел, перелік контрольних запитань, основні теоретичні відомості та тексти відповідних комп'ютерних програм.

Даний навчальний посібник буде також корисним студентам акустичних та телекомунікаційних спеціальностей технічних навчальних закладів, що навчаються за спеціальністю «Електроніка», а також фахівцям в галузі акустичної експертизи та корекції комунікаційних каналів.

Лабораторна робота №1

Прогнозування розбірливості мовлення, замаскованого шумовою завадою

Мета роботи: Здобуття навичок розрахунку (прогнозування) розбірливості мовлення, замаскованого шумовою завадою.

Тривалість виконання роботи: 4 години

Підготовка до роботи:

- 1) ознайомитися із *Додатком 1.1* (теоретичні засади до даної лабораторної роботи);
- 2) ознайомитися із текстами програм для прогнозування розбірливості мови у *Додатку 1.2* (текст керуючої програми **main_formant_simple_2.m** для Matlab) та із додатковими програмами-функціями (файли цих програм містяться у теці «*Programs_Lab1_Zahyst*»);
- 3) ознайомитися у *Додатку 1.3* із *калькулятором розбірливості мови* - текстом керуючої програми **main_formant_simple_func_manager.m** та текстом програми-функції **[STI,R] = main_formant_simple_func(r,p)** (файли цих програм містяться у теці «*Programs_Lab1_Zahyst*»).

Робоче завдання:

1. Налаштуйте керуючу програму **main_formant_simple_2.m** (Додаток 1.2, тека «*Programs_Lab1_Zahyst*») для обчислення розбірливості мови в діапазоні значень SNR_0 від -26 дБ до +20 дБ
2. Обчисліть словесну розбірливість W , за трьома версіями формантного методу (версії Покровського, Сапожкова та кафедри АМЕС), а також обчисліть індекс розбірливості мови STI.
3. Порівняйте отримані вами результати із такими, що наведені на графіках рис. 1.2 Додатку 1.1.

4. Налаштуйте керуючу програму **main_formant_simple_func_manager.m** (Додаток 1.3, тека «Programs_Lab1_Zahyst») для обчислення словесної розбірливості в приміщеннях (аудиторія, офіс) та на вулиці (тиха вулиця, шумна вулиця).
5. *Отримані вами результати занесіть у Звіт та прокоментуйте у Звіті.*
6. *У Звіті також наведіть результати обґрунтованого критичного аналізу використаних вами комп'ютерних програм.*
7. *За результатами вашого критичного аналізу, спробуйте покращити використані вами комп'ютерні програми та наведіть скрипти покращених програм у вашому Звіті.*
8. Захист вашого Звіту зробіть у час, призначений викладачем.

Контрольні запитання:

1. В чому полягає принципова схожість формантного та модуляційного методів? Чим зумовлена така схожість?
2. В чому полягають переваги та недоліки кожного із методів, формантного та модуляційного?
3. Чим відрізняються версії формантного методу, що розглянуто в даній роботі?
4. Що таке SNR_0 та чим воно відрізняється від SNR ? Чому в Додатку 1.1 стверджується, що задавати SNR_0 для приміщень досить важко?
5. Який спосіб коригування частотного розподілу дисперсій сигналу або шуму реалізовано в програмі **main_formant_simple_2.m**?
6. Чому при розрахунках замість частотного розподілу сигналу та шуму можна використовувати спектри потужності (Додаток 1.1, співвідношення (1.16))?
7. Чим відрізняються шуми, які розглядаються в даній роботі, та в чому їх схожість?
8. Яким чином, на вашу думку, отримано дані для таблиці 1.2 із Додатку 1.1?

9. На рис. 1.3 Додатку 1.1 наведено результати суб'єктивного оцінювання розбірливості мови (артикуляційних випробувань), які не збігаються із прогнозними оцінками при малих відношеннях сигнал-шум. Якими можуть бути причини відсутності такого збігу?
10. Скільки часу, *приблизно*, було витрачено вашим комп'ютером на виконання обчислень *одним методом для одного значення* SNR_0 ? Як ви робите ці обчислення? Вкажіть конфігурацію вашого ПК.

Додаток 1.1

Прогнозне оцінювання розбірливості мовлення, замаскованого шумовою завадою, методом аналітичного моделювання

1. Вступ

Завдання розрахунку і вимірювання розбірливості мови не є новим, його вік сьогодні становить 90 років, якщо починати відлік від піонерської роботи [1]. Проте, сфера застосувань оцінювання розбірливості мови постійно розширюється, технічні засоби інженерів змінюються і удосконалюються, зростає перелік факторів, що враховуються при оцінюванні розбірливості мови. Як наслідок, виникає необхідність в постійному оновленні відповідного математичного і програмного забезпечення.

За кордоном найбільшого поширення набули такі версії формантного методу оцінювання розбірливості мови як індекс артикуляції AI (Articulation Index) [3] та індекс розбірливості мови SII (Speech Intelligibility Index) [4]. В СРСР до кінця 50-х років сформувалося кілька наукових шкіл, очолюваних М.Б. Покровським, М.А. Сапожковим і Ю.С. Биковим, де розвивалися свої версії формантного методу [5], [6], [7].

У 1973 році з'явився модуляційний метод, де мірою розбірливості мови служить індекс передачі мови STI (Speech Transmission Index) [2]. Оскільки модуляційний метод спроможний враховувати вплив не тільки шуму, але і реверберації на розбірливість мови, в деяких роботах навіть з'явилися висловлювання про «застарілість» формантного методу [8]. Разом з тим, ретельне зіставлення потенційних можливостей формантного і модуляційного методів свідчить, що формантний метод перевершує свого конкурента за точністю та швидкістю обчислень в умовах, коли дія шуму переважає над дією реверберації [9].

2. Постановка завдання

Алгоритм комп'ютерного моделювання оцінювання розбірливості зашумленої мови, який реалізує «класичний» формантний метод, описано в [4], [5]. Структура цього алгоритму представлена на рис. 1.1. На першому етапі обчислень здійснюється формування первинних моделей мовного сигналу і шуму в вигляді масивів вибірок стаціонарних випадкових процесів із заданими спектральними характеристиками. Потім виконується корекція дисперсій цих модельних процесів, щоб забезпечити необхідне інтегральне відношення сигнал-шум SNR_0 . Після такої корекції оцінюються парціальні відношення сигнал-шум E_k . На заключному етапі обчислюються міри розбірливості мови: формантна розбірливість A та словесна розбірливість W .

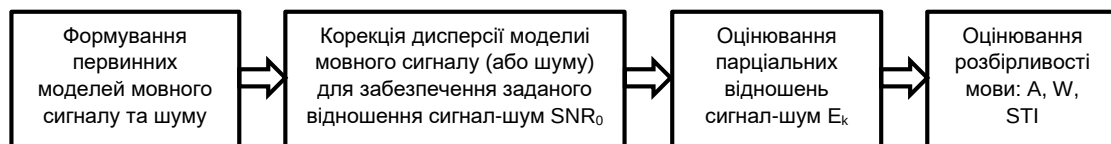


Рис. 1.1. Структура алгоритму комп'ютерного моделювання

Сутність алгоритму обчислень для формантного методу оцінювання розбірливості мовлення полягає в наступному. Область частот мовленнєвого сигналу розбивають на K суміжних частотних смуг, із центральними частотами f_{0k} і граничними частотами f_{hk} та f_{ek} , в межах кожної із котрих спектри мовлення та шуму можна вважати практично незмінними [5]. Словесну розбірливість w обчислюють через формантну розбірливість A [10]:

$$W = \begin{cases} 1.54 \cdot A^{0.25} [1 - \exp(-11 \cdot A)], & A < 0.15; \\ 1 - \exp\left(\frac{11 \cdot A}{1 + 0.7 \cdot A}\right), & A \geq 0.15 \end{cases}, \quad (1.1)$$

$$A = \sum_{k=1}^K p_k \cdot P(E'_k), \quad (1.2)$$

де p_k - імовірність знаходження формант в k -тій смузі частот:

$$p_k = F(f_{ek}) - F(f_{hk}), \quad (1.3)$$

$$F(f) = \begin{cases} 2.57 \cdot 10^{-8} \cdot f^{2.4}, & 100 < f \leq 400 \Gamma\text{ц}, \\ 1 - 1.074 \cdot \exp(-10^{-4} \cdot f^{1.18}), & 400 < f \leq 10000 \Gamma\text{ц}, \end{cases} \quad (1.4)$$

$P(E'_k)$ - коефіцієнт сприйняття мовлення.

У відповідності із методикою М.Б. Покровського [5],

$$P(E'_k) = \begin{cases} \frac{0.78 + 5.46 \exp[-4.3 \cdot 10^{-3} \cdot (27.3 - |E'_k|)^2]}{1 + 10^{0.1|E'_k|}}, & E'_k \leq 0, \\ 1 - \frac{0.78 + 5.46 \exp[-4.3 \cdot 10^{-3} \cdot (27.3 - |E'_k|)^2]}{1 + 10^{0.1|E'_k|}}, & E'_k \geq 0 \end{cases}, \quad (1.5)$$

E'_k - ефективний рівень сприйняття формант в k -тій смузі частот:

$$E'_k = E_k - \Delta B(f_{0k}), \quad (1.6)$$

E_k - ефективний рівень сприйняття мовленнєвого сигналу в k -тій смузі частот, що дорівнює (при достатньо великих рівнях шуму) відношенню сигнал-шум q_k в цій смузі частот:

$$E_k = q_k = 10 \lg \frac{D_{sk}}{D_{nk}}, \quad (1.7)$$

де D_{sk} і D_{nk} - дисперсії сигналу та шуму в k -тій смузі частот; $\Delta B(f)$ - різниця між усередненими спектрами мовлення та формант:

$$\Delta B(f) = \begin{cases} 200/f^{0.43} - 0.37, & f \leq 1000\Gamma_u, \\ 1.37 + 1000/f^{0.69}, & f > 1000\Gamma_u \end{cases}. \quad (1.8)$$

Згідно методики М.А. Сапожкова, спектр формант вважають практично таким, що співпадає із спектром мовлення, тобто $\Delta B(f)=0$, звідки маємо $E'_k = E_k$ [6]. Крім того, як показано в [11], залежність $P(E'_k)$ М.А. Сапожкова відрізняється від такої у М.Б. Покровського.

В [12] методику М.А. Сапожкова уточнено шляхом врахування залежності коефіцієнтів сприйняття від смуги частот. В цьому випадку замість (1.1) використовують співвідношення

$$A = \sum_{k=1}^K p_k \cdot P_k(E_k), \quad (1.9)$$

де коефіцієнти сприйняття $P_k(E_k)$ описуються поліноміальними залежностями (див. Додаток 1.2).

Перевагою модуляційного методу, у порівнянні із формантним методом, є можливість враховувати дію не лише шумової завади, але й реверберації [2]. Проте ця перевага дістається ціною ускладнення обчислень та зростанням часу вимірювань. В останні роки, однак, намітилася тенденція до часткової уніфікації формантного та модуляційного методів оцінювання розбірливості мовлення. Так, наприклад, згідно спрощеній методиці оцінювання розбірливості мовлення, представлений в ГОСТ Р ИСО 24504-2015, розбірливість мовлення оцінюють за допомогою індекса STI:

$$STI = \sum_{k=1}^7 \alpha_k \cdot T_k - \sum_{k=1}^6 \beta_k \cdot \sqrt{T_k \cdot T_{k+1}}, \quad (1.10)$$

$$T_k = \begin{cases} 0, & E_k < -15; \\ (E_k + 15)/30, & -15 < E_k < +15; \\ 1, & E_k > +15; \end{cases} \quad (1.11)$$

де α_k - вагові коефіцієнти, β_k - коефіцієнти надлишковості, значення котрих для октавних смуг с центральними частотами f_0 наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Вагові коефіцієнти і коефіцієнти надлишковості для октавних смуг

$f_{0k}, \text{Гц}$	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α_k	0,085	0,127	0,230	0,233	0,309	0,224	0,173
β_k	0,085	0,078	0,065	0,011	0,047	0,095	-

Неважко бачити принципову схожість співвідношень (1.2) і (1.9), з однієї сторони, і (1.10), з іншої сторони. При цьому другий доданок в (1.10) є поправкою, що враховує корельованість мовних сигналів в суміжних смугах частот, а співвідношення (1.11) можна розглядати як результат лінеаризації коефіцієнта сприйняття $P(E'_k)$.

Не дивлячись на те, що комп'ютерне моделювання дозволяє оцінювати працездатність та ефективність прототипів програмного забезпечення (ПЗ) реальних цифрових вимірювальних систем, не менш актуальним завданням є прогнозне оцінювання розбірливості мовлення. Розв'язувати задачу прогнозування методом комп'ютерного моделювання можна, проте навряд чи раціонально, враховуючи ресурсоємність даного методу. Більш економним є метод аналітичного моделювання, згідно якому моделі мовленнєвого сигналу та шуму описують детермінованими функціями у вигляді розподілів потужностей або спектральних щільностей потужності.

В принципі, етапи аналітичного та комп'ютерного моделювання подібні. Більш того, співвідношення (1.1)-(1.11), що використовуються на фінальному етапі, однакові для обох видів моделювання. Однак питання аналітичного опису початкового та проміжних етапів в літературі висвітлено недостатньо. Одна из цілей даної лабораторної роботи полягає в усуненні цієї прогалини. Інша мета

полягає у зіставленні результатів оцінювання із використанням співвідношень (1.1), (1.2) и (1.10). Не дивлячись на очевидну користь такого зіставлення, воно не було реалізовано до останнього часу.

3. Алгоритм прогнозування розбірливості зашумленого мовлення

Структура запропонованого алгоритму прогнозування розбірливості зашумленого мовлення аналогічна структурі рис. 1.1. Іншим є лише спосіб реалізації окремих етапів алгоритму, заснований на аналітичному описі спектральних властивостей мовленнєвого сигналу та шуму. Деталізуємо опис кожного з етапів.

Етап 1. Формування вхідних даних:

- завдання аналітичної моделі мовленнєвого сигналу у вигляді розподілу дисперсій D_{sk} , де k - номер смуги частот;
- створення аналітичної моделі шуму у вигляді розподілу дисперсій D_{nk} ;
- завдання очікуваного інтегрального відношення сигнал-шум SNR_0 .

Етап 2. Корегування розподілу дисперсій мовленнєвого сигналу (чи шуму) для забезпечення заданого інтегрального відношення сигнал-шум SNR_0 :

- обчислення «первинного» значення інтегрального відношення сигнал-шум

$$SNR = D_s/D_n = \frac{\sum_{k=1}^K D_{sk}}{\sum_{k=1}^K D_{nk}}; \quad (1.12)$$

- обчислення поправочного коефіцієнту

$$T = SNR_0/SNR; \quad (1.13)$$

- корегування розподілу дисперсій мовленнєвого сигналу у відповідності із співвідношенням

$$D_{0sk} = T D_{sk} \quad (1.14a)$$

або корегування розподілу дисперсій шуму у відповідності із співвідношенням

$$D_{0nk} = D_{nk}/T. \quad (1.14б)$$

Етап 3. Обчислення парціальних відношень сигнал-шум для заданого SNR_0 :

- обчислення парціальних відношень сигнал-шум із врахуванням (1.14a) та (1.14б)

$$E_{0k} = 10 \lg \frac{D_{0sk}}{D_{nk}} = 10 \lg \frac{D_{sk}}{D_{0nk}} = 10 \lg(D_{sk}/D_{nk}) + 10 \lg(T), \quad (1.15)$$

- корегування значень E_{0k} у відповідності із (1.6), якщо використовується методика Покровського.

Етап 4. Формування вихідних даних:

- обчислення артикуляційної розбірливості и словесної розбірливості у відповідності із (1.1)-(1.2) або обчислення індекса розбірливості у відповідності із (1.11).

Зробимо кілька зауважень щодо етапу формування вхідних даних.

В якості вхідних даних можна використовувати щільностей потужності сигналу та завади, якщо врахувати зв'язок між дисперсією D_k випадкового стаціонарного процесу в k -й смузі частот Δf_k и середнім значенням щільності потужності сигналу P_k в межах цієї смуги частот

$$P_k = D_k / \Delta f_k. \quad (1.16)$$

При розрахунку розбірливості мовлення в приміщеннях із відкритим плануванням (стандарт ISO 3382-3-2013), до яких відносяться офіси, бібліотечні зали, учбові приміщення, для невеликих (2-4 м) відстаней R між диктором та слухачем можна припустити, що мовленнєвий сигнал ослаблюється так, як у відьному просторі, тобто на 6 дБ із подвоєнням відстані. Із подальшим зростанням R , однак, ця закономірність порушується, і тоді розрахунок рівня сигналу в точці прослуховування стає проблематичною.

Працездатність запропонованого алгоритму перевірялася для 4-х видів шумів: білого, рожевого, коричневого і типового для навчальних приміщень (табл. 1.2). Зауважимо, що типовий розподіл рівнів шуму $D_{nk,dB}$ по частотним каналам для навчальних приміщень було запозичено з нормативного документа [13], а параметри довготривалого спектра мовлення запозичені з [5].

Таблиця 1.2. Первинні розподіли дисперсій мовлення та шуму

Параметри частотних каналів							
f_{0k}	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Δf_k	90	175	355	690	1400	2800	5270
Параметри білого шуму							
D_{nk}	0,130	0,254	0,514	1	2,029	4,058	7,638
Параметри рожевого шуму							
D_{nk}	1,043	1,014	1,029	1	1,014	1,014	0,955
Параметри коричневого шуму							
D_{nk}	8,348	4,058	2,058	1	0,507	0,254	0,119
Параметри типової шумової завади							

$D_{nk,dB}$	61	54	49	45	42	40	38
D_{nk}	5,193	2,017	1,284	1	1,023	1,273	1,5471
Параметри довготривалого спектра мовлення							
$P_{sk,dB}$	60	70	68	59,5	52	46	40,5
D_{sk}	0,146	2,846	3,642	1	0,361	0,181	0,096

На рис. 1.2 представлені результати прогнозних розрахунків у вигляді залежностей оцінок розбірливості мовлення від очікуваного відношення сигнал-шум SNR_0 в діапазоні значень $SNR_0 = -26...+20$ дБ. Графіки рис. 1.2а, 1.2б і 1.2в, побудовані з використання коефіцієнтів сприйняття М.Б. Покровського, М.А. Сапожкова і коефіцієнтів сприйняття із Додатку, добре узгоджуються з результатами, представленими в [11] і [12]. На рис. 1.2г представлені оцінки STI (рис. 1.2).

Порівнюючи между собою наведені графіки, бачимо, що графіки, отримані для коефіцієнтів сприйняття М.Б. Покровського (рис. 1.2а), принципово відрізняються від інших графіків тим, що в усьому діапазоні розглянутих значень SNR_0 маскувальні властивості білого шуму виявляються кращими, ніж для коричневого шуму. Між тим, в [11] і [12] вперше було відзначено і виправлено некоректність коефіцієнтів сприйняття М.Б. Покровського.

Графіки рис. 1.2б і 1.2в, побудовані з використанням відкоригованих коефіцієнтів сприйняття, свідчать, що для малих SNR_0 ($SNR_0 < -8$ дБ) маскувальні властивості білого шуму поступаються таким для коричневого шуму. Примітно, що цей результат узгоджується з поведінкою графіків рис. 1.2г, хоча в цьому випадку граничним значенням є $SNR_0 = -13$ дБ.

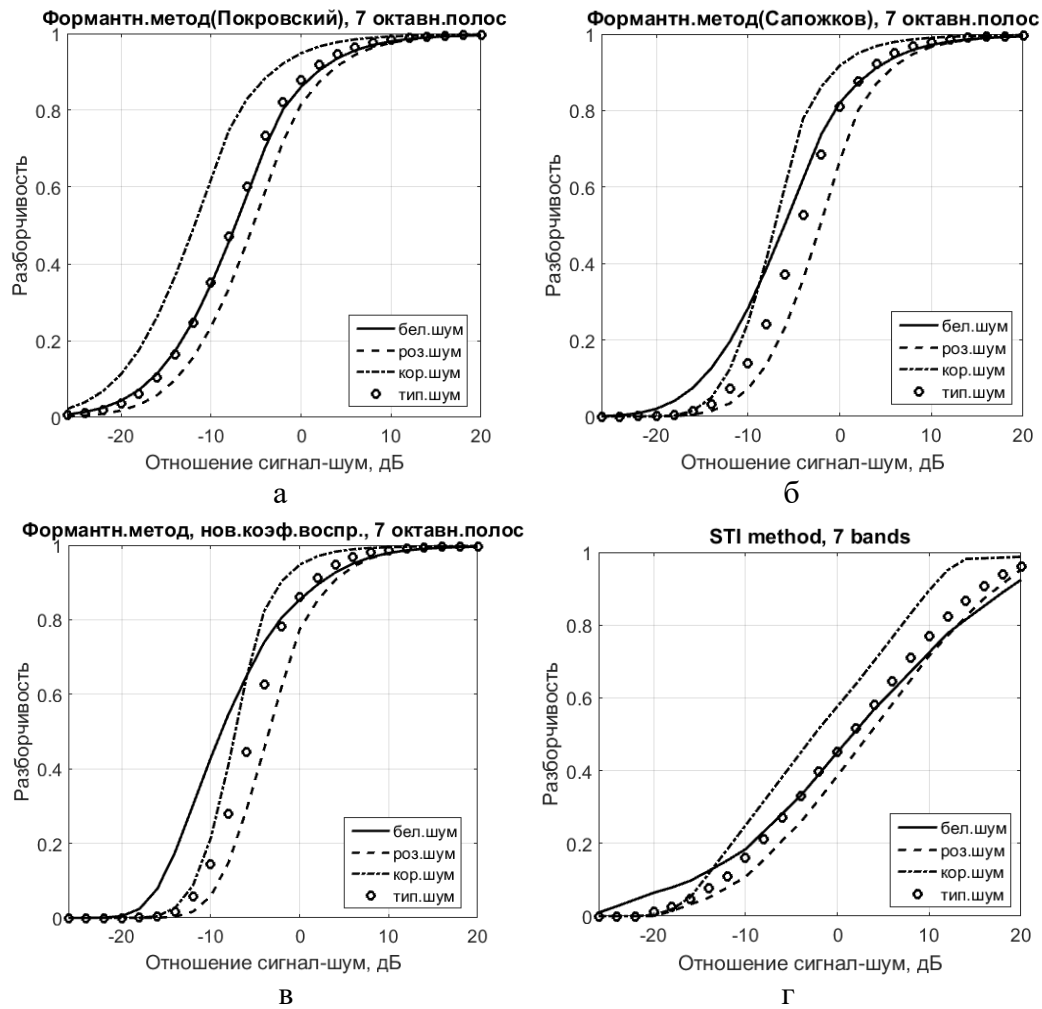


Рис. 1.2. Оцінки словесної (а, б, в) розбірливості та індекса розбірливості (г)

Представлені на рис. 1.3 результати суб'єктивних артикуляційних випробувань [14] також свідчать про виражену тенденцію до погіршення маскувальних властивостей білого шуму при малих значеннях відношення сигнал-шум SNR_0 . Відсутність явного програшу білого шуму в даному випадку може бути пояснено як недостатньою коректністю організації артикуляційних випробувань, так і принциповою «розпливчастістю» результатів випробувань, яка властива результатам суб'єктивного оцінювання будь-яких характеристик та зумовлена різницею психофізичних властивостей слухачів.

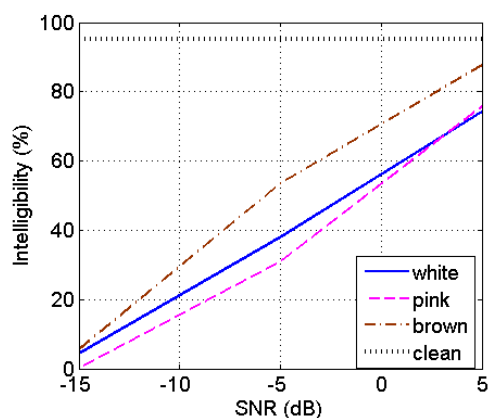


Рис. 1.3. Суб'єктивні оцінки складової розбірливості [14]

Час обчислень при аналітичному моделюванні на порядок менше часу, необхідного при комп'ютерному моделюванні, й не перевищує 1 с для ПВМ з тактовою частотою 2,66 ГГц, ОЗУ об'ємом 4 ГБ, для 32-розрядної ОС.

Підводячи підсумки, зазначимо, що вище було представлено детальний опис початкового і проміжних етапів алгоритму прогнозування розбірливості мовлення методом аналітичного моделювання. Працездатність запропонованого алгоритму перевірена для 4-х видів шумової завади: білого, рожевого, коричневого і типової для навчальних приміщень. Узгодженість отриманих результатів з відомими аналогічними результатами свідчить про коректність запропонованих компонентів аналітичного алгоритму.

Зіставлення результатів оцінювання розбірливості мовлення, отриманих у відповідності із «класичним» підходом, з результатами оцінювання індекса розбірливості мовлення STI дозволило підтвердити тезу про низьку маскувальну здатність білого шуму при малих відношеннях сигнал-шум.

Аналітичний опис коефіцієнтів сприйняття для семи октавних смуг частот

Коефіцієнти сприйняття описуються виразом:

$$P'_i(x) = \begin{cases} 0, & x \leq x'_{\min}; \\ \sum_{n=0}^{N'} a'_n x^n, & x'_{\min} < x \leq 0 \\ \sum_{m=0}^{M'} b'_m x^m, & 0 < x \leq x'_{\max}; \\ 1, & x > x'_{\max}. \end{cases} \quad (Д2.1)$$

де значення коефіцієнтів a'_n и b'_m представлені в табл. Д1.1 и Д1.2. Дані коефіцієнти сприйняття відрізняються від коефіцієнтів, наведених в [12], наявністю не п'яти, а семи октавних смуг частот.

Таблиця Д1.1. Коефіцієнти a'_n

n f _{cp} , Гц	0	1	2	3	4	5
125	0,324508	0,086098	0,004887	-0,00053	-6,56E-05	-1,87E-06
250	0,358141	0,070497	-0,00767	-0,00311	-0,00029	-8,76E-06
500	0,309301	0,054827	-0,00207	-0,00104	-7,77E-05	-1,82E-06
1000	0,19779	0,028848	0,000603	-0,00011	-7,30E-06	-1,45E-07
2000	0,238407	0,042094	0,000906	-0,00028	-2,29E-05	-5,43E-07
4000	0,231306	0,040168	0,001327	-0,00014	-1,07E-05	-2,07E-07
8000	0,178871	0,01705	-0,00064	-6,50E-05	2,91E-06	1,91E-07

Таблиця Д1.2. Коефіцієнти b'_m

m f _{cp} , Гц	0	1	2	3	4	5
125	0,315151	0,057481	-0,00116	-4,45E-05	2,10E-06	-2,22E-08
250	0,35763	0,088259	-0,00646	0,000232	-3,89E-06	2,46E-08
500	0,301964	0,07124	-0,00382	9,63E-05	-8,28E-07	-9,67E-10
1000	0,195479	0,032135	0,000349	-2,04E-05	-1,22E-07	5,59E-09
2000	0,238336	0,042175	0,002185	-0,00025	7,53E-06	-7,75E-08
4000	0,233574	0,037324	0,003033	-0,0003	8,87E-06	-9,05E-08
8000	0,185163	0,01171	0,002126	-2,81E-05	-2,24E-06	4,55E-08

Керуюча програма Matlab для розрахунку розбірливості мовлення

```

% === main_formant_simple_2.m === главная прог. формантного метода ===
% === Назначение: оцінка словесн.разборч. на фоне шумовой завади ===
% === Особенности: 1) проверка правильности расчетной формулы;
% === 2) сопоставление результатов обчислень для отечественных и
% === зарубежной (STI) формул расчета розбірливості мовлення на фоне шума
%
% ===== входные параметры: SNR0,T,Fs,color_noise,avtr,bnd =====
% SNR0 - желаемое интегральное отношение сигнал-шум
% T - время анализа, секунды
% Fs - частота дискретизации, Гц
% color - окрашен. шума: белый:color=1;розовый:=2;коричн.::=3;типов.::=4
% avtr - автор (Покров.: avtr=1;Сапожк.:avtr=2;мы:avtr=3;STI:avtr=4)
% bnd - кол-во октавных смуг частот: 5 смуг: bnd=5; 7 смуг: bnd=7
%
% --- План обчислень: ---
% --- Часть 1: подготовка к вычислениям
% --- 1) задание параметров (SNR0,T,Fs,color,avtr,bnd) ---
% --- 2) считывание коэф-тов гребенки фільтрів ---
% --- Часть 2: Формування тестового и принятого сигнала ---
% --- 3) Формування тестового сигнала (окрашенность) ---
% --- Часть 3: Формування шума
% --- 4) первичное Формування шума (окрашенность) ---
% --- 5) коррекция потужності шума для забезпечення заданого SNR0 --
% --- Часть 4: оцінювання розбірливості мовлення формантным методом --
% --- 6) обчислення парціальних відношень сигнал-шум ---
% --- 7) вычисл. артикул. и словесн. Разборч. по Покровскому ---
% --- 8) вычисл. артикуляц. и словесної разборч. по Сапожкову ---
% --- 9) вычисл. артикул. и словесн разборч. по нашим коэф.воспр -
% --- Часть 5: построение графиков ---
% --- 10) запись результатов на диск
% --- 11) построение графиков  $W=W(\text{SNR})$  ---
%
% === Вычисления: ===
clear; clc;
avtr = 4;
bnd = 7;
% --- Часть 1: подготовка к вычислениям

```

```

% --- 1) задание параметров (SNR0,color_sig,color_noise,avtr,bnd) ---
df = [90 175 355 690 1400 2800 5270]; % октавн. смуги частот
SNR0min = 0; SNR0max = 20; SNR0step = 2;
color_sig_db = [60 70 68 59.5 52 46 40.5]; % спектр речи в дБ
color_sig = 10.^(0.1*color_sig_db); % в разгах по потужності
Dsk = color_sig.*df; % распрд. дисперсій сигн.по 7 смугам
Dsk = Dsk/Dsk(4); % нормировка
Dsk5 = Dsk(2:6); % распрд. дисперсій сигн.по 5 смугам
color_noise = [1 1 1 1 1 1 1; 8 4 2 1 1/2 1/4 1/8;...
64 16 4 1 1/4 1/16 1/64; 6.31^2 2.82^2 1.58^2 1 0.71^2 0.56^2 0.45^2];
alfa = [0.085 0.127 0.230 0.233 0.309 0.224 0.173]; % для расчета STI
beta = [0.085 0.078 0.065 0.011 0.047 0.095]; % для расчета STI
Dnk = zeros(4,7);
for r = 1:4
    Dnk(r,:) = color_noise(r,:).*df; % распрд. дисперсій шума по 7 смугам
    Dnk(r,:) = Dnk(r,:)/Dnk(r,4);
end
Dnk5 = Dnk(:,2:6); % распрд. дисперсій шума по 5 смугам
Ds = sum(Dsk); % начальн. дисперсія сигналу 7 смуг
Ds5 = sum(Dsk5); % начальн. дисперсія сигналу 5 смуг
Dn = sum(Dnk,2); % начальн. дисперсія шума 7 смуг
Dn5 = sum(Dnk5,2); % начальн. дисперсія шума 5 смуг
SNR = Ds./Dn;
SNR5 = Ds5./Dn5;

tic % начало работы счетчика времени
colornum = 4; % количество цветных шумов
SNR0num = (SNR0max-SNR0min)/SNR0step + 1; % кол-во интегр.отнош.сигн.-шум
W7pokr = zeros(SNR0num,colornum); % нач.состоян.массивов разборч.
W5pokr = zeros(SNR0num,colornum); % нач.состоян.массивов разборч. W7sap =
zeros(SNR0num,colornum); % нач.состоян.массивов разборч.
W5sap = zeros(SNR0num,colornum); % нач.состоян.массивов разборч.
Wmy7 = zeros(SNR0num,colornum); % нач.состоян.массивов разборч.
Wmy5 = zeros(SNR0num,colornum); % нач.состоян.массивов разборч.
sti = zeros(SNR0num,colornum); % начальные состояния массивов STI
sti5 = zeros(SNR0num,colornum); % начальные состояния массивов STI
for color = 1:colornum % перебор окрашенностей шума
    disp('color = '); disp(num2str(color));

    for SNR0 = SNR0min:SNR0step:SNR0max % перебор значений SNR0
        isnr0 = (SNR0-SNR0min)/SNR0step + 1; %номер строки W7 и W5
    end
end

```

```

% --- Часть 4: оцінювання розбірливості мовлення формантним методом ---
% --- 6) обчислення парціальних відношень сигнал-шум ---
Ek = 10*log10(Dsk./Dnk(color,:))+SNR0-10*log10(SNR(color)); % для 7 окт смуг
Ek5 = 10*log10(Dsk5./Dnk5(color,:))+SNR0-10*log10(SNR5(color)); % для 5 окт смуг
% --- 7) обчислення словесної розбірливості по Покровському ---
if avtr == 1
    if bnd == 7
        W7pokr(isnr0,color) = razbor_pokr(Ek); % 7 смуг частот
    else
        W5pokr(isnr0,color) = razb1(Ek5); % 5 смуг частот
    end
end
% --- 8) обчислення словесної розбірливості по Сапожкову ---
if avtr == 2
    if bnd == 7
        W7sap(isnr0,color) = razb_sapoz_7(Ek); % 7 смуг частот
    else
        W5sap(isnr0,color) = razb_sapoz_5(Ek5); % 5 смуг частот
    end
end
% --- 9) обчислення словесної разборч. по нашим коэфф.сприйняття ---
if avtr == 3
    if bnd == 7
        Wmy7(isnr0,color) = razb_we(Ek);
        %Wmy7(isnr0,color) = razb_we_sti(Ek); % проба приблиз к STI
    else
        Wmy5(isnr0,color) = razb_we_5(Ek5);
    end
end
% --- 10) обчислення STI ---
if avtr == 4
    if bnd == 7
        sti(isnr0,color) = razb_sti(Ek);
    else
        sti5(isnr0,color) = 0;
    end
end
end
end
end

```

```

% --- Часть 5: построение графиков ---
% --- 10) запись результатов на диск ---
% --- по Покровскому ---
if avtr == 1
    if bnd == 7 % для 7 смуг частот
        W7pokr_struct =
struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',W7pokr);
        save W7pokr_struct W7pokr_struct;
    else % для 5 смуг частот
        W5pokr_struct =
struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',W5pokr);
        save W5pokr_struct W5pokr_struct;
    end
end

% --- по Сапожкову ---
if avtr == 2
    if bnd == 7 % для 7 смуг частот
        W7sap_struct =
struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',W7sap);
        save W7sap_struct W7sap_struct;
    else % для 5 смуг частот
        W5sap_struct =
struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',W5sap);
        save W5sap_struct W5sap_struct;
    end
end

% --- по нашим коэффициентам ---
if avtr == 3
    if bnd == 7 % для 7 смуг частот
        Wmy_struct =
struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',Wmy7);
        save Wmy_struct Wmy_struct;
    else % для 5 смуг частот
        Wmy5_struct =
struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',Wmy5);
        save Wmy5_struct Wmy5_struct;
    end
end

```

```
% --- по Steeneken ---
```

```
if avtr == 4
```

```
    if bnd == 7 % для 7 смуг частот
```

```
        sti_struct =
```

```
struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',sti);
```

```
    save sti_struct sti_struct;
```

```
    else % для 5 смуг частот
```

```
        sti5_struct =
```

```
struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',sti5);
```

```
    save sti5_struct sti5_struct;
```

```
end
```

```
end
```

```
% --- 11) построение графиков  $W=W(\text{SNR})$  ---
```

```
if avtr == 1 % по Покровскому
```

```
    if bnd == 7 % 7 смуг
```

```
        load W7pokr_struct;
```

```
        xmin7 = W7pokr_struct.SNR0min;
```

```
        xmax7 = W7pokr_struct.SNR0max;
```

```
        xstep7 = W7pokr_struct.SNR0step;
```

```
        x7 = xmin7:xstep7:xmax7;
```

```
        y7 = W7pokr_struct.func;
```

```
        figure; plot(x7,y7(:,1),'-k',x7,y7(:,2),'--r',x7,y7(:,3),'-.m',x7,y7(:,4),'ok','LineWidth',2); grid on;
```

```
        xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ'); ylabel('Разборчивость');
```

```
        title('Формантн.метод(Покровский), 7 октавн.смуг');
```

```
        legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
```

```
    else % 5 смуг
```

```
        load W5pokr_struct;
```

```
        xmin5 = W5pokr_struct.SNR0min;
```

```
        xmax5 = W5pokr_struct.SNR0max;
```

```
        xstep5 = W5pokr_struct.SNR0step;
```

```
        x5 = xmin5:xstep5:xmax5;
```

```
        y5 = W5pokr_struct.func;
```

```
        figure; plot(x5,y5(:,1),'-k',x5,y5(:,2),'--k',x5,y5(:,3),'-.k',x5,y5(:,4),'ok','LineWidth',2); grid on;
```

```
        xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ'); ylabel('Разборчивость');
```

```
        title('Формантн.метод(Покровский), 5 октавн.смуг');
```

```
        legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
```

```
end
```

```
end
```

```
if avtr == 2 % по Сапожкову
```

```

if bnd == 7      % 7 смуг
    load W7sap_struct;
    xmin7 = W7sap_struct.SNR0min;
    xmax7 = W7sap_struct.SNR0max;
    xstep7 = W7sap_struct.SNR0step;
    x7 = xmin7:xstep7:xmax7;
    y7 = W7sap_struct.func;
    figure; plot(x7,y7(:,1),'-k',x7,y7(:,2),'--r',x7,y7(:,3),'-.m',x7,y7(:,4),'ok','LineWidth',2); grid on;
    xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ');ylabel('Разборчивость');
    title('Формантн.метод(Сапожков), 7 октавн.смуг');
    legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
else            % 5 смуг
    load W5sap_struct;
    xmin5 = W5sap_struct.SNR0min;
    xmax5 = W5sap_struct.SNR0max;
    xstep5 = W5sap_struct.SNR0step;
    x5 = xmin5:xstep5:xmax5;
    y5 = W5sap_struct.func;
    figure; plot(x5,y5(:,1),'-k',x5,y5(:,2),'--r',x5,y5(:,3),'-.m',x5,y5(:,4),'ok','LineWidth',2);
    grid on; xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ');ylabel('Разборчивость');
    title('Формантн.метод(Сапожков), 5 октавн.смуг');
    legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
end
end

if avtr == 3 % по нашим коефіцієнтам
    if bnd == 7      % 7 смуг
        load Wmy_struct;
        xmin_my = Wmy_struct.SNR0min;
        xmax_my = Wmy_struct.SNR0max;
        xstep_my = Wmy_struct.SNR0step;
        x_my = xmin_my:xstep_my:xmax_my;
        y_my = Wmy_struct.func;
        figure; plot(x_my,y_my(:,1),'-k',x_my,y_my(:,2),'--r',x_my,y_my(:,3),'-
.m',x_my,y_my(:,4),'ok','LineWidth',2);
        grid on; xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ');ylabel('Разборчивость');
        title('Формантн.метод, нов.коэф.воспр., 7 октавн.смуг');
        legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
    else            % 5 смуг
        load Wmy5_struct;
        xmin_my = Wmy5_struct.SNR0min;

```

```

    xmax_my = Wmy5_struct.SNR0max;
    xstep_my = Wmy5_struct.SNR0step;
    x_my = xmin_my:xstep_my:xmax_my;
    y_my = Wmy5_struct.func;
    figure; plot(x_my,y_my(:,1),'-k',x_my,y_my(:,2),'--r',x_my,y_my(:,3),'-
.m',x_my,y_my(:,4),'ok','LineWidth',2);
    grid on; xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ');ylabel('Разборчивость');
    title('Формантн.метод, нов.коэф.воспр., 5 октавн.смуг');
    legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
end
end

if avtr == 4 % no Steeneken
    if bnd == 7 % 7 смуг
        load sti_struct;
        xmin_sti = sti_struct.SNR0min;
        xmax_sti = sti_struct.SNR0max;
        xstep_sti = sti_struct.SNR0step;
        x_sti = xmin_sti:xstep_sti:xmax_sti;
        y_sti = sti_struct.func;
        figure; plot(x_sti,y_sti(:,1),'-k',x_sti,y_sti(:,2),'--r',x_sti,y_sti(:,3),'-
.m',x_sti,y_sti(:,4),'ok','LineWidth',2);
        grid on; xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ');ylabel('Разборчивость');
        title('STI method, 7 bands');
        legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
    else % 5 смуг
        load sti5_struct;
        xmin_sti = sti5_struct.SNR0min;
        xmax_sti = sti5_struct.SNR0max;
        xstep_sti = sti5_struct.SNR0step;
        x_sti = xmin_sti:xstep_sti:xmax_sti;
        y_sti = sti5_struct.func;
        figure; plot(x_sti,y_sti(:,1),'-k',x_sti,y_sti(:,2),'--k',x_sti,y_sti(:,3),'-
.k',x_sti,y_sti(:,4),'ok','LineWidth',2);
        grid on; xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ');ylabel('Разборчивость');
        title('STI method, 5 bands');
        legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
    end
end
end
toc % конец работы счетчика времени

```

Програма-калькулятор для розрахунку розбірливості мовлення

```

% === main_formant_simple_func_manager.m ===
% === Назначение: управляющая программа для main_formant_simple_func.m -
% прогноза словесн.разборч. на фоне шумовой завади ===
%
% ===== входные параметры: r, p =====
% r - дистанция от слушателя до диктора в метрах
% p - вид пространства (1-аудитория, 2-офис, 3-тих. улица, 4-шумн. улица)

% ===== выходные параметры: STI, R =====
% STI - индекс розбірливості STI
% R - оцінка розбірливості по 5-балльной шкале
%
% --- ввод исходных данных ---
clc;
disp('Вы можете оценить розбірливість мовлення для ситуаций:');
disp(' ');
disp('1 - аудитория');
disp('2 - офис');
disp('3 - тихая улица');
disp('4 - шумная улица');
disp(' ');
p = input('Укажите номер ситуации: ');
r = input('Укажите дистанцию до диктора (не менее 1 метра): ');

% --- вычисления розбірливості мовлення ---
[STI,R] = main_formant_simple_func(r,p);

% --- вывод результатов обчислень на монитор ---
disp(' ');
disp(['Розбірливість мовлення = ' num2str(R) ' (по 5-балльной шкале)']);
disp(['Индекс STI = ' num2str(STI)]);

function [STI,R] = main_formant_simple_func(r,p)
% === Назначение: прогноз словесн.разборч. на фоне шумовой завади ===
%
% ===== входные параметры: r, p =====

```

% r - дистанция от слушателя до диктора в метрах

% p - вид пространства (1-аудитор, 2-офис, 3-тих. улица, 4-шумн. улица)

% ===== выходные параметры: STI, R =====

% STI - индекс разборчивости STI

% R - оценка разборчивости по 5-балльной шкале

%

% --- подготовка к вычислениям ---

Dsk = [0.146 2.846 3.642 1 0.361 0.181 0.096]; % распр. дисперсий сигн. по 7
смурам

Dnk = [5.193 2.017 1.284 1 1.023 1.273 1.5471]; % распр. дисперсий шума по 7
смурам

alfa = [0.085 0.127 0.230 0.233 0.309 0.224 0.173]; % для расчета STI

beta = [0.085 0.078 0.065 0.011 0.047 0.095]; % для расчета STI

Ls0 = 70; % уровень сигнала на расст. 1 м от рта

r0 = 1; % эталон. расстоян. 1 м

Ln = [50 60 60 70]; % варианты уровня шума

% --- обчислення Ls ---

if p < 3

Ls = Ls0 + 20 * log10(r0/r);

else

if r < 3

Ls = Ls0 + 20 * log10(r0/r);

else

Ls = Ls0 + 20 * log10(r0/r) + 10 * log10(1 + r^2 / (r^2 + 9));

end

end

% --- выбор уровня шума Ln ---

Ln = Ln(p);

% --- отношение сигнал-шум SNR0 в заданной точке ---

SNR0 = Ls - Ln;

% --- первичное отношение сигнал-шум SNR ---

SNR = 10 * log10(sum(Dsk) / sum(Dnk));

% --- парциальные відношення сигнал-шум Ek ---

Ek = zeros(1, 7);

for k = 1:7

```
Ek(k) = 10*log10(Dsk(k)/Dnk(k)) + SNR0 - SNR;  
end
```

```
% --- индекс STI ---
```

```
T = zeros(1,7);
```

```
for k = 1:7  
    if (Ek(k)<(-15))  
        T(k) = 0;  
    elseif (Ek(k)>=(-15))&&(Ek(k)<=15)  
        T(k) = (Ek(k)+15)/30;  
    else  
        T(k) = 1;  
    end  
end
```

```
I1 = 0; I2 = 0;
```

```
for k = 1:7  
    I1 = I1 + alfa(k)*T(k);  
end
```

```
for k = 1:6  
    I2 = I2 + beta(k)*sqrt(T(k)*T(k+1));  
end
```

```
STI = sum(I1)-sum(I2);
```

```
% --- оцінка розбірливості R по 5-балльній шкалі ---
```

```
if STI > 0.75  
    R = 5;  
elseif (STI <= 0.75 ) && (STI > 0.6)  
    R = 4;  
elseif (STI <= 0.6 ) && (STI > 0.45)  
    R = 3;  
elseif (STI <= 0.45 ) && (STI > 0.3)  
    R = 2;  
elseif (STI <= 0.3 )  
    R = 1;  
end
```

Лабораторна робота №2

Вимірювання розбірливості мовлення, замаскованого шумовою завадою

Мета роботи: Здобуття навичок вимірювання розбірливості мовлення, замаскованого шумовою завадою.

Тривалість виконання роботи: 2 години

Підготовка до роботи:

1. Ознайомитися із Додатком 2.1 (теоретичні засади для даної Лабораторної роботи).
2. Ознайомитися із Додатком 2.2 (тексти програм для Matlab: 1) *генерування* тестового сигналу **gener_noise_like_speech.m**, 2) *запису та обробки* сигналу з виходу мікрофона **main_formant_real.m** та **main_formant_func_real.m**), 3) додатковими програмами-функціями (всі програми містяться у теці «Programs_Lab2_Zahyst» із програмами до даної роботи).
3. Підготувати гучномовець (або смартфон) для випромінення тестового сигналу.
4. Підготувати ноутбук або ПК до запису тестового сигналу та до обчислень (активізувати Matlab).

Робоче завдання:

1. Згенерувати тестовий сигнал заданої довжини $T = T_{mix}$ (табл. 2.1) за допомогою програми **gener_noise_like_speech.m** та записати його на диск (для прикладу, в теці вже є такий файл під назвою «**test_2s.wav**» для $T_{mix}=2$ с; для інших значень T_{mix} згенерувати такі сигнали самостійно).
2. Налаштувати програми **main_formant_real.m** (або **main_formant_func_real.m**) запису та обробки сприйнятого сигналу, задавши значення вхідних параметрів T_{n1} , T_{mix} , T_{rev} , T_{n2} .

3. Випроменити тестовий сигнал (для спрощення, це можна зробити смартфоном), обробити його та записати. Якщо результати запису та обробки незадовільні (програма не знайшла сигнал на тлі шуму або зробила це невірно), повторити дослід.

Примітка 1: запустивши запис, зачекати 2 секунди перед тим, як почати випромінювання тестового сигналу. Це робиться для того, щоб перехідні процеси в звуковій карті при її запуску встигли закінчитися.

Примітка 2: при першій спробі (**live=1**) запис на диску автоматично збережеться під назвою **test-n_1_2_1_2.wav**, де перша «2» – це значення T_{mix} для варіанту №1 (для інших варіантів будуть інші відповідні значення T_{mix}), а друга «2» - це значення T_{n2} . Цей файл можна використовувати при наступних спробах обробки, вказуючи значення параметру **live=0**.

4. Порівняти результати вимірювання STI із прогнозними результатами (**main_formant_simple_2.m**), для отримання яких використати програми із Лабораторної роботи №1 задавши SNR_0 , яке було виміряно.
5. Повторити пп.1-4, використавши мовний сигнал (кілька слів вашим голосом) в якості тестового.
6. Отримані вами результати занести у Звіт та прокоментувати у Звіті.
7. Захист Звіту зробити у час, призначений викладачем.

Таблиця 2.1. Вхідні дані для розрахунків

№ варіанту	1	2	3	4
Вхідні параметри програми запису та обробки	$T_{n1}=1$ с; $T_{mix}=2$ с; $T_{rev}=1$ с; $T_{n2}=2$ с;	$T_{n1}=1$ с; $T_{mix}=3$ с; $T_{rev}=1$ с; $T_{n2}=2$ с;	$T_{n1}=1$ с; $T_{mix}=4$ с; $T_{rev}=1$ с; $T_{n2}=2$ с;	$T_{n1}=1$ с; $T_{mix}=5$ с; $T_{rev}=1$ с; $T_{n2}=2$ с;

Контрольні запитання:

1. Яка мета даної роботи?

2. Чим відрізняється вимірювання розбірливості мови від прогнозування?
3. Що собою являє тестовий сигнал?
4. Наскільки суттєва різниця між результатами вимірювань та прогнозування?
Чим спричинена, на вашу думку, ця різниця?
5. Які покращення доцільно зробити в наданому програмному забезпеченні?
6. В чому різниця між програмами **main_formant_real.m** та **main_formant_func_real.m**?
7. Використаний пороговий метод виявлення тестового сигналу на тлі шуму є працездатним за умови $SNR_0 > 0$ дБ. Що ви можете запропонувати для виявлення тестового сигналу на тлі шуму для $SNR_0 < 0$ дБ?

Деякі особливості вимірювань розбірливості мовлення в умовах переважання шумової завади

1. Постановка задачі

Сутність алгоритмів обчислення розбірливості мовлення для формантного, модуляційного та форматно-модуляційного методів викладено в Додатку 1.1 до Лабораторної роботи №1, де розглянуто питання прогнозування (розрахунку) розбірливості мовлення. Тут обмежимося викладенням особливостей, притаманних цим методам при експериментальному вимірюванні розбірливості мовлення.

У місці, де зазвичай розташовується диктор, поміщають гучномовець, за допомогою якого випромінюють тестовий сигнал у вигляді відрізка шуму, спектр якого подібний до довготривалого спектру мови. Вихідну потужність сигналу підбирають так, щоби забезпечити необхідний рівень звукового тиску, типовий для аналізованої ситуації, на певній відстані (наприклад, 1 м) від диктора. У місці, де передбачається можливе знаходження слухача, поміщають мікрофон, вихідний сигнал якого записують і піддають обробці для оцінювання розбірливості мовлення.

Далі артикуляційну та словесності розбірливості, а також індекс STI, оцінюють за формулами (1.1) - (1.11), наведеними в Додатку 1.1 до лабораторної роботи №1.

Проблеми, пов'язані з попередньою обробкою акустичного сигналу, спрямованою на оцінювання відношень сигнал-шум E_k , в літературі висвітлені недостатньо. Тому нижче наводиться опис одного простого способу такої обробки.

2. Алгоритм попередньої обробки акустичного сигналу

Фінальному етапу обчислень розбірливості мовлення, у відповідності із співвідношеннями (1.1)-(1.11), мають передувати наступні два етапи попередньої обробки акустичного сигналу.

Етап 1. Підготовка до вимірювань:

- завдання вихідних даних процедури вимірювань;
- запис сигналу або прочитання записаного сигналу з диску.

Етап 2. Виявлення сигналу й оцінка його параметрів:

- попередня оцінка дисперсії завади σ_n^2 та обчислення порогу tr ;
- виявлення сигналу на тлі шумової завади пороговим методом;
- контроль правильності обчислень моменту часу t_{mix} , що відповідає початку сигналу, та моменту $t_{mix} + T_{mix}$, що відповідає кінцю сигналу;
- формування гребінки із семи октавних фільтрів;
- фільтрація гребінкою фільтрів запису акустичного сигналу;
- формування масивів сигналу та завади для всіх частотних каналів;
- обчислення дисперсії завади σ_n^2 та дисперсії сигналу σ_s^2 ;
- обчислення відношень сигнал-шум E_k .

Прокоментуємо зміст кожного з етапів.

Завдання вихідних даних процедури вимірювань доцільно починати з завдання режиму роботи. Представляється розумним використовувати два режими роботи: запис і обробка реального сигналу або лише обробка сигналу, раніше записаного на диск. Користь другого режиму полягає в можливості працювати з архівними даними.

Крім того, повинні бути задані тривалості ділянок записуваного сигналу у вигляді значень змінних T_{n1} (тривалість ділянки завади, що передує сигналу), T_{mix}

(тривалість ділянки суміші сигналу з шумом), T_{rev} (тривалість ділянки, що містить ревербераційну перешкоду) та T_{n2} (тривалість ділянки завади, розташованої після суміші сигналу з шумом). Завдання вихідних даних завершується зазначенням версії формантного методу (1, 2, 3 або 4 – Покровського, Сапожкова, АМЕС або STI, відповідно), а також завданням кількості октавних смуг частот (7 або 5).

Для виявлення сигналу пороговим методом слід попередньо оцінити дисперсію σ_n^2 ділянок завади на початку і в кінці запису сигналу, а потім обчислити граничну константу $tr = a \cdot \sigma_n$, де a визначається необхідною ймовірністю помилкової тривоги. Виявлення сигналу полягає у визначенні моменту часу t_{mix} , що відповідає початку сигналу. Оскільки від правильності виявлення сигналу залежить достовірність оцінок розбірливості мовлення, доцільно забезпечити візуальний контроль результатів виявлення. Приклад візуалізації процедури виявлення сигналу наведено на рис. 2.1, де вертикальними червоними маркерними лініями відзначені моменти часу t_{mix} , $t_{mix} + T_{mix}$ и $t_{mix} + T_{mix} + T_{rev}$, а порогове значення tr відображено горизонтальною пунктирною лінією. Встановивши границі між сигналом і перешкодами, запис, що аналізується, слід піддати багатоканальній фільтрації, після чого парціальні відношення сигнал-шум E_k можна оцінити, використовуючи співвідношення

$$E_k = \frac{\sigma_{mix\ k}^2 - \sigma_{n\ k}^2}{\sigma_{n\ k}^2},$$

де $\sigma_{mix\ k}^2$ – дисперсія ділянки відгуку k -го фільтра, що містить суміш сигналу із шумом; $\sigma_{n\ k}^2$ – дисперсія ділянок відгуку k -го фільтра, що містять шумову заваду.

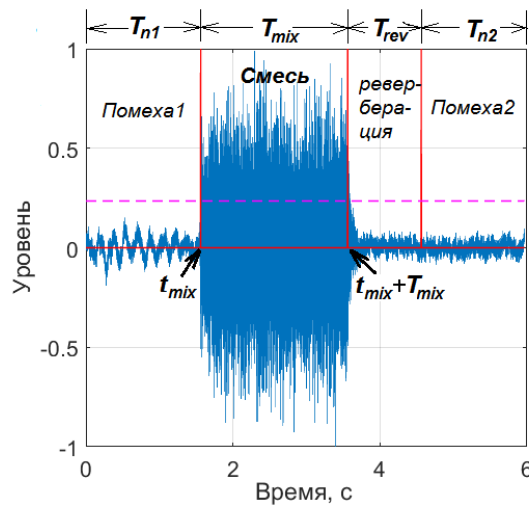


Рис. 2.1. Ділянки завади, суміші та реверберації

3. Приклади вимірювань розбірливості зашумленого мовлення

Представлений вище алгоритм був апробований за допомогою спеціально розроблених комп'ютерних програм для обчислення в середовищі Matlab. На рис. 2.2-2.4 представлені форма аналізованого процесу і оцінки спектрів потужності, для відношень сигнал-шум 1,1 дБ, 5,8 дБ і 12,7 дБ, відповідно. Джерелом шуму служив FM-радіоприймач, що генерував шум в режимі неналаштування на сигнали радіостанцій.

З наведених графіків випливає, що використаний пороговий алгоритм виявлення шумоподібного сигналу на тлі шумової завади надійно спрацьовує при відношеннях сигнал-шум не менше 0 дБ. Цього цілком достатньо для вимірювань розбірливості мовлення в умовах, типових для акустичної експертизи приміщень з відкритим плануванням (стандарт ISO 3382-3-2013).

На рис. 5 показані експериментально отримані залежності оцінок словесної розбірливості W та індекса STI від інтегральних відношень сигнал-шум.

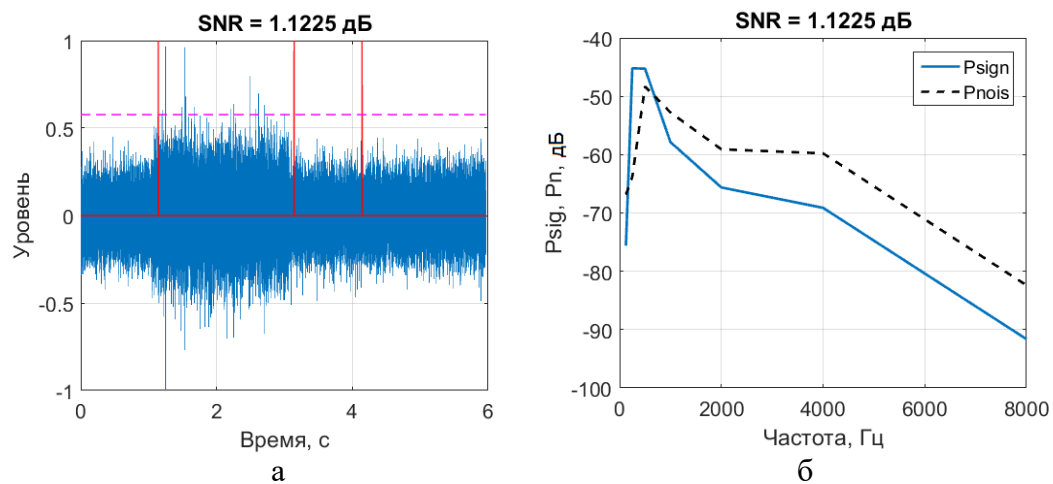


Рис. 2.2

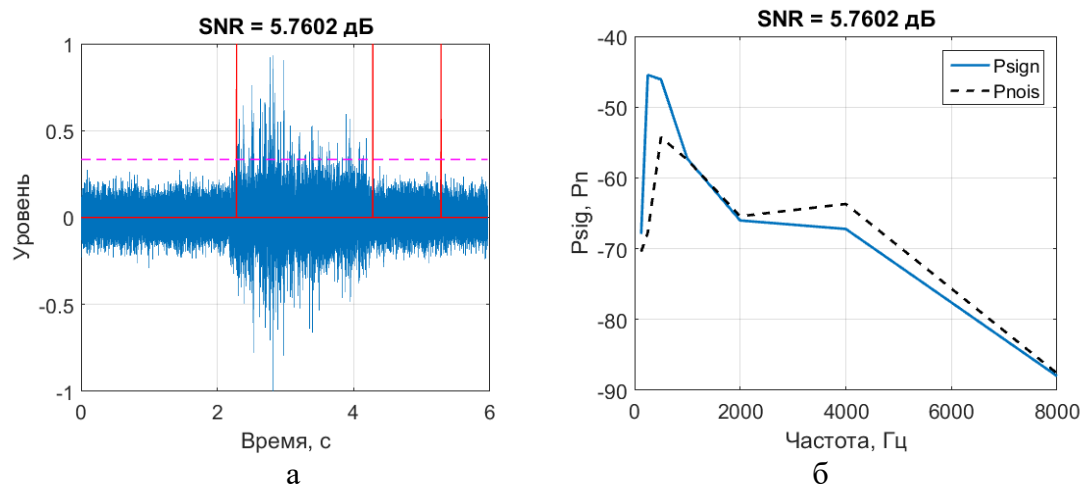


Рис. 2.3

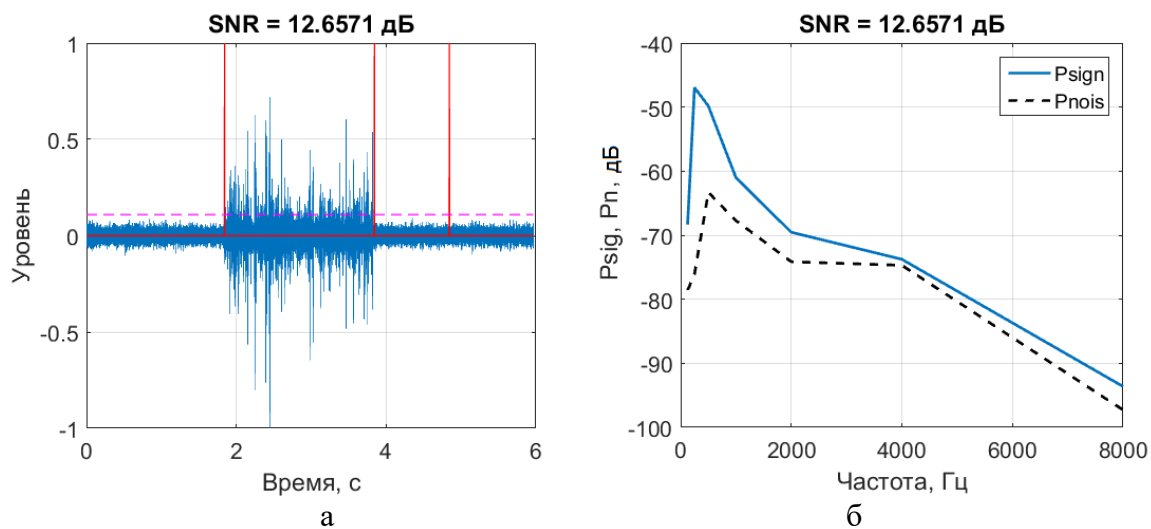


Рис. 2.4

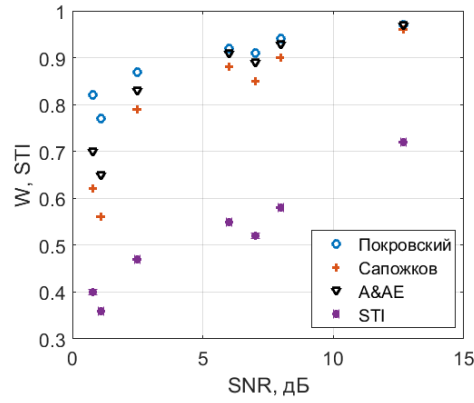


Рис. 2.5

Як бачимо із рис. 5, ситуація $SNR \approx 6 \dots 8$ дБ може розглядатися як гранична між середньою і хорошою розбірливістю, оскільки в цьому випадку $W \approx 0,9$ та $STI \approx 0,6$ [15].

4. Зіставлення результатів вимірювань з прогнозними оцінками

Прогнозні оцінки розбірливості мовлення можна отримати шляхом комп'ютерного моделювання [12] або розрахунковим шляхом. Другий спосіб більш економічний за витратами комп'ютерних ресурсів, оскільки для його реалізації достатньо задати аналітичні спектральні моделі мовленнєвого сигналу та шуму. Можна показати, що якщо модель мовленнєвого сигналу має вигляд розподілу дисперсій D_{sk} по смугам частот (k - номер смуги частот), а модель шуму має вид розподілу дисперсій D_{nk} , тоді парціальні відношення сигнал-шум E_k можуть бути обчислені у відповідності із виразом

$$E_k = 10 \lg(D_{sk}/D_{nk}) + 10 \lg(SNR_0) - 10 \lg\left(\frac{\sum_{k=1}^K D_{sk}}{\sum_{k=1}^K D_{nk}}\right).$$

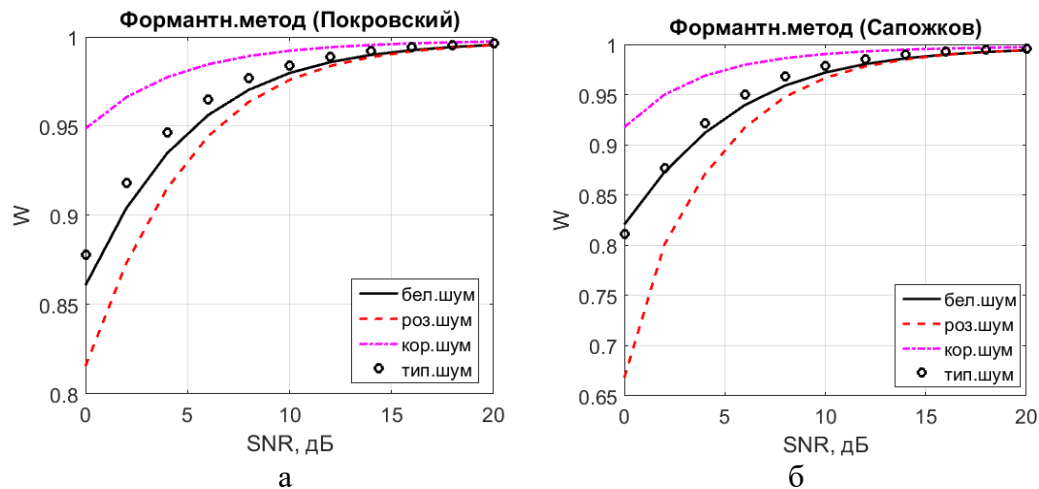
У табл. 2.2 наведено запозичений з [4] розподіл D_{sk} . В цій таблиці також наведені розподіли D_{nk} для 4-х видів шумів: білого, рожевого, коричневого й

типового для приміщень з відкритим плануванням (стандарт ISO 3382-3-2013), до яких відносяться офіси, бібліотечні зали, навчальні приміщення.

Таблиця 2.2. Первинні розподіли дисперсій мови та шуму

Параметри частотних каналів							
f_{0k}	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Δf_k	90	175	355	690	1400	2800	5270
Параметри білого шуму							
D_{nk}	0,130	0,254	0,514	1	2,029	4,058	7,638
Параметри рожевого шуму							
D_{nk}	1,043	1,014	1,029	1	1,014	1,014	0,955
Параметри коричневого шуму							
D_{nk}	8,348	4,058	2,058	1	0,507	0,254	0,119
Параметри типової шумової завади							
D_{nk}	5,193	2,017	1,284	1	1,023	1,273	1,5471
Параметри довготривалого спектру мовлення							
D_{sk}	0,146	2,846	3,642	1	0,361	0,181	0,096

На рис. 2.6 представлені результати прогнозних розрахунків у вигляді залежностей оцінок словесної розбірливості W та індекса STI від очікуваного відношення сигнал-шум SNR_0 в діапазоні значень $SNR_0 = -26...+20$ дБ.



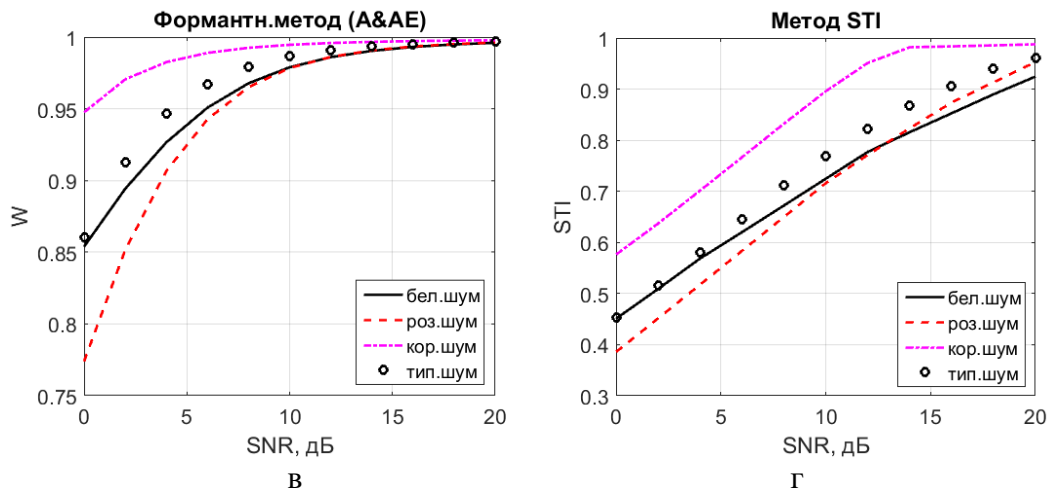


Рис. 2.6. Оцінки словесної (а, б, в) розбірливості та індекса розбірливості (г)

Зіставляючи рис. 2.5 і 2.6, доходимо висновку щодо досить хорошого узгодження результатів вимірювань з прогнозними оцінками. Дійсно, для оцінок STI, ситуація $SNR \approx 4 \dots 6$ дБ може розглядатися як гранична між посередньою і хорошою розбірливістю майже для всіх розглянутих моделей шуму. Для цієї ж граничної ситуації, прогнозним оцінкам словесної розбірливості $W \approx 0,9$ відповідає $SNR \approx 3 \dots 5$ дБ. Винятком є модель коричневого шуму, для якого граничною є ситуація $SNR \approx 0$ дБ. Незначна розбіжність прогнозних результатів і результатів вимірювань може бути пояснена відмінностями модельних і реального спектрів шумової завади.

Підсумовуючи, зазначимо, що вище було описано алгоритм підготовки акустичних сигналів до оцінювання парціальних відношень сигнал-шум при вимірюваннях розбірливості мовлення в умовах переважання шумової завади. Наведено результати тестування, що демонструють працездатність і надійність даного алгоритму. Показано, що висока надійність виявлення сигналу на тлі шумової завади досягається при відношеннях сигнал-шум не менше 0 дБ. Близькість результатів вимірювань і прогнозування розбірливості мовлення для трьох версій формантного методу, а також для оцінки індекса передачі мови, свідчить про достовірність отриманих результатів.

Програма генерування тестового шумового сигналу із мовоподібним спектром

```

% === gener_noise_like_speech.m ===
% Генерирование стац. шума с длительным спектром речи
%
% T - длительность, секунды
% Fs - частота дискретизации, Гц
%
% === Вычисления: ===
clear; clc;
T = 2; % длительность тестового сигнала (шум с речевым спектром), секунды
Fs = 22050; % частота дискретизации, Гц
df = [90 175 355 690 1400 2800 5270]; % октавн. смуги частот
f0 = [125 250 500 1000 2000 4000 8000]; % центр. частоты октавных фильтров
color_sig_db = [60 70 68 59.5 52 46 40.5]; % спектр речи в дБ
color_sig = 10.^(0.05*color_sig_db); % в разгах по напряжению
color_sig = color_sig/max(color_sig); % в разгах по напряж. нормир.

% --- считывание коэф-тов гребенки фильтров ---
load fltrbnk7_struct;
a = fltrbnk7_struct.a;
len_a = fltrbnk7_struct.len_a;

% --- фільтрація білого шуму гребінкою октавних фільтрів
N = T*Fs+len_a;
x = randn(N,1); % генерируем белый шум (столбец)
xband = filter_band_7_func(x,a,color_sig); % фільтрація гребінкою
xband(1:len_a,:)=[]; % отбрасываем неправильные выборки

% --- суммирование процессов с выходов фильтров
x = sum(xband,2);

% --- нормирование перед записью на диск
x = x/max(abs(x));

% --- запис на диск
filename = input('Вкажіть ім'я файлу запису (без лапок): ', 's');
audiowrite(filename,x,Fs);

```

```

% --- контроль результату
figure          % графік сигналу
t = 0:1/Fs:(length(x)-1)/Fs;
plot(t,x); xlabel('Время, с'); ylabel('Уровень');
title('Шум со спектром речи'); grid on;

figure          % графік спектра
Px = 10*log10(var(xband)./df);
plot(f0,Px); xlabel('Частота, Гц'); ylabel('Px, dB');
title('Спектр потужності'); grid on;

```

Додаток 2.3

Програма запису та обробки тестового сигналу

```

% === main_formant_real.m ===
% Реальное измерение розбірливості мовлення формантним методом
%
% ===== входные параметры: =====
% обработка живого сигнала: live = 1; обработка записи сигнала: live = 0;
% Tn1, Tmix, Trev, Tn2 - длит-сти завади1, смеси, рев-ции и завади2 (сек)
% ПРИМЕР: Tn1 = 2; Tmix = 8; Trev = 1; Tn2 = 8;
% avtr - автор версии метода (Покровский: avtr=1;Сапожков:avtr=2;мы:avtr=3)
% bnd - кол-во октавных смуг частот: 5 смуг: bnd=5; 7 смуг: bnd=7
% W - словесная разборчивость
%
% --- План обчислень: ---
% --- Часть 1: подготовка к вычислениям
% --- 1) задание внутренних параметров
% --- 2) считывание коэф-тов гребенки фільтрів ---
% --- 3) подготовка к записи - створення аудиообъекта
% --- 4) запись или прочитання с диска
% --- Часть 2: Формування ділянок смеси, рев-ции и завади ---
% --- 1) оцінка дисперсии завади и обчислення порога  $\Pi = 5 \cdot \sigma$ 
% --- 2) обчислення момента начала смеси
% --- 3) фільтрація записи
% --- 4) Формування массивов смеси, рев-ции и завади
% --- 5) контроль правильности расстановки границ ділянок записи
% --- Часть 3: измерение  $E_k$ 
% --- Часть 4: оцінювання розбірливості мовлення формантним методом ---
% --- 1) обчислення словесної розбірливості по Покровському ---

```

```

% --- 2) обчислення словесної розбірливості по Сапожкову ---
% --- 3) обчислення словесної разборч. по нашим коэфф.сприйняття ---
% --- 4) обчислення STI ---
%
clear
% === Вычисления: ===
% --- Часть 1: подготовка к вычислениям
% --- 1) задание внутренних параметров
Fs = 22050;          % частота дискретизации, Гц
live = 1; Tn1=1; Tmix=2; Trev=1; Tn2=1; bnd=7;
df = [90 175 355 690 1400 2800 5270]; % октавн. смуги частот
f0 = [125 250 500 1000 2000 4000 8000]; % центр. частоты октавных фільтрів
df5 = [175 355 690 1400 2800];      % 5 октавн. смуги частот
f05 = [250 500 1000 2000 4000]; % центр. частоты 5 октавных фільтрів
T = (Tn1+1)+Tmix+Trev+Tn2; % длительность записи в секундах

% --- 2) считывание коэф-тов гребенки фільтрів ---
load fltrbnk7_struct;
a = fltrbnk7_struct.a;
%len_a = fltrbnk7_struct.len_a;

% --- 4) запись или прочитання с диска
if live == 1
    disp('Нажмите любую клавишу для начала записи');
    pause;
% --- подготовка к записи - створення аудиообъекта
recorder = audiorecorder(22050,16,1);
record(recorder,T);
pause(T);
disp('Нажмите любую клавишу для обработки');
x = getaudiodata(recorder,'double');
x(1:Fs) = [];          % откусывем 1 сек переходного процесса
x = x-mean(x);         % центрирование записи
x = x/max(abs(x));      % нормировка записи по максимуму
audiowrite(['test-n_' num2str(Tn1) '_' num2str(Tmix) '_' ...
    num2str(Trev) '_' num2str(Tn2) '.wav'],x,Fs);
else
    filename = input('Вкажіть ім"я файлу запису (без лапок): ', 's');
    [x,Fs] = audioread(filename);
    Tn1=1; Tmix=2; Trev=1; Tn2=2;
end

```

```

x = x/max(abs(x));          % нормировка записи по максимуму

% --- Часть 2: Формування ділянок смеси, рев-ции и завади ---
% --- 1) оцінка дисперсії завади и обчислення порога  $\Pi = 5 \cdot \sigma$ 
n1fin = Tn1*Fs;             % кінець ділянки початкової завади
n1 = x(1:n1fin);           % початкова поємеха
n1_std = std(n1);           % станд. відхилення завади
thresh = 5*n1_std;          % поріг для виявлення початку смеси

% --- 2) обчислення моменту початку смеси
s_begin = find(sign(x-thresh)+1,1); % номер першої вибірки смеси

% --- 3) фільтрація записи
xband7 = filter_band_7_func(x,a,[1 1 1 1 1 1 1]); % фільт-ція гребінкою

% --- 4) Формування масивів смеси, рев-ции и завади
s_end = s_begin + Tmix*Fs;   % номер останньої вибірки смеси
rev_end = s_end + Trev*Fs;   % номер останньої вибірки рев-ції
x_end = length(x);           % номер останньої вибірки записи
mix7 = xband7(s_begin:s_end,:); % смесь
rev7 = xband7(s_end:rev_end,:); % рев-ція
n27 = xband7(rev_end:x_end,:); % шум

% --- 5) контроль: інтегрального SNR, спектра сигналу, спектра завади
if bnd == 7
    SNR = 10*log10(sum(var(mix7)-var(n27))/sum(var(n27)));
    Psig = 10*log10((var(mix7)-var(n27))./df);
    Pn = 10*log10(var(n27)./df);
else
    mix5 = mix7(:,2:6); n25 = n27(:,2:6);
    SNR = 10*log10(sum(var(mix5)-var(n25))/sum(var(n25)));
    Psig = 10*log10((var(mix5)-var(n25))./df5);
    Pn = 10*log10(var(n25)./df5);
end

% --- 6) контроль правильності расстановки границ ділянок записи
figure % new figure
t = 0:1/Fs:(length(x)-1)/Fs;
y = zeros(length(x),1); y(s_begin) = 1; y(s_end) = 1; y(rev_end) = 1;
thr = zeros(length(x),1); thr(:,1) = thresh;

```

```

plot(t,x); hold on; plot(t,y,'r'); plot(t,thr,'--m');
xlabel('Время, с'); grid on;
title(['SNR = ' num2str(SNR) ' дБ']);

figure;          % графики спектров, значение SNR
if bnd == 7
    plot(f0,Psig); hold on; plot(f0,Pn,'--k'); legend('Psign','Pnois');
else
    plot(f05,Psig); hold on; plot(f05,Pn,'--k'); legend('Psign','Pnois');
end
xlabel('Частота, Гц'); ylabel('Psig, Pn');
title(['SNR = ' num2str(SNR) ' дБ']);

% --- Часть 3: измерение Ek
Ek = 10*log10((var(mix7)-var(n27))./var(n27)); % для 7 октавных смуг
if bnd == 5
    Ek = Ek(2:6);
end

% --- Часть 4: оцінювання розбірливості мовлення формантним методом ---
% --- 1) обчислення словесної розбірливості по Покровському ---
    %if avtr == 1
        if bnd == 7
            W = razbor_pokr(Ek); % 7 смуг частот
        else
            W = razb1(Ek); % 5 смуг частот
        end
        disp(['W = ' num2str(W) '; Покровский; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
    %end

% --- 2) обчислення словесної розбірливості по Сапожкову ---
    %if avtr == 2
        if bnd == 7
            W = razb_sapoz_7(Ek); % 7 смуг частот
        else
            W = razb_sapoz_5(Ek); % 5 смуг частот
        end
        disp(['W = ' num2str(W) '; Сапожков; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
    %end

% --- 3) обчислення словесної разборч. по нашим коэфф.сприйняття ---
    %if avtr == 3
        if bnd == 7

```

```
    W = razb_we_short(Ek);  
else  
    W = razb_we_5(Ek);  
end  
disp(['W = ' num2str(W) '; Наша версия; ' num2str(bnd) ' октавн. смур'])  
%end  
%if avtr == 4  
    if bnd == 7  
        sti = razb_sti(Ek);  
    else  
        sti = 0;  
    end  
    disp(['sti = ' num2str(sti) '; ' num2str(bnd) ' октавн. смур'])  
%end
```

Лабораторна робота №3

Прогнозування розбірливості мовлення, замаскованого реверберацією

Мета роботи: Здобуття навичок розрахунку (прогнозування) розбірливості мовлення, замаскованого реверберацією.

Тривалість виконання роботи: 2 години.

Підготовка до роботи:

1. Ознайомитися із Додатком 3.1 (теоретичні засади для даної Лабораторної роботи).
2. Ознайомитися із веб-калькулятором акустичних характеристик приміщення [46].

Робоче завдання:

1. Використовуючи веб-калькулятор [46], виконати розрахунки акустичних параметрів приміщення та *виписати для подальшого використання значення часу реверберації T_{60} як функції частоти* (при цьому вважати $T_{60} = T_{20}$). Як приклад, в табл. 3.2 наведено значення T_{60} , отримані викладачем.

Примітка 1. *Ви маєте при розрахунках використовувати отримані вами значення T_{60} .*

Примітка 2. *Веб-калькулятор дає лише 6 значень параметра T_{60} . Оскільки для розрахунків нам треба мати ще й сьоме значення T_{60} , пропонується прийняти його рівним шостому значенню (як приклад, дивіться Табл. 3.2).*

2. Використовуючи аналітичні співвідношення із Додатку 3.1, обчислити розбірливість мови для заданої аудиторії (табл. 3.1) кафедри АМЕС.

Примітка 3. Цей час реверберації в [1] розраховується двома способами (див. Табл. 3.2):

- із використанням формули Себіна, де звукове поле вважається дифузним;
- за спеціальною методикою [47], де звукове поле не вважається дифузним через використання підвісних стель із звукопоглинальних матеріалів.

Примітка 4. В [46] також додатково пропонуються результати обчислення часу реверберації для приміщення без підвісної стелі.

3. При обчисленнях розбірливості мови доцільно скористатися програмою Matlab, наведеною в Додатку 3.2.
4. Отримані результати занести у Звіт та прокоментувати у Звіті.
5. Захист Звіту зробити у час, призначений викладачем.

Таблиця 3.1. Розміри аудиторій

№ варіанту	1	2
№ аудиторії	438	209
Розміри, м	$8.9 \times 6.2 \times 3,2$	$11,4 \times 7,4 \times 3,2$

Таблиця 3.2. Час реверберації T_{60}

f_0 , Гц	125	256	500	1000	2000	4000	8000
№438, Себін	1.22	0.67	0.49	0.48	0.47	0.43	0.43
№438, Eсophon	1.44	1.29	0.83	0.93	1.25	1.14	1.14
№209, Себін	1,35	0,69	0,50	0,49	0,48	0,44	0,44
№209, Eсophon	1,71	1,46	0,91	1,07	1,44	1,29	1,29

Контрольні запитання:

1. Яка мета даної роботи?
2. Чим відрізняється вимірювання розбірливості мови від прогнозування?
3. Чому вираз (3.1) із Додатку 3.1 є грубим наближенням до реальної ситуації?
4. Чому модуляційний метод так називається?
5. Чому та як формантний метод можна «розширити» на випадок дії реверберації?
6. Як розуміти вираз «ефективне відношення сигнал-шум»?

**Аналітичні вирази для прогнозування розбірливості мовлення,
спотвореного реверберацією**

Прогнозування індексу STI модуляційним методом виконують за наступними виразами [3]:

$$m_k(F_i) = \left(1 + \left(\frac{2\pi F_i T_{k60}}{13,8} \right)^2 \right)^{-0,5} \quad (\text{Д3.1})$$

$$E_{ki} = 10 \lg \frac{m_{ki}}{1 - m_{ki}}, \quad (\text{Д3.2})$$

$$T_{ki} = \begin{cases} 0, & E_{ki} < -15; \\ (E_{ki} + 15)/30, & -15 \leq E_{ki} \leq +15; \\ 1, & E_{ki} > +15; \end{cases}$$

$$MT_k = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} T_{ki}, \quad (\text{Д3.3})$$

$$STI = \sum_{k=1}^7 \alpha_k \cdot MT_k - \sum_{k=1}^6 \beta_k \cdot \sqrt{MT_k \cdot MT_{k+1}}, \quad (\text{Д3.4})$$

де α_k - вагові коефіцієнти, β_k - коефіцієнти надмірності, значення яких для октавних смуг із центральними частотами f_0 наведено в табл. Д1.

Таблиця Д1 – Вагові коефіцієнти та коефіцієнти надмірності для октавних смуг

f_{0k} , Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α_k	0,085	0,127	0,230	0,233	0,309	0,224	0,173
β_k	0,085	0,078	0,065	0,011	0,047	0,095	-

Хоча формантний метод із самого початку був розрахований на дію шумової завади, проте його можна розширити на випадок дії реверберації, як це було

запропоновано співробітниками кафедри АМЕС [4]. При цьому мовну розбірливість w обчислюють через формантну розбірливість A , як це описано формулами (1.1)-(1.9) Додатку 1.1 Лабораторної роботи №1.

Додаток 3.2

Програма прогнозування розбірливості мовлення, спотвореного реверберацією

% === rever_prognosz.m === Прогнозування розбірливості мови при реверберації

% План розрахунків

% 1) вхідні дані: час реверберації T60 як функція частоти

% 2) розрахунок mki

% 3) розрахунок snr

% 4) розрахунок Ek

% 5) розрахунок розбірливості STI та W (Покровський, Сапожков, АМЕС)

clear;

%T60 = [1.35 0.69 0.5 0.49 0.48 0.44 0.44]; % 209 ауд, Сэбин (Продеус-Есophon)

%T60 = [1.71 1.46 0.91 1.07 1.44 1.29 1.29]; % 209 ауд, Есophon (Продеус-Есophon)

%T60 = [1.22 0.67 0.49 0.48 0.47 0.43 0.43]; % 412 ауд, Сэбин (Продеус-Есophon)

T60 = [1.44 1.29 0.83 0.93 1.25 1.14 1.14]; % 412 ауд, Есophon (Продеус-Есophon)

bnd = 7; % семь октавных частот: bnd=7; пять октавных частот: bnd=5;

Fi=[0.63 0.8 1 1.25 1.6 2 2.5 3.15 4 5 6.3 8 10 12.5]; % Fi - модуляционные частоты

m_matrix = ones(14,bnd);

for i=1:14 % Корегування максимальных значений коэф.модуляции

for k=1:7

m_matrix(i,k) = (1+(2*pi*Fi(i)*T60(k)/13.8)^2)^(-0.5);

end

end % конец вычисл. коэф.модуляции

snr = m_matrix./(1-m_matrix); % отношен. сигн-шум в разгах по потужности

Ek = mean(10*log10(snr));

if bnd == 5

Ek = Ek(2:6);

end

```

% Значення T60
disp(['T60 = ' num2str(T60(1)) ' ' num2str(T60(2)) ' ' num2str(T60(3)) ' ' ...
    num2str(T60(4)) ' ' num2str(T60(5)) ' ' num2str(T60(6)) ' ' num2str(T60(7))]);
disp('Прогнозні значення розбірливості мови, спотвореної реверберацією:');

% --- 1) обчислення словесної розбірливості по Покровському ---
    %if avtr == 1
        if bnd == 7
            W = razbor_pokr(Ek); % 7 смуг частот
        else
            W = razb1(Ek); % 5 смуг частот
        end
        disp(['W = ' num2str(W) '; Покровский; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
    %end

% --- 2) обчислення словесної розбірливості по Сапожкову ---
    %if avtr == 2
        if bnd == 7
            W = razb_sapoz_7(Ek); % 7 смуг частот
        else
            W = razb_sapoz_5(Ek); % 5 смуг частот
        end
        disp(['W = ' num2str(W) '; Сапожков; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
    %end

% --- 3) обчислення словесної разборч. по нашим коэфф.сприйняття ---
    %if avtr == 3
        if bnd == 7
            W = razb_we_short(Ek);
        else
            W = razb_we_5(Ek);
        end
        disp(['W = ' num2str(W) '; Наша версия; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
    %end

    %if avtr == 4
        if bnd == 7
            sti = razb_sti(Ek);
        else
            sti = 0;
        end
        disp(['sti = ' num2str(sti) '; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
    %end

```

Лабораторна робота №4

Вимірювання розбірливості мовлення, замаскованого реверберацією

Мета роботи: Здобуття навичок вимірювання розбірливості мовлення, замаскованого реверберацією.

Тривалість виконання роботи: 2 години.

Підготовка до роботи:

1. Ознайомитися із Додатком 4.1 (теоретичні засади для даної Лабораторної роботи).
2. Ознайомитися із Додатком 4.2 (програма для вимірювання розбірливості мови, спотвореної реверберацією).

Робоче завдання:

1. Намалювати блок-схему алгоритму програми, наведеної в Додатку 4.2.
2. Налаштувати програму із Додатку 4.2 (міститься у теці **Programs_Lab4_Zahyst**) для *самостійного запису та обробки* імпульсної характеристики (IX) приміщення, в якому ви знаходитесь (аудиторія, кімната у вашій квартирі тощо).

Примітка 1. Рекомендовані значення параметрів: **live**=1, **T**=3...4, **T1**=0,5...0,8.

3. Виконати самостійний запис та обробку IX вашого приміщення, для чого запустити програму **main_formant_real_reverb.m** та після 1-секундної паузи плеснути в долоні на відстані не менше 1 метра від мікрофона. Через час **T** запис закінчиться й результат запису буде автоматично оброблено та записано на диск під ім'ям **h_my_room.wav**. Крім того, на моніторі буде відображено частину записаної IX довжиною **T1**, а в командному вікні Matlab відобразяться значення **STI** та словесної розбірливості **W** (3 варіанти

обчислень - за Покровським, Сапожковим та кафедрою АМЕС). Занотувати отримані результати, а графік ІХ зберегти для звіту.

Примітка 2. Якщо отримані за п.3 результати виявляться, на вашу думку, незадовільними, повторити запис ІХ та її обробку.

4. Налаштувати програму **main_formant_real_reverb.m** (у теці **Programs_Lab4_Zahyst**) *для обробки вже записаних ІХ*.

Примітка 3. Для цього достатньо задати: **live=0**.

5. Обчислити розбірливість мови, використовуючи записи 4-х ІХ: **h_my_room.wav, h_209.wav, h_412.wav, h_438.wav**. Занотувати отримані результати, а графіки ІХ зберегти для звіту.

Примітка 4. Імена останніх трьох файлів відповідають номерам аудиторій факультету електроніки, де було зроблено записи.

6. Обчислити час реверберації для записів ІХ вашої кімнати та 3-х аудиторій факультету електроніки.

Примітка 4. Використати програму **t60_shreder_2.m** (міститься у теці **Programs_Lab4_Zahyst**). Результати обчислень та графіки зберегти для Звіту.

7. Порівняти результати *вашого* прогнозування та вимірювання розбірливості в аудиторіях 209 та 438 та прокоментувати результати порівняння.
8. Отримані результати занести у Звіт та прокоментувати у Звіті.
9. Захист Звіту зробити у час, призначений викладачем.

Контрольні запитання:

1. Яка мета даної роботи?
2. Чим відрізняються розрахунок та вимірювання розбірливості мови, спотвореної реверберацією?
3. Чим відрізняється спосіб отримання запису ІХ, який використано вами, від способу, описаного в Додатку 4.1? Які переваги кожного із способів?

4. Яку нову інформацію може дати застосування штучної голови (Додаток 4.2) для вимірювань розбірливості мови, спотвореної реверберацією?
5. Чому розбірливість мови, спотвореної реверберацією, різна в різних місцях приміщення?
6. Які висновки можна зробити щодо якості приміщень, які проаналізовано вами, з точки зору розбірливості мови?
7. Як можна покращити розбірливість мови в розглянутих приміщеннях?
8. Як недоліки ви знайшли у використаних вами програмах?
9. Як можна виправити знайдені недоліки?

Додаток 4.1

Аналітичні вирази та приклад вимірювань розбірливості мовлення, спотвореного реверберацією

1. Вступ

Після експериментального вимірювання ІХ приміщення, стає можливим оцінювання розбірливості мови модуляційним [16], [17] або формантно-модуляційним [18], [19] методом. Першим кроком такого оцінювання є обчислення, за формулою Шредера [20], коефіцієнтів передачі модуляції:

$$m_{ki} = \frac{\left| \int_0^{\infty} h_k^2(t) \exp(-j2\pi F_i t) dt \right|}{\int_0^{\infty} h_{ki}^2(t) dt},$$

де $h_k(t)$ - результат фільтрації функції $h_r(t)$ смуговим фільтром (на практиці використовують 7 октавних фільтрів із центральними частотами від 125 Гц до 8 кГц); F_i - частота модуляції (на практиці використовують 14 значень F_i , в діапазоні від 0,63 Гц до 12,5 Гц).

Наступними кроками є обчислення ефективних відношень сигнал-шум для кожної смуги та кожної модуляційної частоти:

$$E_{ki} = 10 \lg \frac{m_{ki}}{1 - m_{ki}},$$

середнього індексу передачі модуляції

$$MT_k = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} T_{ki},$$

$$T_{ki} = \begin{cases} 0, & E_{ki} < -15; \\ (E_{ki} + 15)/30, & -15 \leq E_{ki} \leq +15; \\ 1, & E_{ki} > +15; \end{cases}$$

Останнім кроком, згідно модуляційного методу [17], є обчислення індексу передачі мови:

$$STI = \sum_{k=1}^7 \alpha_k \cdot MT_k - \sum_{k=1}^6 \beta_k \cdot \sqrt{MT_k \cdot MT_{k+1}},$$

де α_k - вагові коефіцієнти, β_k - коефіцієнти надмірності, значення яких для октавних смуг із центральними частотами f_0 наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вагові коефіцієнти та коефіцієнти надлишковості для октавних смуг

f_{0k} , Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α_k	0,085	0,127	0,230	0,233	0,309	0,224	0,173
β_k	0,085	0,078	0,065	0,011	0,047	0,095	-

Словесну розбірливість згідно формантному та формантно-модуляційному методу [18] обчислюють за формулами (1.1)-(1.9) Додатку 1.1 до Лабораторної роботи 1.

Нижче наводиться приклад оцінювання індексу STI та словесної розбірливості W для різних точок кількох лекційних приміщень та зіставлення отриманих результатів між собою, а також із результатами суб'єктивного

оцінювання розбірливості мови. Такі порівняння дозволили зробити висновок щодо достовірності отриманих результатів та спроможності розробленого комплексу «Штучна голова» [22] до об'єктивного вимірювання розбірливості мови.

2. Організація досліджень

Розроблений на кафедрі АМЕС комплекс «Штучна голова» [22] містить електроакустичну апаратуру різної якості, а саме: побутову активну колонку Genius SP-HF 2.0 500 (14 Вт, 65 Гц - 20 кГц, сигнал-шум 73 дБ), всеспрямовані вимірювальні конденсаторні мікрофони Superlux ECM-999 (20 Гц - 20 кГц, динамічний діапазон 106 дБ, сигнал-шум 70 дБ), зовнішню звукову карту Steinberg UR242 (24 біт, 192 кГц).

При вимірюваннях ІХ приміщень, запис тестових сигналів виконувався із частотою дискретизації 44,1 кГц та глибиною квантування 24 біти. Два мікрофони розташовувалися в зонах вушних раковин штучної голови на відстані 1 см від місцезнаходження вушного каналу (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Запис тестового сигналу із використанням штучної голови

Основою тестового сигналу слугувала mls-послідовність [25] із ступенем 16 (тобто mls-послідовність містила 216 вибірок), що відповідає довжині сигналу 1,49 с при частоті дискретизації 44,1 кГц. Ця mls-послідовність при випромінненні повторювалася 17 разів, що дозволяло при обчисленні ІХ приміщення

усереднювати 16 останніх сплесків оцінки ВКФ для підвищення відношення сигнал-шум на 12 дБ.

Для вимірювань було обрано 2 аудиторії, малого та середнього розміру (рис. 4.2). Характеристики малої аудиторії №438: розміри 7х7х3,1 м, два вікна, двері, задня стінка приміщення зашклена, три ряди із 6 парт в кожному ряді та стіл викладача, наповненість приміщення під час запису сигналів - 11 студентів та викладач. Дистанції від гучномовця до номерів 1, 2 та 3 точок, де розміщувалася ШГ, 2 м, 4 м та 6 м, відповідно.

Характеристики середньої аудиторії №209: розміри 10х15х3,1 м, чотири вікна, двері, дві книжних шафи, шафа-гардероб, три ряди із 9 парт в кожному ряді, стіл викладача та 2 додаткових вільних столи, наповненість приміщення під час запису сигналів - 9 студентів та викладач. Дистанції від гучномовця до номерів 1, 2, 3, 4, 5 та 6 точок, де розміщувалася ШГ, 3 м, 6 м, 9 м, 14 м, 9 м та 9 м, відповідно.

3. Результати досліджень

На рис. 4.3 наведено графіки ІХ розглянутих приміщень, із результатами вимірювання часу реверберації. Графіки наведено лише для лівого каналу, оскільки для правого каналу вони є подібними. Обвідну ІХ, побудовану за методом Шредера [26], використано для обчислення часу реверберації, оцінки якого представлені на рис. 4.3.

Порівнюючи ІХ аудиторій 438 (рис. 4.3б) та 209 (рис. 4.3в), бачимо, що в аудиторії 209 спостерігається біля 3-х потужних ранніх відбиттів на інтервалі часу до 30 мс, та ще один виразний сплеск в момент часу 0,27 с, тоді як спад енергії в аудиторії 438 є більш плавним. Час реверберації в обох приміщеннях виявився досить великим та близьким до 1 с, що у випадку аудиторії 209 пояснюється слабким заповненням порівняно великого приміщення, а у випадку аудиторії 438 пояснюється наявністю скляної задньої стінки.

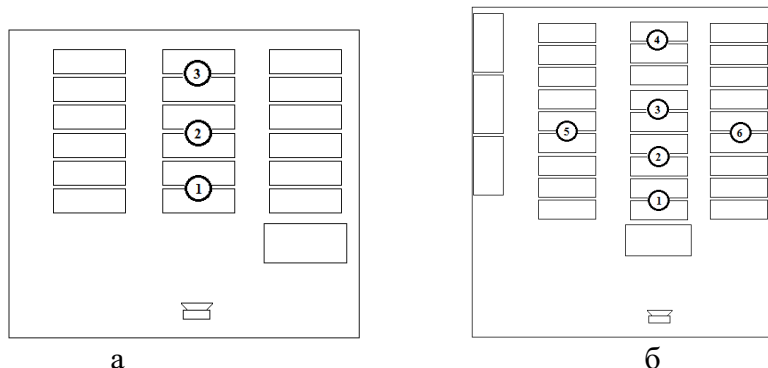


Рис. 4.2. Плани малої аудиторії 438 (а) та середньої аудиторії 209 (б)

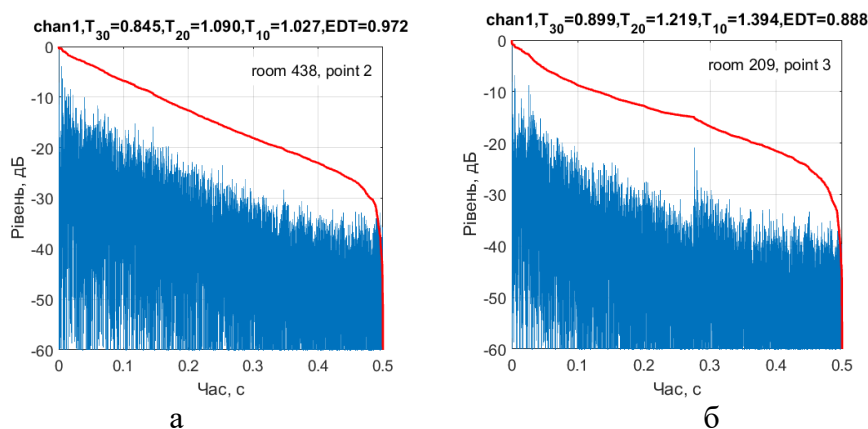


Рис. 4.3. ІХ та час реверберації для аудиторій 438 (а) та 209 (б)

Результати оцінювання характеристик $C_{50} = 10\lg(E_0^{50}/E_{50}^{\infty})$ та $ERB = 10\lg(E_0^{50}/E_0^{10})$ наведено на рис. 4.4 та 4.5, відповідно, де $E_a^b = \int_a^b h^2(t)dt$, a та b - час в мілісекундах. Оскільки для $t > 0,5$ с рівень шумової завади переважає над рівнем реверберації (рис. 4.3), при обчисленнях C_{50} в якості ∞ використано значення 0,5 с.

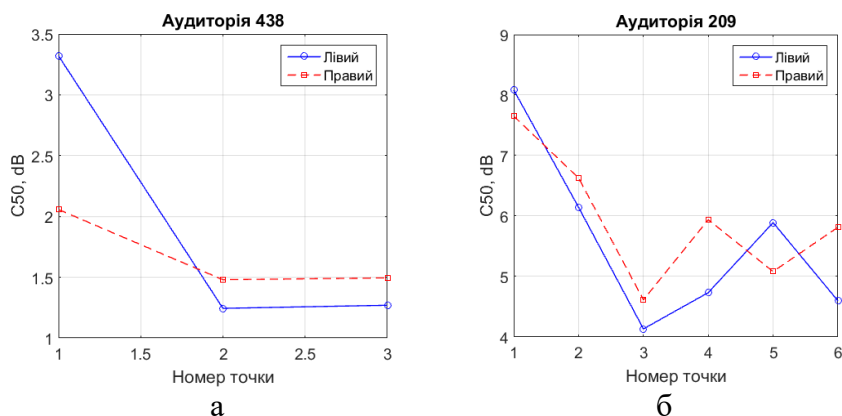


Рис. 4.4. Оцінки параметру C_{50} для аудиторій 438 (а) та 209 (б)

Згідно отриманим оцінкам C50, чіткість мовлення в аудиторії 209 має бути помітно вищою, ніж в аудиторії 438, причому ця чіткість має швидко спадати із наближенням до середини кімнати, після чого має стабілізуватися на певному рівні. Цікаво, що, згідно оцінкам C50, в аудиторії 209 чіткість мови біля задньої стінки (точка 4) є помітно вищою, ніж в середині кімнати (точка 3). В аудиторії 438 подібний ефект також спостерігається, але є ледь помітним.

Поведінка показника ERB, що характеризує співвідношення енергій ранніх відбиттів та прямого звуку, також підтверджує існування зазначеного ефекту. Дійсно, якщо вважати, що прямий звук є кращим з точки зору розбірливості мови, порівняно із ранніми відбиттями, тоді, згідно рис. 4.5а, бачимо, що в аудиторії 438 розбірливість в лівому каналі є вищою біля задньої стінки (точка 3), порівняно із серединою приміщення (точка 2). Проте результати оцінювання ERB в правому каналі свідчать про протилежне. В аудиторії 209 (рис. 4.5б) ситуація є не такою суперечливою: в обох каналах, розбірливість мови біля задньої стінки (точка 4) мала би покращитися, порівняно із серединою приміщення (точка 3).

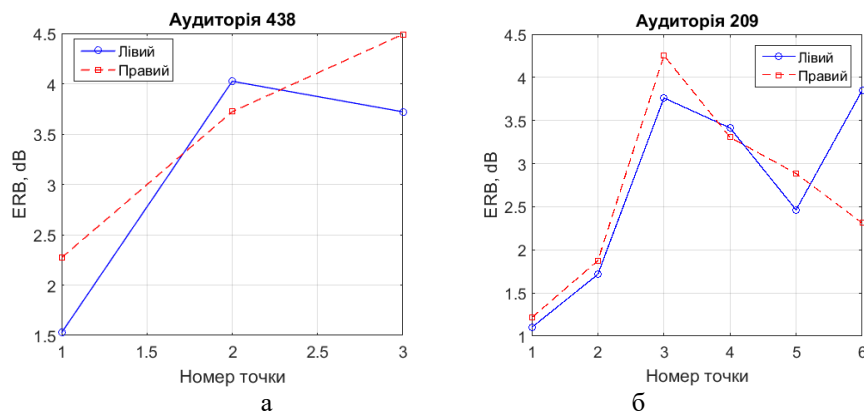


Рис. 4.5. Оцінки параметру ERB для аудиторій 438 (а) та 209 (б)

Зважаючи на певну неоднозначність отриманих оцінок C50 та ERB, які є непрямыми мірами розбірливості мови, цікаво оцінити розбірливість мови у вказаних аудиторіях модуляційним та формантно-модуляційним методами.

Результати оцінювання розбірливості мови модуляційним методом представлено на рис. 4.6, а формантно-модуляційним методом – на рис. 4.7, при

цьому оцінки, отримані формантно-модуляційним методом, були розраховані із використанням уточнених коефіцієнтів сприйняття, форма яких залежить від смуги частот [24].

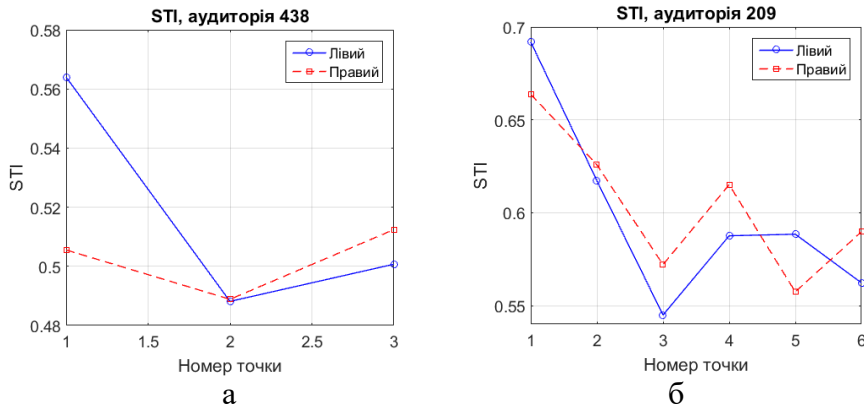


Рис. 4.6. Оцінки індексу STI для аудиторій 438 (а) та 209 (б)

Неважко бачити хороше узгодження оцінок розбірливості мови, отриманих модуляційним та формантно-модуляційним методами, а також узгодження їх із оцінками параметру C50 (рис. 4.4). Слід, однак, зазначити, що ефект підвищення розбірливості мови біля задньої стінки аудиторії 438, порівняно із серединою приміщення, є значно виразнішим для оцінок розбірливості мови (рис. 4.6а та 4.7а), ніж для коефіцієнту C50 (рис. 4.4а). Що стосується аудиторії 209, де було виконано вимірювання ще й біля бокових стінок (точки з номерами 5 та 6), бачимо, що біля бокових стінок аудиторії розбірливість мови є також вищою, ніж в центрі приміщення. Зазначимо, що ефект підвищення розбірливості мови біля стінок приміщення було виявлено також в [14] шляхом суб'єктивного оцінювання розбірливості мови.

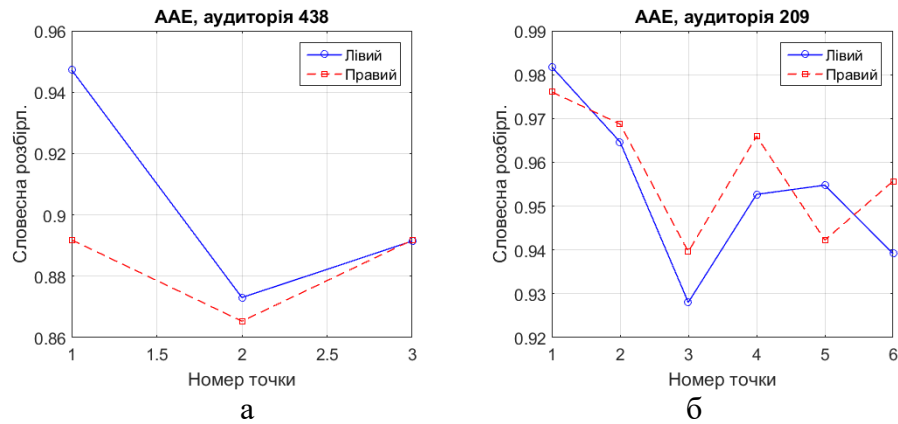


Рис. 4.7. Оцінки словесної розбірливості для аудиторій 438 (а) та 209 (б)

Даному ефекту можна дати досить просте фізичне пояснення. Дійсно, до вух людини, що сидить біля стінки, майже одночасно (в наших випадках різниця в часі становила 3-5 мс) приходять прямий та відбитий від стінки звуки. При цьому потужність відбитого від стінки звуку є ненабагато меншою, порівняно із потужністю прямого сигналу. На низьких частотах (100-200 Гц) сигнали є практично когерентними, тому при близьких рівнях прямого та відбитого звуку на цих частотах можна очікувати підвищення рівня результуючого звуку до 6 дБ, а на високих частотах, де сигнали є практично некогерентними, рівень звуку може підвищитися до 3 дБ. Зауважимо, що хоча ці оцінки є дуже приблизними, проте вони добре узгоджуються із результатами, наведеними в літературі. Що стосується середини приміщення, відбитий від стінки звук приходить із більшою затримкою відносно прямого звуку (в наших випадках 15-20 мс) та є послабленим за рахунок розповсюдження в просторі. Оскільки про когерентність прямого та відбитого звуків в даному випадку вже не йдеться, то очевидно, що рівень сумарного сигналу має бути меншим, ніж біля стінки. Крім того, слід вказати ще й на те, що через помітну затримку між прямим та відбитим сигналом кімната фактично перетворюється в гребінчастий фільтр (комб-фільтр) із суттєво нерівномірною амплітудно-частотною характеристикою. Таким чином, сумарний звук є ще й спотвореним, що також не може сприяти хорошій розбірливості мови в середині кімнати.

Узагальнюючи, можна сказати, що в аудиторіях, подібних розглянутим в даній роботі, користь ранніх відбить, за критерієм розбірливості мови, є різною в різних частинах приміщення, й біля стін приміщення вона є більшою, ніж в середині приміщення.

Підсумовуючи, зазначимо, що результати оцінювання різних мір розбірливості мови, виконаного із використанням апаратно-програмного комплексу «Штучна голова», показали, що розбірливість мови в середині аудиторій може бути суттєво меншою за таку біля стінок приміщення. Отримані результати добре узгоджуються із результатами попередніх досліджень.

Програма вимірювання розбірливості мовлення, спотвореного реверберацією

```

% === main_formant_real_reverb.m ===
% Реальное измерение розбірливості мовлення, искаженной ревер-цией (через ИХ)
%
% ===== входные параметры: =====
% обработка живого сигнала: live = 1; обработка записи сигнала: live = 0;
% T - длит-сть записи (сек); T1 - длит-сть части ИХ до завади (сек);
% ПРИМЕР: T = 3; T1 = 0.5;
% avtr - автор версии метода (Покровский: avtr=1;Сапожков:avtr=2;мы:avtr=3)
% bnd - кол-во октавных смуг частот: 5 смуг: bnd=5; 7 смуг: bnd=7
% W - словесная разборчивость; STI - индекс розбірливості
%
% --- План обчислень: ---
% --- Часть 1: подготовка к вычислениям
% --- 1) задание внутренних параметров
% --- 2) считывание коэф-тов гребенки фільтрів ---
% --- 3) подготовка к записи - створення аудиообъекта
% --- 4) запись или прочитання с диска
% --- Часть 2: Формування ділянок смеси, рев-ции и завади ---
% --- 1) оцінка дисперсии завади и обчислення порога  $\Pi = 5 \cdot \sigma$ 
% --- 2) обчислення момента начала ИХ
% --- 3) фільтрація записи
% --- 4) выкусывание информативной части ИХ
% --- 5) контроль правильности расстановки границ ділянок записи
% --- Часть 3: измерение  $E_k$ 
% --- Часть 4: оцінювання розбірливості мовлення ---
% --- 1) обчислення словесної розбірливості по Покровскому ---
% --- 2) обчислення словесної розбірливості по Сапожкову ---
% --- 3) обчислення словесної разборч. по нашим коэфф.сприйняття ---
% --- 4) обчислення STI
%
% === Вычисления: ===
% --- Часть 1: подготовка к вычислениям
% --- 1) задание внутренних параметров
clear;
Fs = 22050;          % частота дискретизации, Гц
live = 0;
T = 4;              % T - длит-сть записи (сек);

```

```

T1 = 0.5;
%avtr = 4;
bnd = 7;
df = [90 175 355 690 1400 2800 5270]; % октавн. смуги частот
f0 = [125 250 500 1000 2000 4000 8000]; % центр. частоты октавных фильтров
df5 = [175 355 690 1400 2800]; % 5 октавн. смуги частот
f05 = [250 500 1000 2000 4000]; % центр. частоты 5 октавных фильтров

% --- 2) считывание коэф-тов гребенки фильтров ---
load fltrbnk7_struct;
a = fltrbnk7_struct.a;
%len_a = fltrbnk7_struct.len_a;

% --- 3) подготовка к записи - створення аудиообъекта
% --- 4) запись или прочитання с диска
if live == 1
    recorder = audiorecorder(22050,16,1);
    disp('Нажмите любую клавишу для начала записи');
    pause;
    record(recorder,T);
    disp('Нажмите любую клавишу для обработки');
    pause(T);
    x = getaudiodata(recorder,'double');
    x(1:Fs) = []; % откусывем 1 сек переходного процесса
    x = x-mean(x); % центрирование записи
    x = x/max(abs(x)); % нормировка записи по максимуму
    audiowrite(['h_my_room' '.wav'],x,Fs);
else
    filename = input('Вкажіть ім'я файлу запису (без лапок): ', 's');
    [x,Fs] = audioread(filename);
end

h = x/max(abs(x)); % нормировка записи по максимуму

% --- Часть 2: выкусывание нужного из ИХ ---

habs = abs(h); % модуль ИХ
maxhabs = max(habs); % максимум модуля ИХ
hpor05 = sign(h - 0.5*maxhabs)+1; % знак(максимум модуля минус порог 0,5)+1
n0 = find(hpor05,1,'first'); % находим первый ненулевой элемент n0
hc = h(n0:n0+round(T1*Fs)); % вырезаем T1 с, начиная с n0

```

```

tc = 0:1/Fs:(length(hc)-1)/Fs; % массив моментов времени
figure; plot(tc,hc); % график
xlabel('Время, с'); ylabel('Уровень');
grid on;
disp('для продолжения нажмите любую клавишу');
pause;

% --- фільтрація записи
xband7 = filter_band_7_func(hc,a,[1 1 1 1 1 1 1]); % филь-ция гребінкою

% --- квадрат ИХ в каждой смуге частот
xband7 = xband7.^2;

% --- ПФ от квадрата ИХ в каждой смуге
Nfft = size(xband7,1);
ft7 = fft(xband7,Nfft);

% --- обчислення mkf
mkf = zeros(size(ft7,1),size(ft7,2));
for k = 1:7
    mkf(:,k) = abs(ft7(:,k))./abs(ft7(1,k));
end

% --- обчислення snrk(f)
snrkf = 10*log10(mkf./(1-mkf));

% --- Часть 3: измерение Ek
nf = round(14*T1);
Ek = sum(snrkf(2:nf,:),1)/(nf-1); % для 7 октавных смуг
if bnd == 5
    Ek = Ek(2:6);
end

% --- Часть 4: оцінювання розбірливості мовлення ---
% --- 1) обчислення словесної розбірливості по Покровському ---
disp(' ');
if live == 0
    disp(['Аналізується файл ' filename]);
else
    disp('Аналізується файл h_my_room.wav');
end

```

```

disp(' ');
disp('Виміряні значення розбірливості мови, спотвореної реверберацією:');
    % if avtr == 1
        if bnd == 7
            W = razbor_pokr(Ek); % 7 смуг частот
        else
            W = razb1(Ek); % 5 смуг частот
        end
        disp(['W = ' num2str(W) '; Покровский; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
    %end
% --- 2) обчислення словесної розбірливості по Сапожкову ---
    % if avtr == 2
        if bnd == 7
            W = razb_sapoz_7(Ek); % 7 смуг частот
        else
            W = razb_sapoz_5(Ek); % 5 смуг частот
        end
        disp(['W = ' num2str(W) '; Сапожков; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
    %end
% --- 3) обчислення словесної разборч. по нашим коэфф.сприйняття ---
    %if avtr == 3
        if bnd == 7
            W = razb_we_short(Ek);
        else
            W = razb_we_5(Ek);
        end
        disp(['W = ' num2str(W) '; Наша версия; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
    %end
% --- 10) обчислення STI ---
    %if avtr == 4
        if bnd == 7
            sti = razb_sti(Ek);
        else
            sti = 0;
        end
        disp(['sti = ' num2str(sti) '; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
    %end

```

Лабораторна робота №5

Прогнозування розбірливості мовлення, замаскованого шумом та реверберацією

Мета роботи: Здобуття навичок розрахунку (прогнозування) розбірливості мовлення, замаскованого шумом та реверберацією

Тривалість виконання роботи: 2 години.

Підготовка до роботи:

- 1) ознайомитися із *Додатком 5.1* (теоретичні засади до даної лабораторної роботи);
- 2) ознайомитися із текстами програм для прогнозування розбірливості мови у *Додатку 5.2* (текст керуючої програми **main_formant_simple_2.m** для Matlab) та із додатковими програмами-функціями (файли цих програм містяться теці «*Programs_Lab5_Zahyst*»);
- 3) ознайомитися у *Додатку 5.3* із *калькулятором розбірливості мови* - текстом керуючої програми **main_formant_simple_func.m** (файл програми міститься у теці «*Programs_Lab5_Zahyst*»).

Робоче завдання:

1. Використовуючи програму-функцію **main_formant_simple_snr.m** (текст програми в *Додатку 5.3*, файл програми – в теці «*Programs_Lab5_Zahyst*»), розрахувати парціальні відношення сигнал-шум $SNR(k)$ для точки 2 приміщення 438 (відстань 5 м між диктором та слухачем) та для точки 3 приміщення 209 (відстань 8,4 м між диктором та слухачем).
2. Використовуючи веб-калькулятор [46], виконати розрахунки акустичних параметрів аудиторії (розміри аудиторії вказано в Табл. 5.1) та *виписати* для

подальшого використання значення часу реверберації T_{60} як функції частоти (при цьому вважати $T_{60} = T_{20}$). Як приклад, в Табл. 5.2 наведено значення T_{60} , отримані викладачем (*можете використати, якщо не маєте доступу до веб-калькулятора [46]*).

Примітка 1. Ви маєте при розрахунках використовувати отримані вами значення T_{60} .

Примітка 2. Веб-калькулятор [46] дає лише 6 значень параметра T_{60} . Оскільки для розрахунків нам треба мати ще й сьоме значення T_{60} , пропонується прийняти його рівним шостому значенню (як приклад, дивіться Табл. 5.2).

3. Використовуючи аналітичні співвідношення із Додатку 5.1, обчислити розбірливість мови для заданої аудиторії (табл. 5.1) кафедри АМЕС.

Примітка 3. Цей час реверберації в [46] розраховується двома способами (див. Табл. 5.2):

- із використанням формули Себіна, де звукове поле вважається дифузним;
- за спеціальною методикою [47], де звукове поле не вважається дифузним через використання підвісних стель із звукопоглинальних матеріалів.

Примітка 4. При розрахунку розбірливості мови розглянути 4 ситуації:

- шум та реверберація практично відсутні;
- шум є, дія реверберації не враховується ($T_{60}=0.1$ с у всіх смугах частот);
- реверберація є, дія шуму не враховується ($SNR(k)=40$ дБ у всіх смугах частот);
- враховується спільна дія шуму та реверберації.

4. При обчисленнях розбірливості мови доцільно скористатися програмою **noise_rever_prognosz.m**, наведеною в Додатку 5.2.

5. Отримані результати занести у Звіт та прокоментувати у Звіті.

6. Захист Звіту зробити у час, призначений викладачем.

Таблиця 5.1. Розміри аудиторій

№ варіанту	1	2
№ аудиторії	438	209
Розміри, м	$8.9 \times 6.2 \times 3,2$	$11,4 \times 7,4 \times 3,2$

Таблиця 5.2. Час реверберації $T_{60}(k)$

$f_0(k)$, Гц	125	256	500	1000	2000	4000	8000
T_{60} с, №438 Себін	1.22	0.67	0.49	0.48	0.47	0.43	0.43
T_{60} с, №438, Eсophon	1.44	1.29	0.83	0.93	1.25	1.14	1.14
T_{60} с, №209, Себін	1,35	0,69	0,50	0,49	0,48	0,44	0,44
T_{60} с, №209, Eсophon	1,71	1,46	0,91	1,07	1,44	1,29	1,29

Контрольні запитання:

1. Яка мета даної роботи?
2. Чим відрізняється вимірювання розбірливості мови від прогнозування?
3. Чим та чому вираз (5.1) із Додатку 5.1 відрізняється від аналогічного виразу Лабораторної роботи №3?
4. Чому модуляційний метод так називається?
5. Що таке модуляційні частоти та який діапазон їх значень?
6. Чому саме такий діапазон значень модуляційних частот обрано?
7. Чому та як формантний метод можна узагальнити на випадок сумісної дії шуму та реверберації?
8. Як розуміти вираз «ефективне відношення сигнал-шум»? Як воно обчислюється у випадку сумісної дії шуму та реверберації?
9. Дія якої завади на розбірливість мови у ваших розрахунках виявилася сильнішою – шумової чи ревербераційної? Як це узгоджується із вашим досвідом?
10. Як та чому зміниться розбірливість мови, якщо прибрати меблі із приміщення?

Додаток 5.1

Аналітичні вирази для прогнозування розбірливості мовлення, спотвореного шумом та реверберацією

Прогнозування індексу STI модуляційним методом виконують за наступними виразами [3]:

$$m_{ki} = m_{k \text{ noise}} \cdot m_{k \text{ rev}}(F_i) = \left(1 + 10^{-0.1 \cdot SNR_k}\right)^{-1} \cdot \left(1 + \left(\frac{2\pi F_i T_{k60}}{13,8}\right)^2\right)^{-0,5} \quad (\text{Д5.1})$$

$$E_{ki} = 10 \lg \frac{m_{ki}}{1 - m_{ki}}, \quad (\text{Д5.2})$$

$$T_{ki} = \begin{cases} 0, & E_{ki} < -15; \\ (E_{ki} + 15)/30, & -15 \leq E_{ki} \leq +15; \\ 1, & E_{ki} > +15; \end{cases}$$

$$MT_k = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} T_{ki}, \quad (\text{Д5.3})$$

$$STI = \sum_{k=1}^7 \alpha_k \cdot MT_k - \sum_{k=1}^6 \beta_k \cdot \sqrt{MT_k \cdot MT_{k+1}}, \quad (\text{Д5.4})$$

де α_k - вагові коефіцієнти, β_k - коефіцієнти надмірності, значення яких для октавних смуг із центральними частотами f_0 наведено в табл. Д5.1.

Таблиця Д5.1 – Вагові коефіцієнти та коефіцієнти надмірності для октавних смуг

f_{0k} , Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α_k	0,085	0,127	0,230	0,233	0,309	0,224	0,173
β_k	0,085	0,078	0,065	0,011	0,047	0,095	-

Що стосується оцінювання розбірливості мовлення формантним та форматно-модуляційним методами, відповідні співвідношення (1.1)-(1.9) наведені в Додатку 1.1 до Лабораторної роботи №1.

Програма прогнозування розбірливості мовлення, спотвореного шумом та реверберацією

```
% === noise_rever_prognosz.m === Прогнозування розбірливості мови при шумі та реверберації
```

```
% План розрахунків
```

```
% 1) вхідні дані: SNRk = SNR0 як функція частоти
```

```
% 2) вхідні дані: час реверберації T60 як функція частоти
```

```
% 3) розрахунок mki
```

```
% 4) розрахунок snr
```

```
% 5) розрахунок Ek
```

```
% 6) розрахунок розбірливості STI та W (Покровський, Сапожков, АМЕС)
```

```
clear;
```

```
SNRk = [40 40 40 40 40 40 40]; % шум практично відсутній
```

```
%SNRk = [-7.41555 9.5904 12.6229 8.09511 3.57142 -0.37639 -3.97736]; % 438 аудиторія
```

```
%SNRk = [-11.9217 5.08421 8.11667 3.58892 -0.934761 -4.88258 -8.48355]; % 209 аудиторія
```

```
T60 = [0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1]; % ревер-ція практично відсутня
```

```
%T60 = [1.35 0.69 0.5 0.49 0.48 0.44 0.44]; % 209 ауд, Сэбин (Продеус-Есophon)
```

```
%T60 = [1.71 1.46 0.91 1.07 1.44 1.29 1.29]; % 209 ауд, Есophon (Продеус-Есophon)
```

```
%T60 = [1.22 0.67 0.49 0.48 0.47 0.43 0.43]; % 412 ауд, Сэбин (Продеус-Есophon)
```

```
%T60 = [1.44 1.29 0.83 0.93 1.25 1.14 1.14]; % 412 ауд, Есophon (Продеус-Есophon)
```

```
bnd = 7; % семь октавных частот: bnd=7; пять октавных частот: bnd=5;
```

```
Fi=[0.63 0.8 1 1.25 1.6 2 2.5 3.15 4 5 6.3 8 10 12.5]; % Fi - модуляционные частоты
```

```
m_matrix = ones(14,bnd);
```

```
for i=1:14 % Корегування максимальных значений коэф.модуляции
```

```
for k=1:7
```

```
    m_matrix(i,k) = (1+10^(-0.1*SNRk(k)))^(-1)*(1+(2*pi*Fi(i)*T60(k)/13.8)^2)^(-0.5);
```

```
end
```

```
end % конец вычисл. коэф.модуляции
```

```
snr = m_matrix./(1-m_matrix); % отношен. сигн-шум в разгах по потужности
```

```
Ek = mean(10*log10(snr));
```

```

if bnd == 5
    Ek = Ek(2:6);
end

% Значення T60
disp(' ');
disp(['SNRk = ' num2str(SNRk(1)) ' ' num2str(SNRk(2)) ' ' num2str(SNRk(3)) ' ' ...
    num2str(SNRk(4)) ' ' num2str(SNRk(5)) ' ' num2str(SNRk(6)) ' ' num2str(SNRk(7))]);
disp(['T60 = ' num2str(T60(1)) ' ' num2str(T60(2)) ' ' num2str(T60(3)) ' ' ...
    num2str(T60(4)) ' ' num2str(T60(5)) ' ' num2str(T60(6)) ' ' num2str(T60(7))]);
disp('Прогнозні значення розбірливості мови, спотвореної реверберацією:')
% --- 1) обчислення словесної розбірливості по Покровському ---
    %if avtr == 1
        if bnd == 7
            W = razbor_pokr(Ek); % 7 смуг частот
        else
            W = razb1(Ek); % 5 смуг частот
        end
        disp(['W = ' num2str(W) '; Покровский; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
    %end
% --- 2) обчислення словесної розбірливості по Сапожкову ---
    %if avtr == 2
        if bnd == 7
            W = razb_sapoz_7(Ek); % 7 смуг частот
        else
            W = razb_sapoz_5(Ek); % 5 смуг частот
        end
        disp(['W = ' num2str(W) '; Сапожков; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
    %end
% --- 3) обчислення словесної разборч. по нашим коэфф.сприйняття ---
    %if avtr == 3
        if bnd == 7
            W = razb_we_short(Ek);
        else
            W = razb_we_5(Ek);
        end
        disp(['W = ' num2str(W) '; Наша версия; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
    %end
    %if avtr == 4
        if bnd == 7
            sti = razb_sti(Ek);

```

```

else
    sti = 0;
end
disp(['sti = ' num2str(sti) ' ; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])

```

Додаток 5.3

Програма розрахунку парціальних відношень сигнал-шум

```

function Ek = main_formant_simple_snr(r,p)
% === Назначение: прогноз парціальних відношень сигнал-шум ===
%
% ===== входные параметры: r, p =====
% r - дистанция от слушателя до диктора в метрах
% p - вид пространства (1-аудитор, 2-офис, 3-тих. улица, 4-шумн. улица)

% ===== выходные параметры: Ek =====
% Ek - парціальные відношення сигнал-шум
%
% --- подготовка к вычислениям ---
Dsk = [0.146 2.846 3.642 1 0.361 0.181 0.096]; % распред. дисперсій сигн.по 7
смурам
Dnk = [5.193 2.017 1.284 1 1.023 1.273 1.5471]; % распред. дисперсій шума по 7
смурам
Ls0 = 70; % уровень сигналу на расст. 1 м от рта
r0 = 1; % эталон. расстоян. 1 м
Lnm = [50 60 60 70]; % варианты уровня шума

% --- обчислення Ls ---
if p < 3
    Ls = Ls0+20*log10(r0/r);
else
    if r < 3
        Ls = Ls0+20*log10(r0/r);
    else
        Ls = Ls0+20*log10(r0/r)+10*log10(1+r^2/(r^2+9));
    end
end

% --- выбор уровня шума Ln ---
Ln = Lnm(p);

```

```
% --- отношение сигнал-шум SNR0 в заданной точке ---  
SNR0 = Ls - Ln;
```

```
% --- первичное отношение сигнал-шум SNR ---  
SNR = 10*log10(sum(Dsk)/sum(Dnk));
```

```
% --- парциальные відношення сигнал-шум Ek ---  
Ek = zeros(1,7);  
for k = 1:7  
    Ek(k) = 10*log10(Dsk(k)/Dnk(k)) + SNR0 - SNR;  
end
```

```
% відображення на моніторі значень Ek  
disp(['SNR(k) for noise = ' num2str(Ek)]);
```

Лабораторна робота №6

Вимірювання розбірливості мовлення, замаскованого шумом та реверберацією

Мета роботи: Здобуття навичок вимірювання розбірливості мовлення, замаскованого шумом та реверберацією.

Тривалість виконання роботи: 2 години.

Підготовка до роботи:

1. Ознайомитися із Методичними вказівками до даної Лабораторної роботи та із теоретичними засадами модуляційного та формантно-модуляційного методів оцінювання розбірливості мови (Додаток 6.1).
2. Ознайомитися із Додатком 6.2 (програми для вимірювання розбірливості мови, спотвореної шумом та реверберацією) та побудувати блок-схеми алгоритмів програм **gener_noise_like_speech_fmod.m** та **main_fmod_rasti_func_real.m**, наведених в Додатку 6.2.

Дана робота складається із 3-х етапів:

1. Комп'ютерне моделювання процедури вимірювання розбірливості мови, що маскується лише шумом. Мета цього етапу, що виконується із застосуванням програми **main_rapid_form_mod.m**, полягає в демонстрації справедливості рекомендації обирати мінімальну довжину тестового сигналу 16 с.
2. Генерування та запис на носій інформації тестового сигналу довжиною 16 с із застосуванням програми **gener_noise_like_speech_fmod.m**. Мета даного етапу полягає в підготовці до безпосереднього вимірювання розбірливості мови в приміщенні.
3. Безпосереднє вимірювання розбірливості мови в приміщенні швидким формантно-модуляційним методом за допомогою програми-функції

main_fmod_rasti_func_real.m. Мета даного етапу полягає в здобутті практичних навичок в такому різновиді акустичних вимірювань як вимірювання розбірливості мови в приміщеннях, де одночасно існують шум та реверберація.

4. Приклад кінцевих результатів виявлення тестового сигналу на тлі завад та результатів оцінювання розбірливості показано на Рис. 6.1.

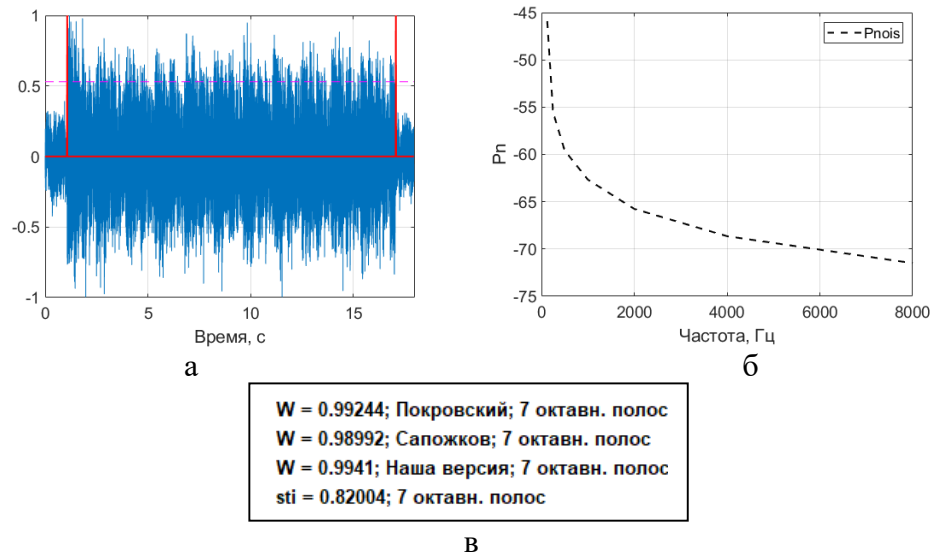


Рис. 6.1. Тестовий сигнал на тлі завади (а), спектр шумової завади (б) та оцінки розбірливості мови (в)

Робоче завдання:

1. Налаштувати програму **main_rapid_form_mod.m** із Додатку 6.2 (міститься у теці **Programs_Lab6_Zahyst**) для моделювання вимірювань розбірливості мови швидким формантно-модуляційним (ШФМ) методом за умов відсутності реверберації та обчислити розбірливість мови в діапазоні відношень сигнал-шум -26...20 дБ для 3-х значень $T=4$, 8 та 16 с довжини процесу, що аналізується. Порівняти отримані графіки із такими, що отримані в Лабораторній роботі №1, та зробити відповідні висновки.
2. Налаштувати програму **gener_noise_like_speech_fmod.m** із Додатку 6.2 (міститься у теці **Programs_Lab6_Zahyst**) та згенерувати тестовий сигнал довжиною 16 с. Записати тестовий сигнал на смартфон або на інший носій

інформації, з метою подальшого випромінення (бажано через акустичну колонку із прийнятними характеристиками та можливістю регулювати рівень вихідного сигналу; в крайньому випадку, випромінювання сигналу можна виконати за допомогою смартфона безпосередньо).

3. Налаштувати програму із Додатку 6.2 (міститься у теці **Programs_Lab6_Zahyst**) для *самостійного запису* тестового сигналу у приміщенні, в якому ви знаходитесь (аудиторія, кімната у вашій квартирі тощо).

Примітка 1. Рекомендовані значення параметрів: **live=1, Tn=1, Tmix=16**.

Примітка 2. Не рекомендується для запису використовувати мікрофон відеокамери, оскільки *програмне забезпечення відеокамери може змінювати в часі рівень сигналу, що записується*.

4. Виконати запис та обробку тестового сигналу у вашому приміщенні:

- запустити програму **main_fmod_rasti_func_real.m** та після 1...1,5-секундної паузи почати випромінення тестового сигналу на відстані не менше 1 метра від мікрофона;
- через $T=16$ секунд випромінення сигналу закінчиться, ще через кілька секунд закінчиться запис, й результат запису буде автоматично оброблено та записано на диск під ім'ям **test_fmod_rasti_1_16.wav**. Крім того, на моніторі відобразяться графіки записаного сигналу та його спектру, а в командному вікні Matlab відобразяться значення STI та словесної розбірливості W (3 варіанти обчислень - за Покровським, Сапожковим та кафедрою АМЕС). Потрібно занотувати отримані результати, а графіки зберегти для звіту.

Примітка 3. Якщо отримані за п.4 результати виявляться, на вашу думку, незадовільними (сигнал невірно знайдено, сигнал не помістився цілком в інтервал спостереження, сигнал занадто слабкий або занадто сильний на тлі фонового шуму), треба повторити запис та обробку до отримання задовільних результатів.

5. Налаштувати програму `main_fmod_rasti_func_real.m` для обробки вже записаного сигналу `test_fmod_rasti_1_16.wav`.

Примітка 4. Для цього достатньо задати: `live=0`, а потім, на запит програми, вказати ім'я записаного звукового файлу `test_fmod_rasti_1_16.wav`.

6. Порівняти результати *ваших* вимірювань розбірливості із такими, що отримані в Лабораторних роботах №2 та №4, й прокоментувати результати порівняння.
7. Отримані результати та блок-схеми алгоритмів програм `gener_noise_like_speech_fmod.m` та `main_fmod_rasti_func_real.m`, наведених в Додатку 6.2, занести у Звіт та прокоментувати у Звіті.
8. Захист Звіту зробити у час, призначений викладачем.

Контрольні запитання:

1. Яка мета даної роботи?
2. Чим відрізняються вимірювання розбірливості мови, спотвореної шумом та реверберацією від випадків, коли переважає шум або реверберація?
3. Як впливає довжина тестового сигналу на точність вимірювань? Якою є мінімальна рекомендована довжина сигналів при використанні ШФМ методу?
4. В чому переваги та недоліки ШФМ методу, порівняно із формантним методом?
5. Яким чином у ФМ методі враховується інформація про особливості мовного сигналу? Як ці особливості пов'язані із резонансними явищами мовного апарату?
6. Чому швидкий варіант ФМ методу потребує менше часу для вимірювань, ніж повний варіант ФМ методу?
7. Як та чому версія ШФМ методу, використана в даній роботі, відрізняється від «класичної» версії ШФМ методу?

8. Яким чином можна прийняти рішення про перевагу шумової завади над реверберацією?
9. Яким чином можна прийняти рішення про перевагу реверберації над шумовою завадою?
10. За яких умов можна вважати, що треба одночасно враховувати дію шуму та реверберації?
11. Як недоліки ви знайшли у використаних вами програмах?
12. Як можна виправити знайдені недоліки?

Швидка версія формантно-модуляційного методу оцінки розбірливості мови

1. Вступ

У працях [39, 40] було запропоновано новий інструментальний метод оцінювання розбірливості мовлення, названий "формантно-модуляційним", оскільки передбачалося, що він об'єднає кращі якості формантного і модуляційного методів. В результаті аналітичних і експериментальних досліджень було показано, що формантно-модуляційний (ФМ) метод працездатний і досить точний. У той же час цей метод недостатньо ефективний в тому сенсі, що для проведення вимірювань потрібно чимало часу - від двох до чотирьох хвилин. Це незручно, якщо вимірювання передбачається проводити в концертних залах, заповнених слухачами.

Вказаний недолік можна усунути, використовуючи тестові сигнали, аналогічні вживаним в методі RASTI.

2. ФМ-метод: повна версія

При використанні ФМ-методу [39, 40], артикуляційну розбірливість A оцінюють аналогічно тому, як це робиться в формантному методі:

$$A = \sum_{k=1}^K p_k \cdot P_k(E_k) . \quad (6.1)$$

де p_k - розподіл імовірностей формант по частотним смугам; $P_k(E_k)$ - коефіцієнти сприйняття мовлення; E_k - ефективний рівень сприйняття мовленнєвого сигналу в k -тій смузі частот Δf_k .

У повній версії ФМ-методу, як і в методі STI, застосовують тестовий сигнал у вигляді нестационарного випадкового процесу $x_i(t)$, дисперсія $D_{x_i}(t)$ котрого модульована за гармонічним законом із частотою модуляції F_i :

$$x_i(t) = \xi(t) \sqrt{f_i(t)} , \quad (6.2)$$

$$\overline{f_i(t)} = 1 + \cos 2\pi F_i t . \quad (6.3)$$

$$D_{xi}(t) = \langle x_i^2(t) \rangle - \langle x_i(t) \rangle^2 = D_\xi (1 + \cos 2\pi F_i t) , \quad (6.4)$$

де $\xi(t)$ - стаціонарний випадковий процес (СВП) с дисперсією D_ξ і спектром потужності, подібним до довготривалого спектру мовлення; $\langle \cdot \rangle$ - символ математичного сподівання.

Як і в методі STI, в повній версії ФМ-методу використовують дискретний набір з 14 частот модуляції ($F_i = 0,63, 0,8, 1, 1,25, 1,6, 2, 2,5, 3,15, 4, 5, 6,3, 8, 10, 12,5$ Гц), і оцінюють ефективний рівень сприйняття мовленнєвого сигналу у відповідності із виразами:

$$E_k = \overline{SNR_k} , \quad (6.5)$$

$$\overline{SNR_k} = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} SNR_{k,i} , \quad (6.6)$$

$$SNR_{k,i} = 10 \lg \frac{m_k(F_i)}{1 - m_k(F_i)} . \quad (6.7)$$

де $m_k(F_i)$ - коефіцієнт модуляції дисперсії $D_{y_{ik}}(t)$ сигналу $y_{ik}(t)$:

$$y_{ik}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{ek}(v) x_i(t-v) dv + n(t) , \quad (6.8)$$

$$h_{ek}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} h(v)h_{k0}(z-v)dv ,$$

$h(v)$ - імпульсна характеристика (ІХ) приміщення, а $h_{k0}(v)$ - ІХ смугового фільтра для k -тої смуги частот.

Завдяки гармонічному характеру модуляції дисперсії (6.4) тестового сигналу (6.2), доцільно оцінювати коефіцієнти модуляції $m_k(F_i)$ з використанням Фур'є-перетворення:

$$\tilde{m}_k(F_i) = \frac{2|A_{ik}(F_i)|}{|A_{ik}(0)|} , \quad (6.9)$$

$$A_{ik}(f) = \frac{1}{T} \int_0^T y_{ik}^2(t) e^{-j2\pi ft} dt , \quad (6.10)$$

де $||$ - символ модуля; T - тривалість тестового сигналу $x_i(t)$.

Можна показати, що прийнятна для інженерних застосувань точність вимірювань може бути досягнута при тривалості тестових сигналів (6.2), близьких до $T = 16...32$ s. Однак, для реалізації повного циклу вимірювань необхідно повторити випромінювання тестового сигналу 14 разів, кожен раз змінюючи частоту модуляції F_i . Звідси випливає, що в повній версії ФМ-методу, як і в методі STI, для реалізації повного циклу вимірювань потрібно не менше 2...4 хвилин. На перший погляд цей час здається цілком припустимим. Однак, якщо ставиться завдання акустичної експертизи концертних залів, що інтенсивно експлуатуються, такий час вимірювань може бути близьким до критичного значення або навіть неприйнятним. Особливо якщо вимірювання проводяться в залі, заповненій слухачами.

3. Прискорена версія ФМ-методу

В методі RASTI досягається 14-кратне скорочення часу вимірювань за рахунок застосування спеціального тестового сигналу:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) = \xi_1(t)\sqrt{f_1(t)} + \xi_2(t)\sqrt{f_2(t)}, \quad (6.11)$$

$$f_1(t) = 1 + 0,4(\sin 2\pi \frac{t}{T_1} + \sin 2\pi \frac{2t}{T_1} + \sin 2\pi \frac{4t}{T_1} + \sin 2\pi \frac{8t}{T_1}), \quad (6.12)$$

$$f_2(t) = 1 + 0,32(\sin 2\pi \frac{t}{T_2} + \sin 2\pi \frac{2t}{T_2} + \sin 2\pi \frac{4t}{T_2} + \sin 2\pi \frac{8t}{T_2} + \sin 2\pi \frac{16t}{T_2}), \quad (6.13)$$

де $\xi_1(t)$ і $\xi_2(t)$ є результати фільтрації рожевого шуму октавними фільтрами з центральними частотами 0,5 і 2 kHz, відповідно; $T_1 = 1$ с, $T_2 = 1,43$ с.

Очевидно, аналогічний прийом можна застосувати і при створенні прискореної версії ФМ-методу. У той же час, можна показати, що пряме запозичення цієї ідеї від методу RASTI не приводить до бажаних результатів.

Дійсно, при створенні прискореної версії ФМ-методу доцільно вимагати збігу, в середньому, результатів вимірювань з такими для повної версії ФМ-методу. Однак моделювання показує, що такого збігу практично неможливо досягти, використовуючи тільки дві смуги частот (замість семи смуг частот, що використовуються в повній версії ФМ-методу).

Для збігу результатів швидкого і повного варіантів ФМ-методу, вимірювання потрібно проводити у всіх смугах частот. При цьому з методу RASTI запозичується тільки ідея використання тестового сигналу у вигляді суми кількох гармонік.

При цьому можливі наступні варіанти реалізації прискореного ФМ-методу:

- у всіх семи смугах частот використовують тестовий сигнал (6.12) або (6.13);
- використовують обидва тестових сигнали (6.12) і (6.13), чергуючи їх в смугах частот за якимось правилом.

Найпростішим для реалізації виглядає перший варіант, з використанням тестового сигналу (6.13). При цьому охоплюються частоти модуляції від 0,7 Гц до 11,2 Гц, що практично збігається з діапазоном частот модуляції в методі STI.

На рис. 6.3 показані результати розрахунків для цього варіанту. Зіставляючи отримані результати з графіками рис. 6.1,б, бачимо, що результати обчислень дуже близькі. Однак є і особливості: 1) всі криві дещо відрізняються від нуля при малих відношеннях сигнал-шум; 2) для білого шуму оцінка словесної розбірливості виявляється завищеною приблизно на 2%.

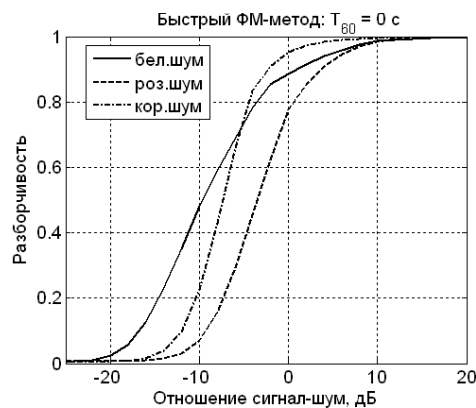


Рис. 6.3. Швидкий варіант ФМ-методу для $T = 16$ с

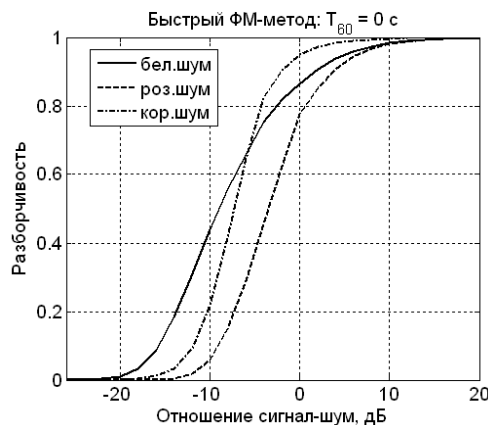


Рис. 6.4. Швидкий варіант ФМ-методу для $T = 32$ с

Із збільшенням часу аналізу з 16 с до 32 с близькість результатів швидкої і повної версій ФМ-методу виявляється цілком задовільною для інженерних застосувань (рис. 6.4).

Причина зниженої точності швидкого ФМ-методу досить очевидна. У швидкій версії ФМ-методу замість 14 модуляційних частот використовується всього 5. Це призводить до підвищення дисперсії оцінки відношення сигнал-шум і, як наслідок, до підвищення дисперсії оцінки розбірливості мовлення.

Підсумовуючи, зазначимо, що можливо істотно, в 14 разів, скоротити час вимірювань розбірливості мовлення при використанні ФМ-методу, що дозволяє говорити про існування швидкої версії ФМ-методу.

Результати моделювання свідчать, що швидка версія ФМ-методу поступається за точністю повної версії ФМ-методу. Так, при $T=16\text{ с}$ різниця сягала 2% у випадку білого шуму. У разі забарвлених шумів (рожевий і коричневий) різниця практично є непомітною, а при $T=32\text{ с}$ вона практично несуттєва й для білого шуму.

Програми вимірювання розбірливості мовлення, спотвореного шумом та реверберацією

```
% === main_rapid_form_mod.m === Быстрая версия формантно-модуляц.метода ===
%
% === Быстрая версия ФМ метода впервые описана в статье:
% Prodeus A. Rapid Version of Formant-Modulation Method of Speech
% Intelligibility Estimation. - Proceedings of the VII International
% Conference MEMSTECH 2011. - Lviv, Polyana, 2011. - Pp.61-63.
%
% === Задача: оцінка словесної розбірливості с учетом шума и реверберациі
% --- План решения этой задачи: ---
% --- Часть 1: подготовка к вычислениям
% --- 1) задание параметров (SNR0,T,Fs,color_sig,color_noise,Fmodr,h) ---
% --- 2) обчислення коэф-тов гребенки фільтрів ---
% --- Часть 2: Формування тестового и принятого сигнала ---
% --- 3) Формування тестового сигнала (окрашеность + модуляция) ---
% --- Часть 3: Формування шума
% --- 4) первичное Формування шума (окрашенность) ---
% --- 5) Формування принятого сигнала ---
% --- Часть 4: оцінювання розбірливості мовлення формантно-модуляционн.методом ---
% --- 6) обчислення парціальних відношень сигнал-шум модуляц. методом ---
% --- 7) обчислення словесної разборч. по нашим коэфф.сприйняття ---
% --- Часть 5: построение графиков ---
% --- 8) запись результатов на диск
% --- 9) построение графиков W=W(SNR) ---

clear; clc;
% --- Часть 1: подготовка к вычислениям
% --- 1) задание параметров (SNR0,T,Fs,color_sig,color_noise,Fmodr,h) ---
% SNR0 - требуемое интегральное отношение сигнал-шум
SNR0min = -26; SNR0max = 20; SNR0step = 2; % интервал интегр.отнош.сигнал-шум
SNR0num = (SNR0max-SNR0min)/SNR0step + 1; % количество интегр.отнош.сигн.-шум
T = 4; % длительность тестового сигнала, секунды
Fs = 22050; % частота дискретизации, Гц
color_sig_db = [60 70 68 59.5 52 46 40.5]; % долговрем. спектр речи в дБ
color_sig = 10.^(0.05*color_sig_db); % в разях по напряжению
color_sig = color_sig/max(color_sig); % в разях по напряж. нормир.
```

```
color_noise = [1 1 1 1 1 1 1; 2*sqrt(2) 2 sqrt(2) 1 1/sqrt(2) 1/2 1/2/sqrt(2); ...  
8 4 2 1 1/2 1/4 1/8]; % бел.шум: color =1; роз.шум: =2; кор.шум: =3
```

```
% --- Fmodr - модуляц. частоты для быстрого формантно-модуляц. метода ---  
Fmodr=0.6993; % в данной программе використовується базовая частота 0.6993 Гц
```

```
% --- ІХ для моделі р. ревербер. завади ---  
% h=audioread('h_209.wav'); % случай учета влияния реверберации  
h=zeros(1024,1); % случай отсутствия реверберации  
h(1)=1; % случай отсутствия реверберации  
len_h = length(h); % длина ІХ
```

```
% --- 2) обчислення коэф-тов гребенки фільтрів ---  
load fltrbnk7_struct;  
a = fltrbnk7_struct.a;  
len_a = fltrbnk7_struct.len_a;
```

```
tic % начало работы счетчика времени  
% --- Часть 2: Формування тестового и принятого сигнала ---  
% --- 3) Формування тестового сигнала (окрашенность + модуляция) ---  
N = T*Fs+len_a+len_h; % длина генерируемых сигнала и завади  
x = randn(N,1); % генерируем белый шум (столбец)  
xband = filter_band_7_func(x,a,color_sig); % фільтрація гребінкою  
xband(1:len_a,:)=[]; % отбрасываем выборки, неправильные из-за фильтрации  
t(:,1) = (0:(length(xband(:,1))-1))/Fs; % вектор-столбец - моменты времени
```

```
Wfmm=zeros(SNR0num,3);  
for color = 1:3 % перебор окрашенностей шума  
m_matrix2 = zeros(5,7); % matr. коэф-тов мод-ции (5 частот мод-ции, 7 смуг)  
color_n = color_noise(color,:);  
disp('color = '); disp(num2str(color));
```

```
% --- Часть 3: Формування шума  
% --- 4) первичное Формування шума (окрашенность) ---  
n = randn(N,1); % генерируем белый шум (столбец)  
nband = filter_band_7_func(n,a,color_n); % фільтрація гребінкою  
nband(1:len_a,:)=[]; % отбрасываем выборки, неправильные из-за фильтрации  
for SNR0 = SNR0min:SNR0step:SNR0max % перебор значений SNR0  
isnr0 = (SNR0-SNR0min)/SNR0step + 1; % номер строки матрицы розбірливості W  
pnoise = sum(var(nband)); % дисперсія шума во всей смуге
```

% === генерируем модулирующую функцию ===

modf2=zeros(length(t),1);

for i=1:5

modf2=modf2+sin(2^(i-1)*2*pi*Fmodr*t);

end

modfunc2 = sqrt(1+0.32*modf2);

% === модулируем сигналы в смугах ===

xbandmod=zeros(length(t),7);

for k=1:7

xbandmod(:,k) = xband(:,k).*modfunc2;

end

% --- 5) Формування прийнятого сигналу ---

ybandmod = fftfilt(h,xbandmod); %свертка с ИХ приміщення

psig = sum(var(ybandmod)); % дисперсія сигналу во всей смуге

SNR = 10*log10(psig/pnoise); % сигнал-шум имеющееся

k0 = 10^(0.05*(SNR0-SNR)); % корректирующ.коэфф. для сигналу

ybandmod = ybandmod*k0; % коррекция потужності сигналу

%par_snr = 10*log10(var(ybandmod)./var(nband));% парціальн.отнош.сигнал-шум

yband = ybandmod + nband; % смесь сигналу с шумом в точке приема

yband(1:len_h,:)=[]; % отбрас.выборки, неправильные из-за свертки

% --- Часть 4: оцінювання розбірливості мовлення формантно-модуляцион.методом ---

% 6) обчислення парціальних відношень сигнал-шум модуляц. методом---

yband=yband.^2; % квадрат принятого сигналу

nfft2 = floor(length(yband)/floor(Fs/Fmodr))*floor(Fs/Fmodr);

for k=1:7

spectr_yband2 = abs(fft(yband(:,k),nfft2));

spectr_yband2 = spectr_yband2/max(spectr_yband2); % нормир.по макс.спектра

for i=1:5 % матрица коефіцієнтів модуляции

m_matrix2(i,k)=6.25*spectr_yband2(2^(i-1)*round(Fmodr/Fs*nfft2)+1);

end

end

% Корегування максимальных значений коэф.модуляции

for k=1:7

for i=1:5

if m_matrix2(i,k)>0.9999

m_matrix2(i,k) = 0.9999;

end

end % конец корректировки макс.значений коэф.модуляции

end

```

    snr2 = m_matrix2./(1-m_matrix2); % матрица отнош.с.-шум в разях по мощн.
    Ek = mean(10*log10(snr2));
    %snr2 = mean(m_matrix2)./(1-mean(m_matrix2)); % матрица отнош.с.-шум в разях по
мощн.
    %Ek = 10*log10(snr2);
    % 7) обчислення словесної разборч. по нашим коэфф.сприйняття ---
    Wfmm(isnr0,color) = razb_we_short(Ek);
end % конец цикла по SNR0
end % конец цикла по color

% --- Часть 5: построение графиков ---
% --- 8) запись результатов на диск ---
Wfmmrap_struct =
struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',Wfmm);
save Wfmmrap_struct Wfmmrap_struct;
% --- 9) построение графиков W=W(SNR)---
load Wfmmrap_struct;
xmin_fmm = Wfmmrap_struct.SNR0min;
xmax_fmm = Wfmmrap_struct.SNR0max;
xstep_fmm = Wfmmrap_struct.SNR0step;
x_fmm = xmin_fmm:xstep_fmm:xmax_fmm;
y_fmm = Wfmmrap_struct.func;
%figure; plot(x_fmm,y_fmm(:,1),'-k'); % только случай білого шума
figure; plot(x_fmm,y_fmm(:,1),'-k',x_fmm,y_fmm(:,2),'--k',x_fmm,y_fmm(:,3),'-.k','LineWidth',2);
grid on;
xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ');ylabel('Разборчивость');
title('Быстрый ФМ-метод: T_6_0 = 0 с');
legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум');
%legend('бел.шум');
toc % конец работы счетчика времени

% === gener_noise_like_speech_fmod.m ===
% Генерирование стац. шума с долговременным спектром речи, дисперсія шума
% изменяется во времени по закону метода RASTI
%
% T - длительность, секунды
% Fs - частота дискретизации, Гц
%
% === Вычисления: ===
clear; clc;
T = 4; % длительность сгенерированного тестового сигнала, секунды

```

```

Fs = 22050; % частота дискретизации, Гц
df = [90 175 355 690 1400 2800 5270]; % октавн. смуги частот
f0 = [125 250 500 1000 2000 4000 8000]; % центр. частоты октавных фильтров
color_sig_db = [60 70 68 59.5 52 46 40.5]; % спектр речи в дБ
color_sig = 10.^(0.05*color_sig_db); % в разгах по напряжению
color_sig = color_sig/max(color_sig); % в разгах по напряж. нормир.

% --- считывание коэф-тов гребенки фильтров ---
load fltrbnk7_struct;
a = fltrbnk7_struct.a;
len_a = fltrbnk7_struct.len_a;

% --- фільтрація білого шуму гребінкою октавних фільтрів
N = T*Fs+len_a;
x = randn(N,1); % генерируем белый шум (столбец)
xband = filter_band_7_func(x,a,color_sig); % фільтрація гребінкою
xband(1:len_a,:)=[]; % отбрасываем неправильные выборки

% === генерируем модулирующую функцию ===
% --- Fmodr - модуляц. частоты для быстрого формантно-модуляц. метода ---
Fmodr=0.6993; % використовується базовая частота 0.6993 Гц
t(:,1) = (0:(length(xband(:,1))-1))/Fs; % вектор-столбец - моменты времени
modf2=zeros(length(t),1);
for i=1:5
    modf2=modf2+sin(2^(i-1)*2*pi*Fmodr*t);
end
modfunc2 = sqrt(1+0.32*modf2);
% === модулируем сигналы в смугах ===
xbandmod=zeros(length(t),7);
for k=1:7
    xbandmod(:,k) = xband(:,k).*modfunc2;
end

% --- суммирование процессов с выходов фильтров
x = sum(xbandmod,2);

% --- нормирование перед записью на диск
x = x/max(abs(x));

% --- запись на диск
filename = input('Вкажіть ім"я файлу запису (без лапок): ', 's');

```

```
audiowrite(filename,x,Fs);
```

```
% --- контроль результату
```

```
figure % графік сигналу
```

```
t = 0:1/Fs:(length(x)-1)/Fs;
```

```
plot(t,x); xlabel('Время, с'); ylabel('Уровень');
```

```
title('Шум со спектром речи'); grid on;
```

```
figure % графік спектра
```

```
Px = 10*log10(var(xband)./df);
```

```
plot(f0,Px); xlabel('Частота, Гц'); ylabel('Px, dB');
```

```
title('Спектр потужності'); grid on;
```

```
function W = main_fmmod_rasti_func_real(live,Tn1,Tmix,bnd)
```

```
% Реальное измерение розбірливості мовлення формантно-модуляц. методом
```

```
% для авторов (Покровский: avtr=1;Сапожков:avtr=2;мы:avtr=3;STI:avtr=4)
```

```
% ===== входные параметры: =====
```

```
% обработка живого сигнала: live = 1; обработка записи сигнала: live = 0;
```

```
% Tn1, Tmix - длит-сти завади1, смеси (сек)
```

```
% ПРИМЕР: Tn1 = 1; Tmix = 4;
```

```
% bnd - кол-во октавных смуг частот: 5 смуг: bnd=5; 7 смуг: bnd=7
```

```
% W - словесная разборчивость
```

```
%
```

```
% --- План обчислень: ---
```

```
% --- Часть 1: подготовка к вычислениям
```

```
% --- 1) задание внутренних параметров
```

```
% --- 2) считывание коэф-тов гребенки фільтрів ---
```

```
% --- 3) подготовка к записи - створення аудиообъекта
```

```
% --- 4) запись или прочитання с диска
```

```
% --- Часть 2: Формування ділянок смеси, рев-ции и завади ---
```

```
% --- 1) оцінка дисперсии завади и обчислення порога  $\Pi = 5 \cdot \sigma$ 
```

```
% --- 2) обчислення момента начала смеси
```

```
% --- 3) фільтрація записи
```

```
% --- 4) Формування массивов смеси, рев-ции и завади
```

```
% --- 5) контроль правильности расстановки границ ділянок записи
```

```
% --- Часть 3: измерение  $E_k$ 
```

```
% --- Часть 4: оцінювання розбірливості мовлення формантным методом ---
```

```
% --- 1) обчислення словесної розбірливості по Покровському ---
```

```
% --- 2) обчислення словесної розбірливості по Сапожкову ---
```

```
% --- 3) обчислення словесної разборч. по нашим коэфф.сприйняття ---
```

```
%
```

```

% === Вычисления: ===
% --- Часть 1: подготовка к вычислениям
% --- 1) задание внутренних параметров
Fs = 22050;          % частота дискретизации, Гц
df = [90 175 355 690 1400 2800 5270]; % октавн. смуги частот
f0 = [125 250 500 1000 2000 4000 8000]; % центр. частоты октавных фильтров
df5 = [175 355 690 1400 2800];      % 5 октавн. смуг частот
f05 = [250 500 1000 2000 4000]; % центр. частоты 5 октавных фильтров
Fmodr=0.6993; % базовая модуляционная частота 0.6993 Гц
T = (Tn1+1)+Tmix+1; % длительность записи в секундах

% --- 2) считывание коэф-тов гребенки фильтров ---
load fltrbnk7_struct;
a = fltrbnk7_struct.a;
%len_a = fltrbnk7_struct.len_a;

% --- 4) запись или прочитання с диска
if live == 1
    disp('Нажмите любую клавишу для начала записи');
    pause;
    recorder = audiorecorder(22050,16,1); % подготовка к записи
    record(recorder,T);
    pause(T);
    disp('Нажмите любую клавишу для обработки');
    x = getaudiodata(recorder,'double');
    x(1:Fs) = []; % откусываем 1 сек переходного процесса
    x = x-mean(x); % центрирование записи
    x = x/max(abs(x)); % нормировка записи по максимуму
    audiowrite(['test_fmod_rasti_' num2str(Tn1) '_' num2str(Tmix) ...
        '.wav'],x,Fs);
else
    filename = input('Вкажіть ім'я файлу запису (без лапок): ', 's');
    [x,Fs] = audioread(filename);
end

% --- Часть 2: Формування ділянок смеси, рев-ции и завади ---
% --- 1) оцінка дисперсии завади и обчислення порога  $\Pi = 5 \cdot \sigma$ 
n1fin = Tn1*Fs; % конец ділянки начальной завади
n1 = x(1:n1fin); % начальная помеха
n1_std = std(n1); % станд. отклонение завади
thresh = 5*n1_std; % порог для обнаружения начала смеси

```

```

% --- 2) обчислення моменту початку суміші
s_begin = find(sign(x-thresh)+1,1); % номер першої вибірки суміші

% --- 3) фільтрація запису
xband7 = filter_band_7_func(x,a,[1 1 1 1 1 1 1]); % фільтрація гребінкою

% --- 4) Формування масивів суміші, реверсу та завади
s_end = s_begin + Tmix*Fs; % номер останньої вибірки суміші
yband = xband7(s_begin:s_end,:); % суміш
n7 = xband7(1:(s_begin-1),:); % завада

% --- 5) контроль правильності встановлення меж ділянок запису
figure % new figure
t = 0:1/Fs:(length(x)-1)/Fs;
y = zeros(length(x),1); y(s_begin) = 1; y(s_end) = 1;
thr = zeros(length(x),1); thr(:,1) = thresh;
plot(t,x); hold on; plot(t,y,'r'); plot(t,thr,'-m');
xlabel('Время, c'); grid on;

% --- Часть 4: оцінювання розбірливості мовлення формантно-модуляційним методом ---
% 6) обчислення парціальних відношень сигнал-шум модуляційним методом ---
m_matrix2 = zeros(5,7); % матр.коэфф-тов мод-ції (5 частот мод-ції, 7 смуг)
yband=yband.^2; % квадрат прийнятого сигналу
nfft2 = floor(length(yband)/floor(Fs/Fmodr))*floor(Fs/Fmodr);
for k=1:7
    spectr_yband2 = abs(fft(yband(:,k),nfft2));
    spectr_yband2 = spectr_yband2/max(spectr_yband2); % нормир.по макс.спектра
    for i=1:5 % матриця коефіцієнтів модуляції
        m_matrix2(i,k)=6.25*spectr_yband2(2^(i-1)*round(Fmodr/Fs*nfft2)+1);
    end
end
% Корегування максимальних значень коеф.модуляції
for k=1:7
    for i=1:5
        if m_matrix2(i,k)>0.9999
            m_matrix2(i,k) = 0.9999;
        end
    end % кінець корекції макс.значень коеф.модуляції
end
snr2 = m_matrix2./(1-m_matrix2); % матриця отнош.с.-шум в разях по мощн.

```

```

Ek = mean(10*log10(snr2)); % вектор оценок парціальних відношень сигнал-шум
if bnd == 5
    Ek = Ek(2:6);
end

% --- 6) контроль: інтегрального SNR, спектра завади
if bnd == 7
    Pn = 10*log10(var(n7)./df);
else
    n5 = n7(:,2:6);
    Pn = 10*log10(var(n5)./df5);
end
figure; % графики спектров, значение SNR
if bnd == 7
    plot(f0,Pn,'--k'); legend('Pnois');
else
    plot(f05,Pn,'--k'); legend('Pnois');
end
xlabel('Частота, Гц'); ylabel('Pn');

% --- Часть 4: оцінювання розбірливості мовлення формантним методом ---
% --- 1) обчислення словесної розбірливості по Покровському ---
%if avtr == 1
    if bnd == 7
        W = razbor_pokr(Ek); % 7 смуг частот
    else
        W = razb1(Ek); % 5 смуг частот
    end
    disp(['W = ' num2str(W) '; Покровский; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
% end
% --- 2) обчислення словесної розбірливості по Сапожкову ---
%if avtr == 2
    if bnd == 7
        W = razb_sapoz_7(Ek); % 7 смуг частот
    else
        W = razb_sapoz_5(Ek); % 5 смуг частот
    end
    disp(['W = ' num2str(W) '; Сапожков; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
%end
% --- 3) обчислення словесної разборч. по нашим коэфф.сприйняття ---
%if avtr == 3

```

```
if bnd == 7
    W = razb_we_short(Ek);
else
    W = razb_we_5(Ek);
end
disp(['W = ' num2str(W) '; Наша версия; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
%end
%if avtr == 3
    if bnd == 7
        sti = razb_sti(Ek);
    else
        sti = 0;
    end
    disp(['sti = ' num2str(sti) '; ' num2str(bnd) ' октавн. смуг'])
%end
```

Література

1. Collard J.A. Theoretical Study of the Articulation and Intelligibility of a Telephone Circuit // Electrical Communication. – 1929. -- Vol.7. – P. 168.
2. Steeneken, H.J.M., and Houtgast, T. "A physical method for measuring speech-transmission quality" J.Acoust. Soc. Am. 67, 1980. - P. 318-326.
3. Kryter, K.D., and Ball, J.H. "SCIM -- A meter for measuring the performance of speech communicationsystems" Techn. Doc. report No. ESD-TDR-64-674, 1964.
4. K. Rhebergen, "A Speech Intelligibility Index-based approach to predict the speech reception threshold for sentences in fluctuating noise for normal-hearing listeners," J. Acoust. Soc. Am. 117 (4), Pt. 1, April 2005, p.2181-2192.
5. Покровский Н.Б. Расчет и измерение разборчивости речи. – М., Связьиздат, 1962, 390с.
6. Сапожков М.А. Речевой сигнал в кибернетике и связи. – М.: Зв'язокіздат, 1963. – 472 с.
7. Быков Ю.С. Теория разборчивости речи и повышение эффективности радиотелефонной зв'язи. – М.-Л.: Госенергоиздат, 1959. – 350 с.
8. Алдошина И., Приттс Р. Музыкальная акустика. – С-Пб.: Композитор, Санкт-Петербург, 2006. - 717 с.
9. Продеус А.Н., Дронжевская Л.Б., Климков В.А., Шагитова Д.А. Формантный и формантно-модуляционный методы оценки разборчивости речи. Часть 2. Точность и скорость измерений. // Электроника и связь. – 2011. – Т. 64. – №6. – С. 16–24.
10. Железняк В.К., Макаров Ю.К., Хорев А.А. Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации//Специальная техника. – М.: 2000.– № 4.

- 11.Продеус А.Н., Гавриленко А.В., Дидковский В.С. Сопоставление версий формантного метода оценки разборчивости речи. - Электроника и связь, тематический выпуск "Проблемы электроники", ч.1, 2008. С.227-231.
- 12.Дидковский В.С., Дидковская М.В., Продеус А.Н. Акустическая экспертиза каналов речевой коммуникации. Монография. – К., «Имекс-ЛТД», 2008. – 420 с.
- 13.ДСН 3.3.6.037-99 Державні санітарні норми. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку, Київ, 1999.
- 14.A. Prodeus, K. Bukhta, P. Morozko, O. Serhiienko, I. Kotvytskyi, O. Dvornyk, "Automated Subjective Assessment of Speech Intelligibility in Various Listening Modes," ISSN 2523-4447. Microsystems, Electronics and Acoustics, 2018, vol. 23, no. 3, pp.49-57. DOI: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.3.130367>
- 15.Harasiuk, A. O., Myronov, M. V., Lozinsky, V. V., Thanh Vy, N., Darchuk, A. V., & Prodeus, A. M. (2019). Predictive Estimation of Speech Intelligibility Masked by Noise Interference Using Analytical Modeling. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, 24(5), 48–55. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2019.24.5.192893>
- 16.Prodeus A., Didkovska M. "Some Aspects of Speech Intelligibility Measuring Under Noise Dominance," European Journal of Advances in Engineering and Technology, 2020, 7(2), pp. 7-12. ISSN: 2394-658X
- 17.Steeneken, H.J.M., and Houtgast, T. "A physical method for measuring speech-transmission quality" J.Acoust. Soc. Am. 67, 1980. - P. 318-326.
- 18.T. Houtgast, · H.J.M. Steeneken, · S.J. van Wijngaarden, Past, present and future of the Speech Transmission Index. Soesterberg, TNO Technische Menskunde, 2002, 159 p.
- 19.Ecophon Acoustic Calculator (<https://www.ecophon.com/en/e-tools/ecophon-acoustic-calculator/>)

- 20.E. Nilsson, and E. Arvidsson, "An Energy Model for the Calculation of Room Acoustic Parameters in Rectangular Rooms with Absorbent Ceilings," *Applied Sciences*, 2021, 11, 6607. <https://doi.org/10.3390/app11146607>
- 21.Prodeus A. On Possibility of Advantages Join of Formant and Modulation Methods of Speech Intelligibility Evaluation. - Proceedings of the VI International Conference MEMSTECH 2010. - Lviv, Polyana, 2010. - Pp.254-259.
- 22.А. Продеус, М. Дідковська, О. Дворник, Д. Моторнюк. Апаратно-програмний комплекс «Штучна голова». Частина 1. Коригування частотної характеристики тракту. Мікросистеми, електроніка та акустика, 2020 (передано до друку).
- 23.J. Blauert Ed., The technology of binaural listening. Springer, Berlin–Heidelberg–New York, 2013.
- 24.HMS II.3 Artificial Head Measurement System with Ear Simulator and Artificial Mouth, Data Sheet, HEAD Acoustics GmbH, 2015.
- 25.P. Sørensgaard and P. Majdak. The auditory modeling toolbox. In J. Blauert, editor, The technology of binaural listening, chapter 2. Springer, Berlin-Heidelberg-New York NY, 2013.
- 26.M. Jeub, M. Schafer, P. Vary, "A binaural room impulse response database for the evaluation of dereverberation algorithms," Proc. of 2009 16th International Conference on Digital Signal Processing, 5-7 July 2009, Santorini-Hellas, Greece. DOI: 10.1109/ICDSP.2009.5201259.
- 27.Aachen Impulse Response Database. Available on-line: <https://www.iks.rwth-aachen.de/en/research/tools-downloads/databases/aachen-impulse-response-database/>
- 28.Ю.С. Костючок, Л.С. Мартинович, Д.Е. Моторнюк, В.А. Нечитайло, А.В. Храпачевский, А.Н. Продеус. Акустическая паспортизация учебных помещений. - ISSN 1811-4512. Electronics and Communications, 2016, Vol.21, No.2(91). – P.63-70.

- 29.G. Soulodre, N. Popplewell, and J. Bradley, “Combined effects of early reflections and background noise on speech intelligibility,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 135, No.1, pp. 123-133, 1989.
- 30.Sound Forge Audio Studio. Available on-line: <https://www.magix.com/ru/muzyka/sound-forge/sound-forge-audio-studio/>
- 31.E. Habets, N. Gaubitch, and P. Naylor, “Temporal selective dereverberation of noisy speech using one microphone,” *Proc. of 2008 IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pp. 4577-4580, March-April 2008.
- 32.J. Bradley, H. Sato, and M. Picard, “On the importance of early reflections for speech in rooms,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 113, no. 6, pp. 3233-3244, June 2003. DOI: 10.1121/1.1570439.
- 33.I. Arweiler, J. Buchholz, and T. Dau, “Speech intelligibility enhancement by early reflections,” *Proc. of 2nd Int. Symposium on Auditory and Audiological Research (ISAAR 2009)*, Elsinore, Denmark, August 2009. ISBN: 87-990013-2-2
- 34.H. Sato and J. Bradley, “Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms,” *J. Acoust. Soc. Am.* 106 (4), Pt. 1, pp. 2064–2077, 2004. DOI: 10.1121/1.2839283.
- 35.A. Prodeus, V. Didkovskyi, M. Didkovska, I. Kotvytskyi, and D. Motorniuk, “Automated Subjective Assessment of Speech Intelligibility under Diotic and Dichotic Listening,” in “*Data-Centric Business and Applications*,” Springer, 2019.
- 36.Тихонов А. Н. О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения. *ДАН СССР*, 1965, т. 163, № 3, с. 591—594.
- 37.H.J.M. Steeneken, and T. Houtgast, “A physical method for measuring speech-transmission quality,” *J. Acoust. Soc. Am.* - 1980. - Vol. 67. – P. 318-326.
- 38.H.J.M. Steeneken, and T. Houtgast, “Validation of the revised STIr method,” *Elsevier Speech Communication*. – 2002. - Vol. 38. – P. 26-37.
- 39.А.Н. Продеус, Л.Б. Дронжевская, В.А. Климов, Д.А. Шагитова, «Формантный и формантно-модуляционный методы оценки розбірливості

- мовлення. Часть 1. Унификация алгоритмов», Электроника и зв'язок, 2010, №6, часть 2. - С.117- 124.
- 40.А.Н. Продеус, Л.Б. Дронжевская, В.А. Климков, Д.А. Шагитова, «Формантный и формантно-модуляционный методы оценки розбірливості мовлення. Часть 2. Точность и скорость вимірювань», Электроника и зв'язок. – 2011. – Т. 64. – №6. – С. 16–24.
- 41.M.R. Schroeder, "Modulation Transfer Functions: Definition and Measurement," Acustica, Vol. 49, 1981, p. 179-182.
- 42.Продеус А., Дидковский В., Дидковская М. Акустическая экспертиза и коррекция коммуникационных каналів. Монография. LAP LAMBERT Academic Publishing, OmniScriptum GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Deutschland, 2017, ISBN: 978-3-330-04591-0.
- 43.В.Е. Гантмахер, Н.Е. Быстров, Д.В.Чеботарев. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. - СПб.: Наука и Техника, 2005. - 400 с.
- 44.M.R. Schroeder, "New Metod of Measuring Reverberation Time," The Journal of the Acoustical Society of America 37, 1187 (1965); <https://doi.org/10.1121/1.1939454>.
- 45.Zolzer U. DAFX: Digital Acoustic Effects. - John Wiley & Sons, 2011. – 614 p.
- 46.Ecophon Acoustic Calculator (<https://www.ecophon.com/en/e-tools/ecophon-acoustic-calculator/>)
- 47.E. Nilsson, and E. Arvidsson, "An Energy Model for the Calculation of Room Acoustic Parameters in Rectangular Rooms with Absorbent Ceilings," Applied Sciences, 2021, 11, 6607. <https://doi.org/10.3390/app11146607>
- 48.Prodeus A. On Possibility of Advantages Join of Formant and Modulation Methods of Speech Intelligibility Evaluation. - Proceedings of the VI International Conference MEMSTECH 2010. - Lviv, Polyana, 2010. - Pp.254-259.

49. Prodeus A. Rapid Version of Formant-Modulation Method of Speech Intelligibility Estimation. - Proceedings of the VII International Conference MEMSTECH 2011. - Lviv, Polyana, 2011. - Pp.61-63.
50. Продеус А.Н. О некоторых особенностях развития объективных методов измерений разборчивости речи. // Электроника и связь, тематич. выпуск "Электроника и нанотехнологии". - 2010. - №2. - С. 217-223.
51. Prodeus A. Formant-Modulation Method of Speech Intelligibility Evaluation: Measuring and Exactness. // Proceedings of the VII International Conference MEMSTECH 2011. - Lviv, Polyana, 2011.
52. Steeneken H. J. M., Houtgast T. RASTI: A Tool for Evaluating Auditoria. (<http://www.bksv.com/doc/technicalreview1985-3.pdf>)