

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

О. В. Богданов

# Акустичне обладнання студій та приміщень

Розрахунково-графічна робота

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра  
за сертифікатною програмою “Аудіо-продюсування”  
спеціальності 171 Електроніка

Електронне мережне навчальне видання

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2022

Рецензент

Сенченко І. В., к.ф.-м.н. директор  
ТОВ «Фонтек-С»

Відповідальний редактор Найда С. А., проф. д.т.н.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 5 від 26.05.2022 р.)  
за поданням Вченою ради факультету електроніки  
(протокол № 4/22 від 25.04.2022 р.)*

Навчальний посібник містить короткі теоретичні відомості щодо проведення розрахунків об'єктивних характеристик приміщення. Розрахунково-графічна робота розбита на два розділи: в першому розділі перевіряються навички студента проводити розрахунки за заданими первинними параметрами; в другому розділі оцінюється здатність студента самостійно пропонувати рішення технічне завдання на проектування систем озвучення та звукопідсилення та провести необхідні розрахунки максимально в наближеному до реальних умовах.

Реєстр. № НП 21/22-499. Обсяг 0,82 авт. арк.  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© О. В. Богданов

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

# Зміст

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>Вступ</b>                    | <b>4</b>  |
| <b>Перший розділ</b>            | <b>5</b>  |
| <b>Другий розділ</b>            | <b>14</b> |
| <b>Рекомендована література</b> | <b>16</b> |

# Вступ

Метою виконання РГР є засвоєння навиків розрахунку основних акустичних властивостей приміщення для слухачів із урахуванням їх (слухачів) розташування відносно джерела звуку. В роботі має бути розрахована система звукопідсилення або озвучення для обраного студентом приміщення. Окрім чисельних результатів, студент має надати пропозиції по реальному комплектуванню даного комплексу з застосуваннях присутнього на ринку обладнання.

Розрахунково-графічна робота складається з двох розділів:

- перший розділ - мета якого закріпити навички проведення розрахунків основних об'єктивних параметрів акустичного поля приміщення;
- другий розділ - метою є показати здатність самостійно вирішувати питання синтезу тракту звукопідсилення чи озвучення для певного приміщення, показати обізнаність з сучасним ринком електроакустичного обладнання і вміння обґрунтовувати власне рішення.

Розрахунки по першому розділу виконуються студентом самостійно. Результати розрахунків заносяться у відповідну Google Форму.

Результати виконання другого розділу роботи мають оформлятися з максимальним дотриманням вимог ДСТУ 3008:2015.

Час та форма звітування визначається відповідним силабусом.

## Перший розділ

Для проведення розрахунків в межах формального блоку необхідно використовувати наступні вирази:

Сумарний рівень акустичного поля в приміщенні

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \frac{I + I_B}{I_0} = 10 \lg \left( \frac{I_B}{I_0} \left( \frac{I}{I_B} + 1 \right) \right) = L_B + 10 \lg \left( 1 + \frac{1}{N} \right)$$

де індекс В позначає дифузну складову акустичного поля. Слід пам'ятати, що  $\frac{1}{N} = \left( \frac{r_h}{r} \right)^2$

Акустичне відношення

$$N = \frac{\epsilon_B}{\epsilon} = \frac{16\pi r^2 (1-\alpha)}{\alpha S D_B^2 \Omega_B D_{\text{пр}}^2 \Omega_{\text{пр}}}$$

Час еквівалентної реверберації

$$T_e \approx \frac{1}{\frac{1}{T} + \frac{\Delta}{12}}$$

Коефіцієнт чіткості

$$D = 1 - e^{-\frac{0,69}{T}}$$

Індекси чіткості та статистичної чіткості

$$C_{50} = 10 \lg \left( e^{\frac{0,69}{T}} - 1 \right)_{\text{та}} C_{50\text{стат}} = 10 \lg \left( e^{\frac{0,69}{T_{\text{екв}}}} - 1 + \left[ \frac{r_h}{r} \right]^2 e^{\frac{0,69}{T_{\text{екв}}}} \right)$$

Індекси прозорості та статистичної прозорості

$$C_{80} = 10 \lg \left( e^{\frac{1,104}{T}} - 1 \right)_{\text{та}} C_{80\text{стат}} = 10 \lg \left( e^{\frac{1,104}{T_{\text{екв}}}} - 1 + \left[ \frac{r_h}{r} \right]^2 e^{\frac{1,104}{T_{\text{екв}}}} \right)$$

Артикуляція

складова артикуляція розраховується відповідно до виразу (за умови  $k_{\text{нч}} = k_{\text{вч}} = 1$ )

$$A, \% = 96\% \cdot \sqrt[5]{D} \cdot k_m,$$

де  $k_m$  - коефіцієнт маскування. Враховуючи наявний в приміщенні шумовий фон, можна користуватися номограмами, для знаходження складової артикуляції (рис. 1). Перерахунок артикуляцій різних типів виконується за рис. 2 та рис. 3.

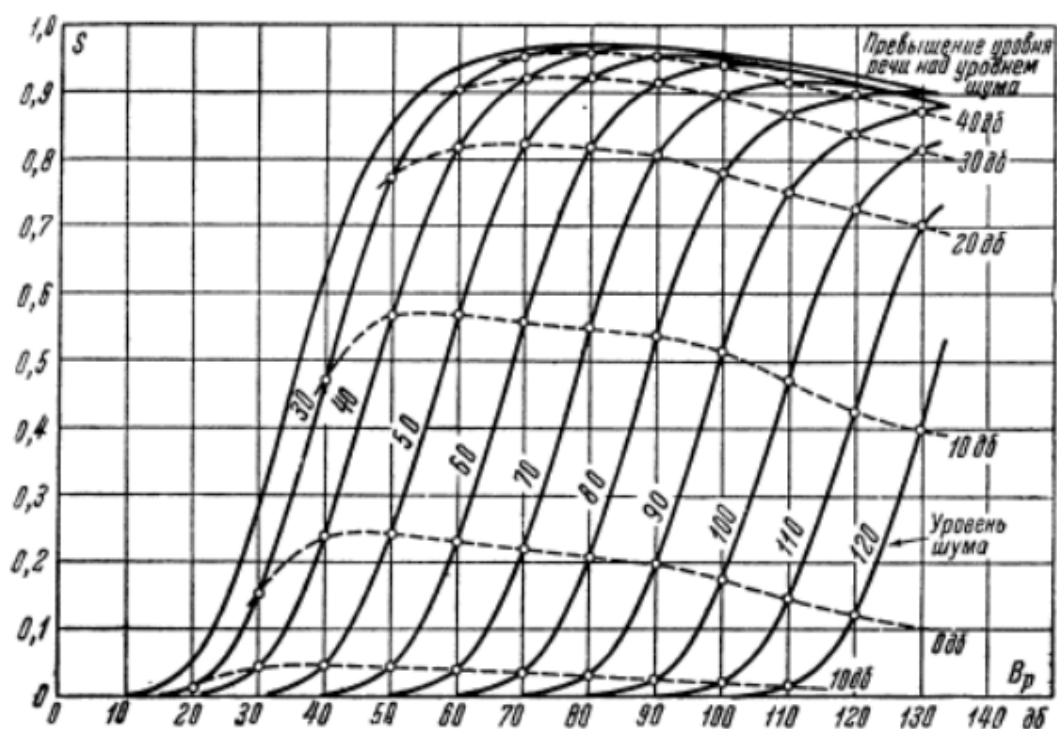
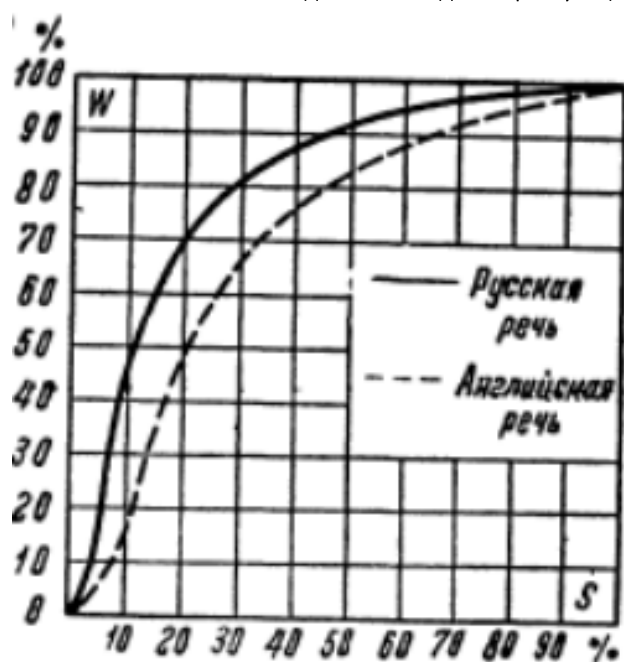


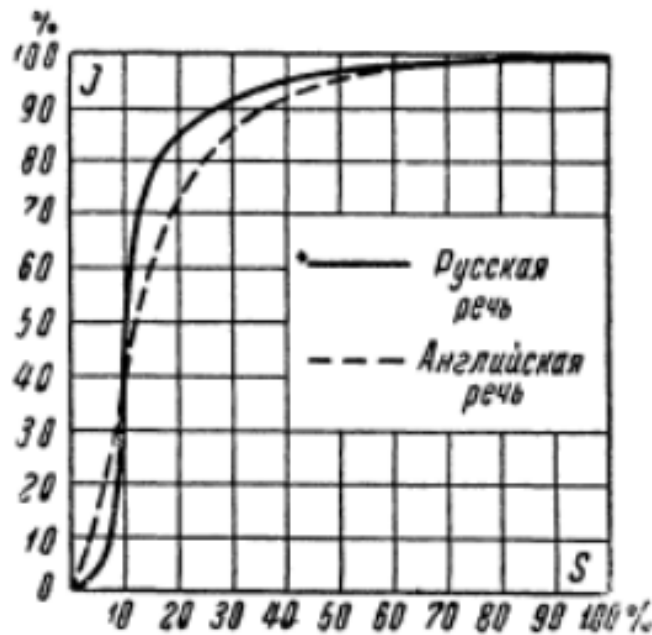
Рис. 1 Знаходження складової артикуляції за наявності шумового поля<sup>1</sup>



| S % | W %  |
|-----|------|
| 0   | 0    |
| 10  | 50,0 |
| 20  | 70,0 |
| 30  | 81,5 |
| 40  | 87,5 |
| 50  | 92,0 |
| 60  | 95,0 |
| 70  | 97,0 |
| 80  | 98,0 |
| 90  | 99,0 |
| 100 | 100  |

Рис. 2 Залежність між словесною W та складовою S артикуляцією [5]

<sup>1</sup> Інструкція по застосуванню цієї намограми, наведена на стор. 199 книзи В. К. Иофе, А. А. Янпольский, Расчетные графики и таблицы по электроакустике. Москва: Государственное энергетическое издательство, 1954.



| S%  | I%   |
|-----|------|
| 0   | 0    |
| 10  | 41,0 |
| 20  | 85,0 |
| 30  | 92,0 |
| 40  | 95,0 |
| 50  | 96,5 |
| 60  | 97,5 |
| 70  | 98,5 |
| 80  | 99,5 |
| 90  | 99,8 |
| 100 | 100  |

Рис. 3 Залежність між змістовою I та складовою S артикуляцією [5]

Сумарний рівень декількох сигналів

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0.1L_i}$$

Сімейство кардіоїдних характеристик спрямованості

$$R(\theta) = \frac{1 + b \cdot \cos(\theta)}{1 + b}, \quad b \geq 0$$

за умови  $b = 1$  маємо кардіоїда характеристику спрямованості;  $b = \sqrt{3}$  - суперкардіоїда;  $b = 3$  - гіперкардіоїда.

## Завдання для першої частини з варіантами

### Завдання № 1

У приміщенні з часом стандартної реверберації  $T$  джерело звукової енергії створює звукове поле, рівень гучності якого заданий дифузної складовою  $L_{\text{диф}}$  (фон) або складовою поля прямої хвилі  $L_{\text{пр}}$  (фон). Відстань  $K$  між слухачем та джерелом звуку задане відношенням  $r/r_h$ , де  $r_h$  - радіус лункості приміщення. Рівень гучності перешкод складає  $L_{\text{ш}}$  (фон) (див. табл. 1). Визначити:

- коефіцієнт чіткості;
- індекс та статистичний індекс чіткості;
- індекс та статистичний індекс прозорості;
- значення складової артикуляції у припущенні, що частотні коефіцієнти  $k_{\text{нч}} = k_{\text{вч}} = 1$ .

По одержаним результатам зробити висновки по їх відповідності рекомендованим значенням для мови та музичних програм.

Таблиця 1 Варіанти для завдання 1

| № Вар. | T, с | L <sub>пр</sub> , фон | L <sub>диф</sub> , фон | r/r <sub>н</sub> | L <sub>ш</sub> , фон |
|--------|------|-----------------------|------------------------|------------------|----------------------|
| 1      | 0,6  | 65                    |                        | 2                | 60                   |
| 2      | 0,7  |                       | 70                     | 1,6              | 70                   |
| 3      | 0,8  | 75                    |                        | 0,5              | 80                   |
| 4      | 0,9  |                       | 80                     | 0,8              | 50                   |
| 5      | 1,0  | 85                    |                        | 4                | 80                   |
| 6      | 1,1  |                       | 90                     | 1,2              | 75                   |
| 7      | 1,2  | 65                    |                        | 2                | 70                   |
| 8      | 1,3  |                       | 70                     | 4                | 60                   |
| 9      | 1,4  | 75                    |                        | 0,6              | 60                   |
| 10     | 1,5  |                       | 80                     | 0,9              | 55                   |
| 11     | 1,6  | 85                    |                        | 2,2              | 70                   |
| 12     | 1,7  |                       | 90                     | 6,4              | 80                   |
| 13     | 1,8  | 65                    |                        | 1,8              | 50                   |
| 14     | 1,9  |                       | 70                     | 2,0              | 50                   |
| 15     | 2,0  | 75                    |                        | 2,0              | 55                   |
| 16     | 2,1  |                       | 80                     | 1,6              | 60                   |
| 17     | 2,2  | 85                    |                        | 0,5              | 70                   |
| 18     | 2,3  | 90                    |                        | 0,8              | 80                   |
| 19     | 2,4  | 85                    |                        | 1,4              | 75                   |
| 20     | 2,5  |                       | 80                     | 1,6              | 70                   |
| 21     | 2,6  | 75                    |                        | 4,0              | 65                   |
| 22     | 2,7  |                       | 70                     | 2,0              | 60                   |

| № Вар. | T, с | L <sub>пр</sub> , фон | L <sub>диф</sub> , фон | r/r <sub>н</sub> | L <sub>ш</sub> , фон |
|--------|------|-----------------------|------------------------|------------------|----------------------|
| 23     | 2,8  | 65                    |                        | 4,0              | 65                   |
| 24     | 2,9  |                       | 60                     | 1,8              | 70                   |
| 25     | 3,0  | 85                    |                        | 1,4              | 75                   |
| 26     | 3,1  |                       | 90                     | 3,2              | 80                   |
| 27     | 3,2  | 65                    |                        | 3,6              | 75                   |
| 28     | 3,3  |                       | 70                     | 2,4              | 70                   |
| 29     | 3,4  | 75                    |                        | 4,0              | 70                   |
| 30     | 3,5  |                       | 80                     | 6,0              | 75                   |
| 31     | 3,6  | 85                    |                        | 1,2              | 80                   |
| 32     | 3,7  | 90                    |                        | 1,0              | 80                   |
| 33     | 2,0  |                       | 65                     | 2                | 70                   |
| 34     | 1.9  | 70                    |                        | 1,6              | 65                   |
| 35     | 1.7  |                       | 75                     | 0,8              | 65                   |
| 36     | 1,6  | 80                    |                        | 0,5              | 80                   |
| 37     | 1,5  |                       | 85                     | 0,3              | 50                   |
| 38     | 1,3  | 90                    |                        | 1,4              | 80                   |
| 39     | 1,1  |                       | 65                     | 1,2              | 75                   |
| 40     | 1,0  | 70                    |                        | 2,0              | 70                   |
| 41     | 0,9  |                       | 75                     | 0,3              | 65                   |
| 42     | 0,8  | 80                    |                        | 4,0              | 60                   |
| 43     | 0,7  |                       | 85                     | 4,2              | 75                   |
| 44     | 0,6  | 90                    |                        | 1,8              | 80                   |
| 45     | 3,0  |                       | 65                     | 2,0              | 60                   |
| 46     | 3,1  | 70                    |                        | 0,5              | 70                   |

| № Вар. | T, с | L <sub>пр</sub> , фон | L <sub>диф</sub> , фон | r/r <sub>н</sub> | L <sub>ш</sub> , фон |
|--------|------|-----------------------|------------------------|------------------|----------------------|
| 47     | 3,3  |                       | 75                     | 0.8              | 50                   |
| 48     | 3,5  | 80                    |                        | 1,6              | 60                   |
| 49     | 3,7  |                       | 85                     | 2,2              | 65                   |
| 50     | 3,6  | 90                    |                        | 2,4              | 70                   |
| 51     | 3,5  | 85                    |                        | 1,4              | 80                   |
| 52     | 3,3  |                       | 80                     | 1,8              | 75                   |
| 53     | 3,1  | 75                    |                        | 3,2              | 70                   |
| 54     | 3,0  |                       | 70                     | 2,4              | 65                   |
| 55     | 2,8  | 65                    |                        | 4,0              | 55                   |
| 56     | 2,6  |                       | 60                     | 6,0              | 60                   |
| 57     | 2,4  | 85                    |                        | 1,2              | 65                   |
| 58     | 2,2  | 90                    |                        | 1,6              | 75                   |
| 59     | 2,0  |                       | 65                     | 0,5              | 70                   |
| 60     | 1,8  | 70                    |                        | 3,2              | 65                   |
| 61     | 1,6  |                       | 75                     | 1,2              | 75                   |
| 62     | 1,4  | 80                    |                        | 2,0              | 80                   |
| 63     | 1,2  |                       | 85                     | 2,8              | 80                   |
| 64     | 1,0  | 90                    |                        | 0.9              | 85                   |

## Завдання № 2

Рівні акустичних сигналів, виміряні в октавних смугах частот стандартного ряду задані у табл. 2.

Таблица 2 Варіанти для завдання 2

| Вар. | Середня частота, Гц | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|------|---------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| 1    | мова                | 59  | 68  | 67  | 62   | 57   | 53   | 49   |
| 2    | естрадна музика     | 81  | 83  | 84  | 84   | 81   | 78   | 74   |

| Вар. | Середня частота, Гц | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|------|---------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| 3    | фортепіано          | 73  | 77  | 78  | 76   | 73   | 69   | 66   |

Обрахувати сумарний рівень сигналу.

#### Завдання № 3

При орієнтації мікрофона заданого типу на джерело звуку акустичне відношення дорівнює  $N$  (табл. 3). Чому дорівнюватиме це відношення, якщо акустичну вісь мікрофона повернути на  $90^\circ$

Таблиця 3 Варіанти для завдання 3

| Вар. | $N$ | Вид ХС мікрофона |
|------|-----|------------------|
| 1    | 0,5 | кардіоїда        |
| 2    | 1,2 | суперкардіоїда   |
| 3    | 3   | гіперкардіоїда   |

#### Завдання № 4

Як зміниться запас індекса звукопідсилення в системі якщо акустичну вісь мікрофона заданого типу відвернути від джерела звуку на заданий кут (табл. 4).

Таблиця 4 Варіанти для завдання 4

| Вар. | Вид ХС мікрофона | Кут повороту мікрофону |
|------|------------------|------------------------|
| 1    | гіперкардіоїда   | $180^\circ$            |
| 2    | кардіоїда        | $120^\circ$            |
| 3    | суперкардіоїда   | $90^\circ$             |
| 4    | гіперкардіоїда   | $120^\circ$            |

#### Завдання № 5

Рівень характеристичної чутливості гучномовця (SPL 1.1) дорівнює  $S$  дБ. Визначення випромінювану акустичну потужність при номінальному режимі збудження  $P_{\text{ел.ном.}}$ , якщо коефіцієнт осової концентрації гучномовця дорівнює  $\Omega$  (табл. 5). Обрахувати також коефіцієнт корисної дії гучномовця.

Таблиця 5 Варіанти для завдання 5

| Вар. | $S$ , дБ | $P_{\text{ел.ном}}$ , Вт | $\Omega$ |
|------|----------|--------------------------|----------|
| 1    | 96       | 12                       | 12       |
| 2    | 98       | 24                       | 16       |
| 3    | 97       | 36                       | 14       |
| 4    | 95       | 12                       | 2,2      |
| 5    | 97       | 24                       | 4        |
| 6    | 94       | 36                       | 2,4      |

## Завдання № 6

У приміщенні з часом стандартної реверберації  $T$  радіус лункості дорівнює  $r_h$ . На якій відстані від джерела звуку треба розташуватися, щоб час еквівалентної реверберації становив  $T_e$  (табл. 6)?

Таблиця 6 Варіанти для завдання 6

| Вар. | $T$ , с | $T_e$ , с | $r_h$ , м | Вар. | $T$ , с | $T_e$ , с | $r_h$ , м |
|------|---------|-----------|-----------|------|---------|-----------|-----------|
| 1    | 1,2     | 1         | 5         | 5    | 1,7     | 1,65      | 6         |
| 2    | 2,4     | 1,8       | 12        | 6    | 0,9     | 0,89      | 3         |
| 3    | 1,8     | 1,7       | 8         | 7    | 1,4     | 1,1       | 10        |
| 4    | 0,8     | 0,79      | 4         | 8    | 0,7     | 0,69      | 6         |

## Завдання № 7

Загальний фонд звукопоглинання приміщення дорівнює  $A$ . На якій відстані від джерела звуку треба розташувати мікрофон заданого типу (з орієнтацією на джерело), щоб у тракці звукопередачі забезпечити задане акустичне відношення  $N$  (табл. 7)?

Таблиця 7 Варіанти для завдання 7

| Вар. | $A$ , м <sup>2</sup> | $N$ | ХС мікрофону   | Вар. | $A$ , м <sup>2</sup> | $N$ | ХС мікрофону   |
|------|----------------------|-----|----------------|------|----------------------|-----|----------------|
| 1    | 400                  | 0,5 | двуспрямований | 4    | 160                  | 0,3 | суперкардіоїда |

| Вар. | A, м² | N | ХС мікрофону   | Вар. | A, м² | N   | ХС мікрофону   |
|------|-------|---|----------------|------|-------|-----|----------------|
| 2    | 120   | 2 | гіперкардіоїда | 5    | 200   | 1,2 | кардіоїда      |
| 3    | 600   | 4 | кардіоїда      | 6    | 500   | 3   | гіперкардіоїда |

### Завдання № 8

У приміщенні з часом стандартної реверберації  $T$  рівень поля прямого звуку на слухацьких місцях змінюється від  $L_{min}$  до  $L_{max}$ . При цьому дифузна компонента поля має рівень  $L_{диф}$  (табл. 8). Визначити як на слухацьких місцях відносяться між собою коефіцієнти чіткості.

Таблиця 8 Варіанти для завдання 8

| Вар. | T,с | $L_{min}$ , дБ | $L_{max}$ , дБ | $L_{диф}$ , дБ | Вар. | T,с | $L_{min}$ , дБ | $L_{max}$ , дБ | $L_{диф}$ , дБ |
|------|-----|----------------|----------------|----------------|------|-----|----------------|----------------|----------------|
| 1    | 1,4 | 76             | 82             | 76             | 5    | 4,0 | 66             | 78             | 70             |
| 2    | 0,7 | 76             | 82             | 74             | 6    | 2,0 | 78             | 86             | 76             |
| 3    | 1,8 | 72             | 80             | 70             | 7    | 0,8 | 78             | 82             | 78             |
| 4    | 1,5 | 72             | 82             | 76             | 8    | 1,2 | 74             | 84             | 78             |

## Другий розділ

Мета другої частини РГР полягає у створенні студентом власного проєкту озвучення чи звукопідсилення довільного закритого простору. В якості такого простору студентам пропонується обрати приміщення, для якого виконувався акустичний проєкт в межах дисципліни “Архітектурна акустика”, оскільки в межах цього проєкту студентом вже виконано необхідні розрахунки акустичних властивостей приміщення.

Для досягнення поставленої мети, студентам пропонується наступна послідовність дій:

1. в обраному приміщенні обрати початок координатної системи та визначити координати майданчика слухачів;
2. визначити координати первинного розташування портальної системи випромінювачів (бажано спрямувати акустичні вісі випромінювачів таким чином, щоб вони перетиналися по вісі симетрії слухачьких місць “вглибині”  $\frac{2}{3}$  від тротяжності майданчика);
3. обрати ексцентриситет випромінювачів рівним 0,8 та провести розрахунок прямого поля в приміщенні з кроком не менше 0,5 м від точки до точки (ди. лекційний матеріал за відповідною темою);
4. за результатами розрахунків по п.3 визначити необхідність додавання додаткових випромінювачів для вирівнювання акустичного поля на віддалені від портальної системи та повторити розрахунки прямого поля;
5. за результатами розрахунків провести аналіз нерівномірності акустичного поля, відповідно до рекомендацій для різних акустичних програм та, за необхідності, провести коригування місця розташування випромінювачів та їх ексцентриситетів/потужностей;
6. провести пошук реальних АС з представлених на сучасному ринку, які максимально відповідають параметрам “віртуальних випромінювачів” з попередніх етапів;
7. скорегувати значення ексцентриситетів та потужностей випромінювачів, відповідно до обраних реальних АС та повторити процедуру розрахунків прямого акустичного поля в приміщенні для третьоктавних частот;
8. за необхідності, замінити АС та повторити п.7, поки акустичне поле не буде відповідати вимогам;
9. розрахувати дифузне акустичне поле приміщення та визначити сумарне акустичне поле в приміщенні;
10. розрахувати об’єктивні параметри якості приміщення;
11. розрахувати стереобазу на слухачьких місцях.

Після проведення відповідних розрахунків необхідно визначити перелік та тип додаткового електроакустичного обладнання (еквалайзери, підсилювачі, пристрої обробки акустичних сигналів, системи придушення АЗЗ, мікрофони, пристрої відтворення, мікшери). Для виконання цього етапу потрібно чітко розуміти для якої акустичної програми проєктується система.

Вибір додаткового електроакустичного обладнання має супроводжуватися детальним обґрунтуванням відповідного вибору (рекомендується користуватися сайтами компаній виробників обладнання та професійних спільнот, з метою визначення сумісності різного обладнання між собою та їх перевагами/недоліками).

Після визначення всього необхідного обладнання студент має чітко визначити місце розташування апаратури в приміщенні та траси електрокабелів.

Проект має містити графіки прямого акустичного поля (третьоктавні) та сумарного поля. Графіки розподілу статистичних індексів по слухацьких місцях (не статистичні індекси представляються лише їх часотними залежностями). Графіки стереобазис по слухацьким місцям. Схему розміщення апаратури з відповідними комунікаціями. Робота має завершуватися аналізом отриманих результатів.

## Рекомендована література

- [1] Ballou G. (Ed.) *Electroacoustic Devices: Microphones and Loudspeakers* Burlington, MA: Focal Press, 2009. **ISBN** 978-0-240-81267-0
- [2] Beranek L.L., Mellow T.J. *Acoustics: Sound Fields and Transducers* 1st Edition. Academic Press, Elsevier Inc., 2012. **ISBN** 978-0-12-391421-7
- [3] Hill Geoff. *Loudspeaker Modelling and Design: A Practical Introduction* Routledge, 2018. **ISBN** 10 0815361335, 13 978-0815361336
- [4] Z. Maekawa, J. H. Rindel, P. Lord, *Environmental and Architectural Acoustics* 2nd Edition. CRC Press, 2018. **ISBN** 978-0367865467
- [5] А. Анерт, В. Райхардт, *Основа техники звукоусиления*. Москва: Радио и связь, 1984.
- [6] И. Г. Дрейзен, *Системы электронного управления акустикой залов и радиовещательных студий*. Москва: Связь, 1967.
- [7] Верн О. Кнудсен, *Архитектурная акустика*, 2007, **ISBN** 978-5-484-00939-8
- [8] Ковалгин Ю.А. (ред.) *Электроакустика и звуковое вещание* Учебное пособие для ВУЗов. Горячая линия-Телеком, Радио и связь, 2007. **ISBN** 5-93517-334-4