

# ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

## 1. Особливості оцінки ефективності СЕЗ

Наразі використовуються різноманітні системи електричного зв'язку, що зумовлене великою кількістю можливих варіантів їх побудови.

Розв'язок задач обрання варіанту, який би був найбільш доцільним при заданих умовах; критеріїв, за яким слід виконувати обрання; шляхів удосконалення існуючих систем тощо зводиться до розв'язку задач оптимізації СЕЗ за тими або іншими показниками.

Головною особливістю розвитку теорії електричного зв'язку є використання системного підходу до оцінки ефективності СЕЗ. При цьому беруться до уваги усі фактори, які впливають на можливість досягнення мети встановлення електричного зв'язку і виконання СЕЗ покладених на неї задач.

Одними з головних цілей функціонування СЕЗ є:

- забезпечення максимальної кількості передачі інформації при фіксованих (обмежених) витратах;
- забезпечення достатньої якості передачі інформації при мінімальних витратах.

При обранні комплексного показника техніко-економічної ефективності СЕЗ виходять з того, що він повинен:

- мати прямий зв'язок з призначенням СЕЗ;
- об'єктивно характеризувати всі основні властивості СЕЗ;
- бути чутливим до зміни параметрів СЕЗ;
- бути простим і наочним (придатним до практичного застосування).

У загальному випадку ефективність будь-якої СЕЗ визначається кількістю передаваної і якістю одержуваної інформації. При цьому кількість передаваної інформації визначається середньою швидкістю передавання  $R$  (біт/сек.), а якість – імовірністю помилки  $p_{\text{п}}$ . У відповідності до теорем завадостійкого кодування – завжди можна забезпечити імовірність помилки  $p_{\text{п}} \leq p_{\text{ппр}}$ , де  $p_{\text{ппр}}$  – її припустиме значення.

Швидкість же передачі інформації  $R$  не може бути більшою за пропускну здатність каналу  $C$ . Отже, очевидно, що найважливішим показником ефективності СЕЗ є швидкість  $R$ , при якій забезпечується задана вірність (імовірність помилки  $p_{\text{ппр}}$ ) передачі.

Швидкість передачі інформації доцільно оцінювати не в абсолютних, а у відносних одиницях:

$$h = \frac{R}{C} \quad (1)$$

Показник  $h$  називається інформаційною ефективністю системи – він визначає ступінь використання пропускну здатності каналу зв'язку. Очевидно, що  $h$  завжди є меншим за одиницю ( $h < 1$ ); чим ближче  $h$  до одиниці, тим досконалішою є СЕЗ.

Необхідні швидкість і вірність передачі досягаються певними витратами потужності сигналу  $P_c$  і смуги частот каналу зв'язку  $\Delta F_k$ . Тому до розгляду вводяться ще два показники:  $b$  – показник, що характеризує використання каналу по потужності (енергетична ефективність) і  $g$  – показник, що характеризує використання каналу по смугі частот (частотна ефективність):

$$b = \frac{R}{P_c / \Omega_0} \quad (2)$$

$$g = \frac{R}{\Delta F_k} \quad (3)$$

де  $\Omega_0$  – спектральна щільність шуму у позитивній смугі частот.

Як видно, показники  $b$  і  $g$  мають зміст питомих швидкостей: кількість біт/с, що припадає на 1 Вт потужності сигналу, віднесеної до спектральної щільності завади (стосовно  $b$ ) або кількість біт/с, що припадає на 1 Гц смуги частот каналу (стосовно  $g$ ).

Між розглянутими показниками ефективності  $h$ ,  $b$  і  $g$  можна встановити взаємозв'язок. Для гаусівського неперервного каналу зв'язку

$$C = \Delta F_k \log_2(1 + h) \quad (4)$$

Де  $h = P_c / P_{\text{ш}}$  – відношення середніх потужностей сигналу і шуму. Для квазібілого шуму  $P_{\text{ш}} = \Omega_0 \Delta F_k$ . Тоді у відповідності до виразів (1)-(4) маємо:

$$h = \frac{R}{C} = \frac{g \Delta F_k}{\Delta F_k \log_2 \left( 1 + \frac{R \Omega_0 / b}{\Omega_0 \Delta F_k} \right)} = \frac{g}{\log_2 \left( 1 + \frac{g}{b} \right)} \quad (5)$$

$$g = \frac{R}{\Delta F_k} = \frac{b P_c / \Omega_0}{P_{\text{ш}} / \Omega_0} = bh. \quad (6)$$

Показники технічної ефективності  $b$  і  $g$  пов'язані між собою простим співвідношенням (6), що дозволяє користуватися тим з них, який більше підходить для оцінки якості СЕЗ конкретного типу. Наприклад, для оцінки ефективності радіосистем частіше використовують показник  $b$ , а для оцінки ефективності дротових СЕЗ – показник  $g$ .

У відповідності до теореми Шеннона, за належних способів передачі (кодування і модуляції) і прийому (демодуляції і декодування) величина  $h$  (при як завгодно малій імовірності помилки) може бути як завгодно близькою до 1. При  $h = 1$  з (5) одержуємо граничну залежність між  $b$  і  $g$ :

$$g = \log_2 \left( 1 + \frac{g}{b} \right) \text{ або } 2^g = 1 + \frac{g}{b} \text{ або } b = 1 + \frac{g}{2^{g-1}} \quad (7)$$

Цю залежність зручно представити у вигляді кривої на площині  $b, g$  (рис.1).

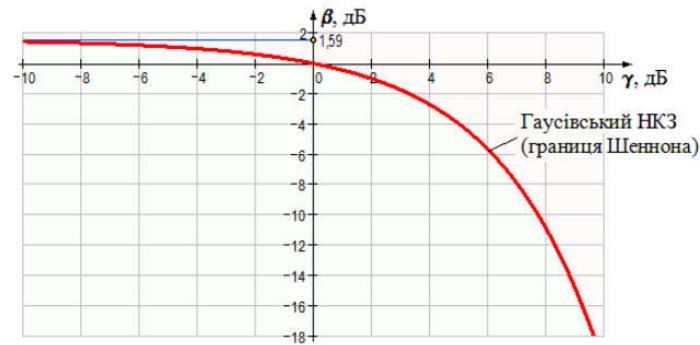


Рис.10.1. Гранична крива ефективності СЕЗ

Слід зазначити, що частотна ефективність  $g$  може змінюватися у межах від 0 до  $\infty$ , у той час як енергетична ефективність  $b$  є обмеженою зверху:  $b_{max} = \log_2(\varepsilon) \approx 1,443$  або  $1,592$  дБ при  $g \rightarrow 0$ .

За фізичним змістом  $b$  і  $g$  – це питома кількість інформації, яку можна передати каналом зв'язку при заданому співвідношенні сигнал/шум  $h$  або при фіксованій смузі каналу зв'язку  $\Delta F_k$ .

## 2. Ефективність систем передачі дискретних повідомлень

У системах передачі дискретних повідомлень (СПДП) сигнал формується за допомогою кодування і модуляції. При цьому кодування зазвичай здійснюється у два етапи:

- 1) кодування джерела повідомлень з метою скорочення його надмірності  $r_{дж}$ ;
- 2) кодування каналу зв'язку з метою зменшення ймовірності виникнення помилки під час прийому (за рахунок введення надмірності коду  $r_{дж}$ ).

У відповідності до цього, кодек складається з двох кодеків: джерела і каналу. Тоді вираз (1) для інформаційної ефективності СПДП можна представити у вигляді добутку

$$h = \frac{R}{C} = h_{к.дж} h_{к.к.з} h_{м} \quad (8)$$

де  $h_{к.дж} = 1 - r_{дж}$  – ефективність кодера джерела;  $h_{к.к.з} = 1 - r_{к}$  – ефективність кодера каналу зв'язку;  $h_{м}$  – ефективність модему, яка залежить від виду модуляції і способу обробки сигналу у каналі зв'язку.

У реальних СЕЗ імовірність помилки завжди більша за нуль, і тому інформаційна ефективність  $h < 1$ . У цих випадках при заданій імовірності помилки  $p_n$  можна визначити окремо показники  $b$  і  $g$  та побудувати криві  $b = f(g)$ . На площині  $b$   $g$  кожному варіанту реальної СЕЗ відповідатиме окрема точка. Усі ці точки (криві) розміщуються нижче граничної кривої

Шеннона (див. рис.1), а хід кривих, на яких розміщуються точки, залежить від виду сигналу (типу модуляції), коду і способу обробки сигналів.

Ефективність передачі дискретних повідомлень можна підвищити шляхом використання:

- *рознесеного прийому сигналів* – передане повідомлення у приймачі відтворюється не за одним прийнятим сигналом, а за двома чи декількома, які несуть одне й те саме повідомлення; рознесення може бути частотним, часовим або просторовим;

- *прийому в цілому* – замість двох вирішуючих схем для кодеків джерела і каналу зв'язку в приймачі використовують одну, а рішення приймають по сигналу, що відповідає всій кодовій комбінації, а не її частині. При цьому в роботі приймача використовується та частина корисної інформації з виходу першої вирішуючої схеми, яка у випадку поелементного прийому губиться після того, як схема прийняла рішення. Поелементний прийом і прийом в цілому є еквівалентними лише у випадку кодування без надмірності;

- *каналів зворотного зв'язку* – пропускну здатність каналів обох напрямків частково використовують для передачі додаткової інформації, яка сприяє підвищенню ефективності зв'язку;

- *шумоподібних несних* – дозволяє не лише наблизити швидкість передачі інформації до теоретичної межі (пропускну здатності каналів), але й істотно підвищити вірність переданих повідомлень;

- *адаптивної корекції характеристик каналу зв'язку* – періодичне зондування каналу випробувальним імпульсом і корегування за необхідності коефіцієнту передачі КЗ.

### 3. Ефективність систем передачі неперервних повідомлень

Оцінка ефективності передачі неперервних повідомлень – це оцінка ефективності способу модуляції. Для цього використовують вираш по відношенню сигнал/шум (коефіцієнт ефективності модуляції)  $\bar{\omega}h$  а також коефіцієнт використання пропускну здатності каналу зв'язку  $h$ :

$$h = \frac{\log_*(1 + \bar{\omega}h)}{V \log_*(1 + h)} \quad (9)$$

де  $V$  — коефіцієнт надмірності модуляції .

Основними способами підвищення ефективності передачі неперервних повідомлень є:

- *усунення надмірності неперервних повідомлень* – шляхом дискретної передачі не власне сигналу, а його найбільш характерних параметрів, зміна яких у часі відбувається набагато повільніше, порівняно із зміною самого сигналу;

- *статистичне ущільнення*, сутність якого полягає в тому, що паузи в передачі і вільні смуги частот, зумовлені статистичними особливостями джерел інформації, використовують для організації додаткових каналів зв'язку і передачі додаткової інформації;

- керування динамічним навантаженням каналів – контроль і вирівнювання реального навантаження різноманітних каналів, в результаті чого коефіцієнти використання пропускних здатностей всіх каналів зв'язку стають приблизно однаковими;
- використання цифрових методів модуляції тощо.