

ДК 621.396:623

¹Кадет Н.П.,
²Зірка М.В.,
²Козлов В.Г.

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ НАДЛИШКОВОСТІ СИГНАЛУ В РАДІОКАНАЛІ ЗВ'ЯЗКУ

¹Національний авіаційний університет²Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки
Збройних Сил Україниkadet-nata@ukr.netmariia-soroka@ukr.netkozlov-vad@ukr.net

Запропоновано використовувати чисельні методи мінімакс для формалізації алгоритму стратегії мінімакс при розрахунку надлишковості сигналу в радіоканалі зв'язку. Енергетичні характеристики радіоканалу зв'язку визначаються за допомогою апріорних операторів прогнозу оціночних функцій потужності на виході передавача радіоканалу зв'язку, відношення сигнал/шум на вході приймача радіоканалу зв'язку

Ключові слова: радіоканал зв'язку, метод мінімакс, запас енергопотенціалу, надлишковість

Вступ

Питання забезпечення надійного функціонування радіоканалів зв'язку при передачі інформації в реальному масштабі часу, наприклад з борта безпілотного літального апарату (БПЛА) при застосуванні безпілотних авіаційних комплексів (БпАК), залишається складною науково-технічною задачею.

При цьому, для забезпечення надійності функціонування радіоканалу зв'язку

при передачі отриманої розвідувальної інформації на наземний пункт управління (НПУ) Р_{Н.РКЗ} виникає необхідність постійного контролю в автоматичному режимі за енергетичними характеристиками радіоканалу зв'язку. При цьому одним з методів отримання значень параметрів та характеристик для контролю досягається шляхом математичного моделювання умов прийому сигналу, як наведено на рис.1.

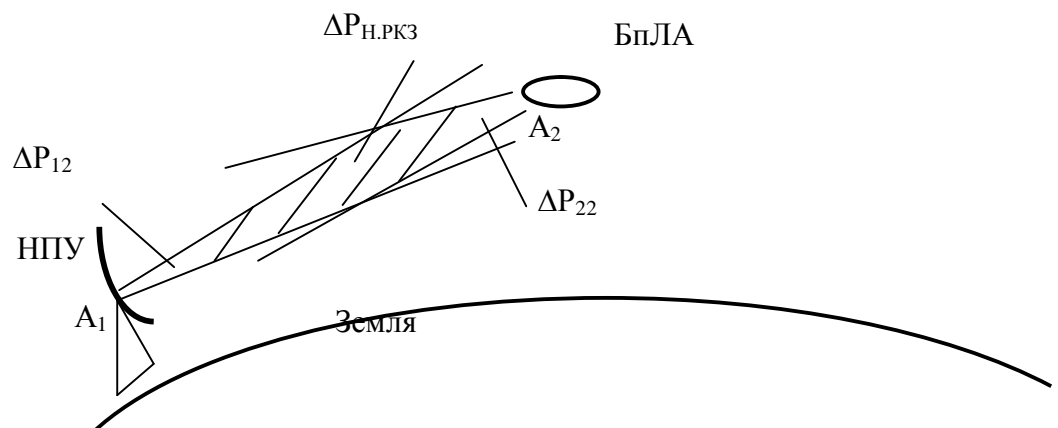


Рис. 1 Фізична модель функціонування

Мета статті

Обґрунтування узагальненого показника ефективності функціонування радіоканалу зв'язку за критерієм запасу енергопотенціалу ($\Delta P_1, \Delta P_2$), який повинен забезпечувати надійність функціонування радіоканалу зв'язку $P_{Н.ПКЗ.}$, що визначається наступним чином

$$\Delta P_1 = P_{пор.1} - \Delta P_{12} \quad (1)$$

$$\Delta P_2 = P_{пор.2} - \Delta P_{22}, \quad (2)$$

де $\Delta P_1, \Delta P_2$ – запас енергопотенціалу по відношенню до порогу приймача ($P_{пор.1}, P_{пор.2}$);

ΔP_{12} та ΔP_{22} – величини сигналу, які забезпечують надлишковість сигналу в

$$Q_{эф1} = \frac{\sum_{i=1}^N Y_1(P_{Н.ПКЗ.1}) H_1(\Delta P_1 / \Delta P_{12})}{C(P_{Н.ПКЗ.1})} \quad (3)$$

де $C(P_{Н.ПКЗ.1})$ – вартість досягнутих ефектів надлишковості сигналу в радіоканалі;

H_1 – умовна ймовірність наявності запасу на компенсацію випадкових факторів ΔP_{12} та ΔP_{22} в радіоканалі;

$$P_{Н.ПКЗ.1} = \mathcal{E}_{Q_{эф}} = \sum_{u=1}^n [X_{ic}^{P_i} \prod_{j=1}^m \exp\{-0,13\Delta T_i \exp(-\frac{Y_{КРИТ.i}^2}{2S_i^2})\}] \quad (4)$$

де X – пріоритетність обраних напрямків організації радіоканалу;

m – загальна кількість пріоритетних напрямків організації радіоканалу;

T – час зв'язку при організації радіоканалу;

Y – величина, що визначається енергетичними параметрами організації радіоканалу по двом чинникам ΔP_{12} та ΔP_{22} ;

σ – середньоквадратичне відхилення величини сигналу в радіоканалі.

Результатом рішення наукової задачі, при єдиному методологічному підході до розрахунку енергетичного потенціалу радіоканалу, є облік особливостей прогнозу мінімаксних медіанних рівнів сигналів, які відповідають надлишковості сигналу в радіоканалі зв'язку за апріорним операторам прогнозу

радіоканалі зв'язку за відповідним порогом.

Основна частина

Розрахунок запасу енергопотенціалу радіоканалу для визначення величини $P_{Н.ПКЗ.1,2}$ в цьому випадку здійснюється по складеному критерію ефективності, який визначається складовим показником $Q_{эф}$ для кожного випадку

Для досягнення мети необхідно розробити метод розрахунку надійності функціонування радіоканалу зв'язку $P_{Н.ПКЗ.}$ з урахуванням впливу випадкових факторів на величини ΔP_{12} та ΔP_{22} .

Y_1 – показник надлишковості сигналу в радіоканалі що залежить від $P_{Н.ПКЗ.1,2} = f(\Delta P_{12}, \Delta P_{22})$, тобто

$$\begin{aligned} & \min \max Z^{АПР} [P_{12}] \quad \min \max Z^{АПР} [P_{22}], \\ & \min \max Z^{АПОСТ} [P_{12}] \quad \min \max Z^{АПОСТ} [P_{22}]. \end{aligned}$$

Цім змінним апріорних операторів $\min \max Z^{АПР} [P_{12}^{АПР}] \quad \min \max Z^{АПР} [P_{22}^{АПР}]$, відповідають зміни операторів медіанного рівня сигналу в радіоканалі $\min \max Z_Y^{АПР} [A_{12}^{АПР}, J_{12}^{АПР}] \quad \min \max Z_x^{АПР} [A_{22}^{АПР}, J_{22}^{АПР}]$.

У разі їх відповідності встановлюється наближена рівність, що відповідає досягнутій надлишковості сигналу в радіоканалі зв'язку.

На рис. 2 наведено приклади зміни операторів прогнозу $\min \max Z_x^{АПР} [P_{12}^{АПР}] \quad \min \max Z_x^{АПР} [P_{22}^{АПР}]$ для радіоканалів зв'язку з НПУ та БПЛА.

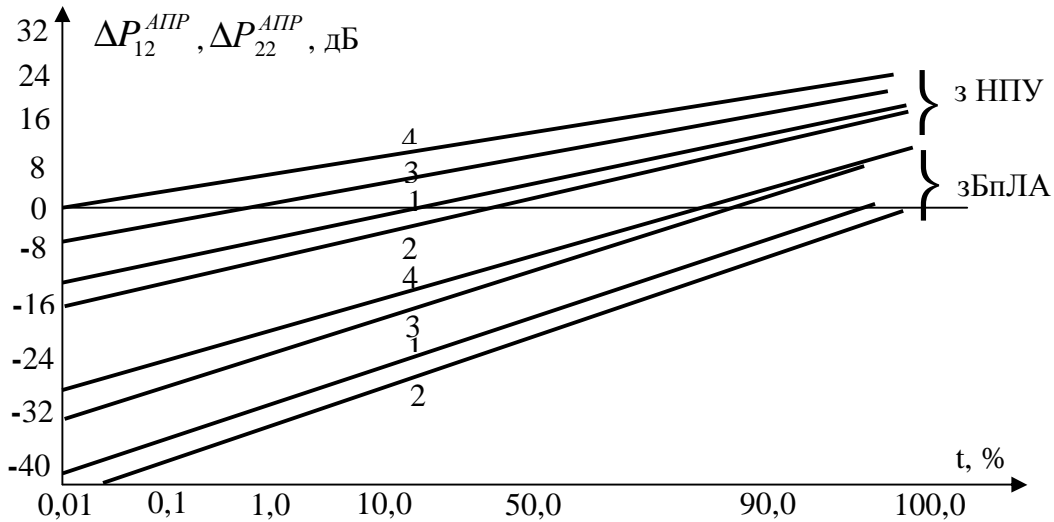


Рис. 2. Інтегральні закони розподілу, для радіоканалу зв'язку з НПУ та БПЛА

Всі чотири типи інтегральних розподілів оціночних функцій ΔP_{12} та ΔP_{22} , позначені відповідно 1, 2, 3, 4, близькі до закону розподілу Релея

$$P(A_{12}) = \frac{A_{12}}{S} e^{-\frac{A_{12}^2}{2S^2}} \quad (5)$$

$$P(A_{22}) = \frac{A_{22}}{S} e^{-\frac{A_{22}^2}{2S^2}} \quad (6)$$

Медіанний рівень розподілу сигналу (1) по операторам прогнозу на 2-3 дБ перевищує рівень розподілу (2). Розподіли (3) і (4) визначено за результатами моделювання режиму прийому сигналу "априорної" в радіоканалі зв'язку [1], а також при моделюванні режиму прийому "апостеріорний" в радіоканалі зв'язку [1].

Прогноз використання нових частотних діапазонів в радіоканалі, при імітаційному моделюванні, уточнюється операторами [2]

$$\min \max Z_X^{AIP} [\Delta P_{12}^{AIP}] \text{ та}$$

$$\min \max Z_Y^{AIP} [\Delta P_{22}^{AIP}], \text{ і уточнюється операторами}$$

$$\min \max Z_X^{APOST} [\Delta P_{12}^{APOST}] \text{ та}$$

$$\min \max Z_Y^{APOST} [\Delta P_{22}^{APOST}],$$

коли проводиться оптимізація вибору частотних діапазонів в радіоканалі зв'язку з надлишковістю сигналу [1-2].

Для радіоканалу зі зміною форми діаграми спрямованості (ДН) антени прийому-передавача

$$\min \max Z_X^{AIP} [\Delta P_{12}^{AIP}] \text{ та}$$

$$\min \max Z_Y^{AIP} [\Delta P_{22}^{AIP}]$$

уточнюють визначення помилок фазового розподілу в апертурі ФАР, що дозволяє визначити зміну сигналу, що впливає на надлишковість сигналу в радіоканалі зв'язку [3].

Використання чисельних методів мінімакс припускає формалізацію алгоритму стратегії мінімакс при розрахунку енергетичних характеристик радіоканалу зв'язку з надлишковістю сигналу, з допомогою априорних операторів прогнозу оціночних функцій ΔP_{12}^{AIP} и ΔP_{22}^{AIP} , які уточнюються визначенням операторів стандартного відхилення сигналу і часом запізнювання сигналу в каналі обробки.

В якості критерію оптимальності функціонування радіоканалу зв'язку використовується правило прийняття рішення [4] $U_{ij}^{*AIP}(X_{ij}, Y_{ij})$ та $U_{ij}^{*APOST}(X_{ij}, Y_{ij})$, коли визначаються оператори

$\min \max Z_X^{APP} [\Delta P_{12}^{APP}]$ та $\min \max$

$$Z_Y^{APP} [\Delta P_{22}^{APP}],$$

$\min \max Z_X^{APOCT} [\Delta P_{12}^{APOCT}]$ та $\min \max$

$$Z_Y^{APOCT} [\Delta P_{22}^{APOCT}],$$

$$Z_X^{APP} [\Delta P_{12}^{APP}], Z_X^{APOCT} [\Delta P_{12}^{APOCT}], Z_Y^{APP} [\Delta P_{22}^{APP}], Z_Y^{APOCT} [\Delta P_{22}^{APOCT}]$$

і їх оціночних функцій ΔP_{12}^{APP} ,
 ΔP_{12}^{APOCT} , ΔP_{22}^{APP} , ΔP_{22}^{APOCT}

$$\mathcal{E}_{\chi_0}^{APOCT}(\Lambda_i) = \sum_{i=1}^n \left[X_{i\chi}^{P.APPi} \prod_{j=1}^m \exp \left\{ -0,13 \Delta T_i e^{-\frac{Y_{КРИТi}^2 APOCT}{2\sigma_i^2}} \right\} \right] \quad (7)$$

де $X_{i\chi}^{P.APPi}$ оператор прогнозу, який визначає ступінь пріоритетних напрямків максимумів ДН антен \vec{r}_{m_1} та \vec{r}_{m_2} ;

m - апріорно відоме кількість пріоритетних напрямків для ситуацій функціонування;

ΔT_i - час сеансу зв'язку в радіоканалі; $Z[Y_{КРИТi}^{APOCT}]$ - оператор прогнозу енергетичних параметрів радіоканалу;

$Z_X^{APP}[\sigma_i]$ - оператор прогнозу середньоквадратичного відхилення сигналу в радіоканалі.

Згідно з цим критерієм, надлишковість сигналу радіоканалу зв'язку в Λ_i -ой ситуації функціонування, визначається оптимальним чином за наближеному рівності операторів прогнозу $[\mathcal{E}_{\chi_0}^{APOCT}(\Lambda_i)] \approx [P_{Н.РКЗ}^{APOCT}]$, що відповідає

прийняття рішення $Z_{ij}^{APP}(U_i)$ чи гіпотези H_i^{APOCT} по операторам

$$\min \max Z_{ij}^{APP} [\Delta P_{12}^{APP}]$$

$$\text{та} \min \max Z_{ij}^{APP} [\Delta P_{22}^{APP}],$$

$$\min \max Z_{ij}^{APOCT} [\Delta P_{12}^{APOCT}]$$

$$\text{та} \min \max Z_{ij}^{APOCT} [\Delta P_{22}^{APOCT}].$$

у вигляді операторів прогнозу надлишковості сигналу в радіоканалі зв'язку.

Доказ апостеріорної гіпотези Н про функціонування радіоканалів з надлишковістю сигналу проводиться на підставі відповідності операторів прогнозу

за обраним критерієм оптимальності інформаційної надлишковості радіоканалу [3-4]

У цьому випадку оператор прогнозу енергопотенціалу $Z[Y_{КРИТi}^{APOCT}]$ радіоканалів визначається апріорним оператором $Z[Y]$ прийняття рішення про прийняття випадкового сигналу, згідно нерівності

$$Z_{ij}^{APP} \leq Z[Y_{КРИТi}^{APOCT} \{101g \frac{n_{МЕДij}(\Delta P_{12}^{APOCT})}{n_{ОКРИТi}(\Delta P_{12}^{APP})}\}],$$

де $n_{ОМЕДij}$ - медіанне відношення сигнал/шум по ΔP_{12}^{APP} та ΔP_{12}^{APOCT} сигналу на вході приймача

$$n_{ОМЕДi} = A_i^{APOCT} \Phi^{APOCT} \left(\frac{G_1 G_2}{\Delta G_i} \right);$$

A_i^{APOCT} - параметр, який визначається з ГТХ радіоканалу;

G_1 та G_2 - коефіцієнти підсилення (КУ) антен;

ΔG_i - втрати посилення антен;

$N_{ОКРИТi}$ - критичне відношення сигнал/шум на вході приймача,

$$n_{ОКРИТi} = \sqrt{\frac{I(r)}{(L-1)2P_{ош}}};$$

де L - кратність рознесення прийому сигналів в радіоканалі;

$I(r)$ - інтеграл ймовірності; $P_{ош}$ - імовірність помилок прийому сигналу.

Контрольована величина $n_{\text{омед}_i}$, визначається оператором прогноза $Z_Y^{\text{АПОСТ}} [\Delta P_{12}^{\text{АПОСТ}}] = [A_{12}^{\text{АПОСТ}} \frac{G_1 G_2}{n_{\text{омед}_i}}]$ (8)

та апріорними операторами $\Delta P_{12}^{\text{АПП}}$ и $\Delta P_{12}^{\text{АПОСТ}}$ сигналу

$$Z[Y_{\text{КРИТ.ij}}^{\text{АПОСТ}}] = 10 \lg \frac{(\Delta P_{12}^{\text{АПОСТ}})}{(\Delta P_{22}^{\text{АПОСТ}}) \sqrt{\frac{I(r)}{(L-1)! 2 P_{\text{ош}}}}}$$
 (9)

Використання чисельних методів мінімакс для аналізу надлишковості сигналу в радіоканалі зв'язку здійснюється шляхом синтезу методу прийому сигналу по ухваленню рішення $U^*(X, Y)$, яке виробляється з допомогою чисельних методів мінімакс і комбінаторного аналізу вибірок матричних масивів сигналів $X_{ij}(Z_X^{\text{АПП}} [\Delta P_{12}^{\text{АПП}}], Z_X^{\text{АПОСТ}} [\Delta P_{12}^{\text{АПОСТ}}])$, $Y_{ij}(Z_Y^{\text{АПП}} [\Delta P_{22}^{\text{АПП}}], Z_Y^{\text{АПОСТ}} [\Delta P_{22}^{\text{АПОСТ}}])$, як операторів прогнозу надлишковості сигналу для функціонуючого радіоканалу зв'язку.

Вибірки матричних масивів формуються і представляються у вигляді цільових функцій на певному інтервалі (0, T). Це дозволяє розробити оптимальне правило стратегії мінімакс прийняття рішення по адаптивного методом Байєса при комбінаторному аналізі операторів прогнозу інформаційної надлишковості

$\min \max Z_{ij}^{\text{АПП}} [\Delta P_{12}^{\text{АПП}}]$
 $\text{та} \min \max Z_{ij}^{\text{АПП}} [\Delta P_{22}^{\text{АПП}}]$,
 $\min \max Z_{ij}^{\text{АПОСТ}} [\Delta P_{12}^{\text{АПОСТ}}]$
 $\text{та} \min \max Z_{ij}^{\text{АПОСТ}} [\Delta P_{22}^{\text{АПОСТ}}]$,
 з заданою ймовірністю.

Наприклад, для радіоканалу, коли в матричній вибірці безліч $\Phi(X_{ij}, Y_{ij})$ задано операторами $Z_X^{\text{АПП}} [\Delta P_{12}^{\text{АПП}}]$, $Z_Y^{\text{АПОСТ}} [\Delta P_{12}^{\text{АПОСТ}}]$, то необхідно визначити функціонал $\Phi[U(X, Y)]$, який представлений операторами прогнозу $Z_X^{\text{АПП}} [\Delta P_{12}^{\text{АПП}}]$ і $Z_Y^{\text{АПОСТ}} [\Delta P_{12}^{\text{АПОСТ}}]$ середніх оціночних функцій - $\Delta P_{12}^{\text{АПП}}$, $\Delta P_{12}^{\text{АПОСТ}}$, з їх середніми ризиками - $\Phi_1[U(X), P_1]$, $\Phi_2[U(Y), P_2]$. При цьому існує одна можливість вибору правила прийняття рішення $U^*(X, Y)$, мінімізує усереднені результати оцінки Λ_i -ой ситуації функціонування радіоканалів

$$\Phi_1[U^*(X), P_1(\Delta P_{12}^{\text{АПП}})] = \min_{[U(X)]} \Phi_1[U_1(X), P_1] = \min_{[U(X)]} \int \bar{\Phi}[U_1(X), P_1] dm_1$$
 (10)

$$\Phi_2[U^*(Y), P_2(\Delta P_{12}^{\text{АПОСТ}})] = \min_{[U(Y)]} \Phi_2[U_2(Y), P_2] = \min_{[U(Y)]} \int \bar{\Phi}[U_2(Y), P_2] dm_2$$
 (11)

Звідси визначити надлишковість сигналу в радіоканалі зв'язку можливо рішенням рівняння

$$\min \max [\Delta P_{12}^{\text{АПП}}] = \left\{ 10 \lg \frac{(\Delta P_{12}^{\text{АПОСТ}})}{(\Delta P_{12}^{\text{АПОСТ}}) \sqrt{\frac{I(r)}{(L-1)! 2 P_{\text{ош}}}}} \right\} - \min \max [\Delta P_{12}^{\text{АПОСТ}}]$$
 (12)

У цьому випадку, неоднозначність вибору прийняття рішення визначається мірою апіорної процедури $\mu_1(P_1)$ і мірою апостеріорної процедури $\mu_2(P_2)$, а дискретні розподілу операторів

$$Z_X^{AIP} [\Delta P_{12}^{AIP} (\mu_1)] \text{ і } Z_Y^{APOCT} [\Delta P_{12}^{APOCT} (\mu_2)]$$

задаються кінцевим кількістю m – ситуацій (Λ_i при $i=1, \dots, n$ і $i=1, \dots, m$).

Для кожної з них за допомогою апіорних процедур знаходяться апіорні рішення

$Z_{ij}^{AIP} [U_{1i}^*, U_{1j}^*]$ та приймаються з допомогою апостеріорних процедур апостеріорні гіпотези H_{i1}^{APOCT} і H_{j1}^{APOCT} , пов'язані з ситуаціями Λ_{ij} та операторами прогнозу

$$\min \max Z_Y^{APOCT} [\Delta P_{12}^{APOCT}] \text{ та}$$

$$\min \max Z_X^{AIP} [\Delta P_{12}^{AIP}],$$

що забезпечують оптимальну надійність функціонування радіоканалу зв'язку з надлишковістю сигналу за наближеною рівністю операторів прогнозу:

$$[P_{Л.ИНФ.}^{AIP} (\exists^{AIP} \chi_0 (\Lambda_i))] \approx$$

$$[P_{Л.ИНФ.}^{APOCT} (\exists^{APOCT} \chi_0 (\Lambda_i))].$$

Розрахункові характеристики радіоканалу зв'язку з надлишковістю сигналу у вигляді оператора

прогнозу $Z_X[\max \Delta P_{12}^{AIP}]$ Представлені на рис. 4.

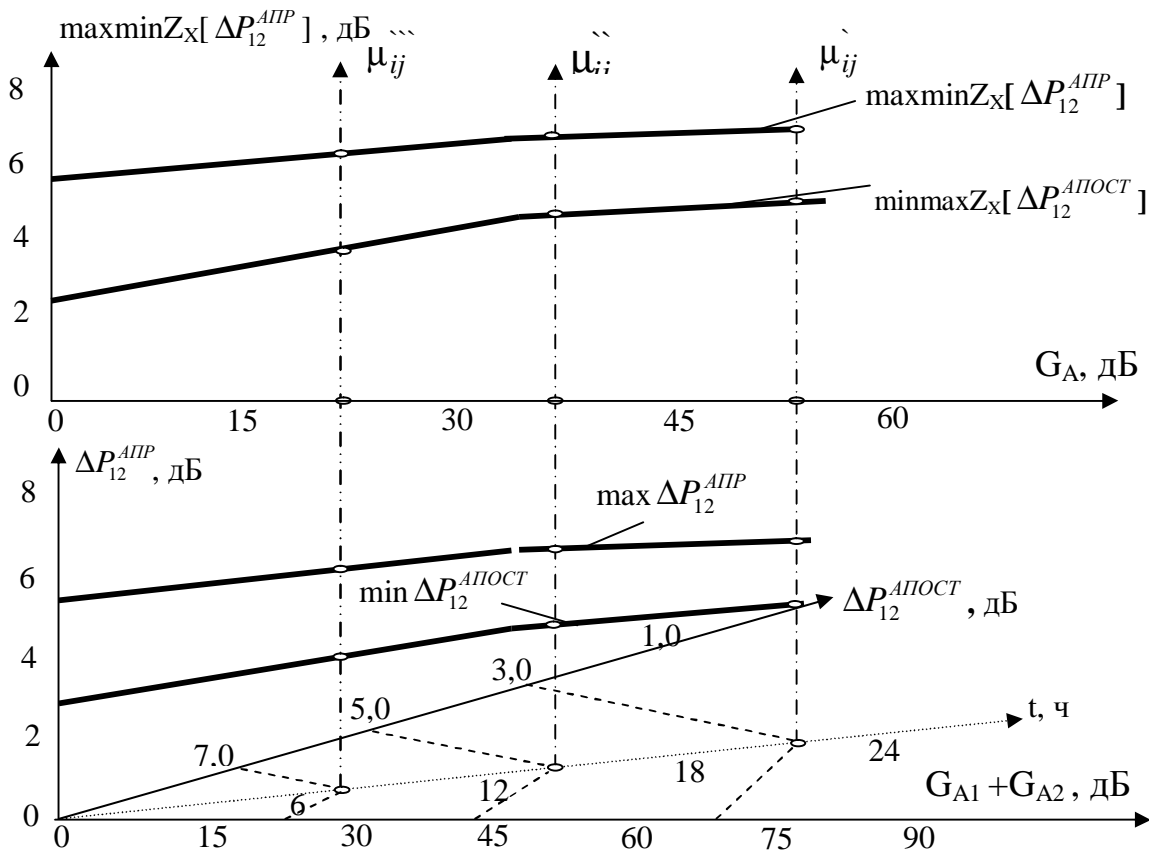


Рис.4 Энергетичні характеристики радіоканалу зв'язку з надлишковістю сигналу у вигляді оператора прогнозу $Z_X[\max \Delta P_{12}^{AIP}]$

Таким чином, як видно з рисунку 4 енергетичні характеристики радіоканалу зв'язку з надлишковістю сигналу у вигляді операторів прогнозу:

$$Z_x[\max \Delta P_{12}^{AIP}];$$

$$\min \max Z_x[\Delta P_{12}^{APOST}]$$

що отримані за допомогою чисельного експерименту, підтверджують працездатність запропонованого методу визначення надлишковості сигналу в радіоканалі зв'язку.

Висновки

1. Метод оцінки ефективності функціонування радіоканалу зв'язку, на основі запропонованого алгоритму стратегії мінімакс надає можливість виконати розрахунки енергетичних характеристик радіоканалу зв'язку з надлишковістю сигналу з урахуванням впливів випадкових факторів на радіоканал зв'язку НПУ-БпЛА.

2. Визначено, що застосування запропонованого методу на основі стратегії мінімакса не вимагає розробки та застосування додаткових критеріїв оцінки ефективності функціонування радіоканалу зв'язку в оптимальному режимі функціонування.

3. Обґрунтовано узагальнений показник ефективності функціонування радіоканалу зв'язку за критерієм запасу енергопотенціалу.

4. Запропонований метод надає можливість виконати оцінку існуючих каналів зв'язку БпЛА – НПУ, визначити ефективність їх функціонування при дії випадкових факторів на радіоканал, сформулювати пропозиції щодо підвищення надійності та стійкості радіоканалу зв'язку, у тому числі при впливі зовнішніх факторів.

Список літератури

1. Рудаков. І. Тропосферні системи зв'язку з адаптивними антенами : монографія / В.І. Рудаков. - К. : ЦНДІ ОВТ ЗС України; АТ "Авіоніка", 1999. - 292 с.

2. Рудаков В.І. Принцип мінімакс в розрахунках енергетичних характеристик

радіотехнічних систем при тропосферному поширенні радіохвиль / В. І. Рудаков // Известия вищ. навч. закладів. Сер. Радіоелектроніка.- Т.46; №11. - К. : НТУУ "Київський політехнічний інститут, 2003.- З. 42-49 с.

3. Радиотехническое оборудование /В.А. Болдин, Г.И. Горгонов, В. Д. Коновалов и др.; Под ред. Доктора технич. наук, проф В.М. Сидорина. – М.: Воеиздат, 1990. – 288 с.

4. Тихонов В.І. Статистическая радиотехника /В.І. Тихонов //Изд: Москва "Советское радио", 1966 – 672 с.

5. Федоров В.В. Численные методы максимина /В.В.Федоров// Изд: М - Наука, 1979 – 652 с.

Статтю подано до редакції 30.11.2017