

УДК 621.396

І.М. Невмержицький, С.М. Ковалевський, А.А. Гризо, В.В. Ковзун, О.О. Мачула

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## ОЦІНКА ВПЛИВУ НЕІДЕНТИЧНОСТІ КВАДРАТУРНИХ КАНАЛІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЕНСАТОРА ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕШКОД З РЕГЕНЕРАЦІЄЮ КЕПСТРАЛЬНИХ СКЛАДОВИХ КОРИСНОГО СИГНАЛУ

В статті проводиться аналіз та оцінка впливу неідентичності квадратурних каналів на ефективність застосування компенсатора імпульсних перешкод, алгоритм дії якого реалізує подвійне дискретне перетворення Хартлі з одночасним відновленням (регенерацією) уражених складових корисного сигналу в кепстральній площині. Оцінка впливу на ефективність роботи компенсатора проводилась з врахуванням амплітудних та фазових неідентичностей квадратурних каналів. Амплітудні та фазові неідентичності імітуються відхиленням амплітудної та фазової характеристик каналів від ідеальної. Робота компенсатора імітувалась для випадку дії на когерентно-імпульсну РЛС несинхронних імпульсних перешкод, що випадковим чином уражають від одного до трьох дискрет дальності визначеної частотної пачки. За показник ефективності приймається різниця між кількістю хибних регенерувань модуля спектральної щільності луна-сигналів цілі, при відсутності та при наявності неідентичностей. Показано, що різноканальність квадратур призводить до зниження ефективності застосування компенсатора, особливо в складній перешкодовій обстановці.

**Ключові слова:** компенсатор імпульсних перешкод, амплітудна неідентичність, фазова квадратурна неідентичність, перетворення Хартлі, оцінка ефективності

### Вступ

**Постановка проблеми.** Невід'ємною процедурою, при використанні цифрової обробки сигналів (ЦОС), в когерентно-імпульсних РЛС є процес формування квадратурних складових прийнятого сигналу.

Для РЛС «старого парку», що застосовують гібридну (аналогову та цифрову) обробку, формування квадратур прийнятих сигналів здійснюється на аналоговому рівні, далі відбувається їх аналого-цифрове перетворення та безпосередньо цифрова обробка.

Аналоговий спосіб формування квадратурних складових сигналів має цілий ряд суттєвих недоліків, основними з яких є апаратні неідентичності коефіцієнтів передачі (амплітудна неідентичність) каналів та похибки фазового зміщення квадратур (фазова квадратурна неідентичність).

Наявні недоліки суттєво знижують ефективність застосування ЦОС. Лише при використанні цифрових методів розкладання сигналу на квадратурні складові вдається позбутися вказаних недолі-

ків. Однак, на час створення РЛС «старого парку», цифрові методи формування квадратур не застосовувались. Насамперед, це пов'язано з відсутністю на той час відповідної елементної бази.

Враховуючи це, можна зробити висновок про те, що дослідження питань впливу неідентичності (різноканальності) квадратурних каналів на ефективність застосування схем ЦОС є важливим науково-технічним завданням.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В [1] та [2] розглянуто компенсатор імпульсних перешкод, алгоритм дії якого реалізує подвійне дискретне перетворення Хартлі (ДПХ) з одночасним відновленням уражених складових корисного сигналу в кепстральній площині. В [2] проводиться оцінка ефективності його роботи для випадку дії на когерентно-імпульсну РЛС несинхронних імпульсних перешкод (НІЗ), що випадковим чином уражають від одного до трьох дискрет дальності визначеної частотної пачки. При проведенні досліджень приймалось, що амплітудна та фазова характеристики формувача квадратур РЛС ідеальні. Однак це не так, і якщо компенсатор

використовувати для РЛС «старого парку», то не вирішеним залишається питання впливу на ефективність його застосування амплітудних та фазових неідентичностей квадратурних каналів.

Відомо [4], що при аналоговому методі формування квадратур, реальні фазові детектори виділяють квадратурні компоненти з нелінійними викривленнями та з коефіцієнтами передачі в каналах, що відрізняються один від одного. Як наслідок, при подачі на вхід формувача квадратур гармонійного сигналу, на його виході поряд з основною гармонікою з'являється хибна. Крім цього, основна гармоніка має амплітудні та фазові викривлення. Таким чином, нелінійність, різноканальність амплітудних характеристик квадратурних каналів, відхилення різниці фаз квадратур від 90° приводить до появи хибних сигналів.

Виходячи з цього, метою даної статті є оцінка впливу амплітудних та фазових неідентичностей квадратурних каналів на ефективність роботи компенсатора імпульсних перешкод, алгоритм дії якого реалізує подвійне ДПХ з одночасним відновленням уражених складових корисного сигналу в кепстральній площині.

Для проведення досліджень використовувались візуально-імітаційні моделі (ВІМ) компенсатора перешкод [1] та формувача квадратур [2] доповнені необхідними блоками, що дозволяють імітувати амплітудну неідентичність каналів та похибки фазового зміщення квадратур (фазову квадратурна неідентичність). Візуально-імітаційні моделі представлені у вигляді Simulink-моделей.

### Виклад основного матеріалу

Випадок застосування компенсатора імпульсних перешкод з регенерацією в РЛС «старого парку», де застосовується аналоговий спосіб формування квадратурних складових сигналів, показаний на рис. 1. Як видно з рисунка, до складу формувача квадратур входять два фазові детектори (ФД) (ФД =

= перемножувач + фільтр нижніх частот) та фазообертач напруги опорного колювання на 90°. Квадратурні компоненти сигналу (в цифровому виді) з виходів двох аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) подаються на компенсатор імпульсних перешкод, алгоритм дії якого реалізує подвійне ДПХ з одночасним відновленням уражених складових корисного сигналу в кепстральній площині. Після компенсації перешкод відбувається основна фільтрація сигналів в цифровій СРЦ РЛС (когерентне накопичення пачок імпульсів відбитих сигналів з метою поділу по фазовим фільтрам корисних сигналів і сигналів пасивних перешкод).

Представивши вхідний сигнал  $S(t)$  у комплексному виді  $\dot{S}_i = X_{ci} + jY_{si}$ , аналітичні вирази для синфазної та квадратурної складової сигналу на виході ідеального формувача квадратур можемо представити у векторному вигляді:

$$X_{ci} = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_k \ \dots \ x_N)^T, \quad (1)$$

$$Y_{si} = (y_1 \ y_2 \ y_3 \ \dots \ y_k \ \dots \ y_N)^T, \quad (2)$$

де для  $k$ -го періоду повторювання РЛС маємо:

$$x_k = U_{ck} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot F_d \cdot T \cdot k + \Psi_k),$$

$$y_k = U_{sk} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F_d \cdot T \cdot k + \Psi_k) -$$

косинусна та синусна складові прийнятого сигналу  $S(t)$ ;  $U_{ck}$ ,  $U_{sk}$  – амплітудні значення квадратур;  $F_d$  – частота Допплера;  $T$  – період слідування сигналів РЛС;  $\Psi_k$  – початкова фаза сигналів;  $N$  – кількість періодів когерентного накопичування сигналів в цифровій системі СРЦ РЛС.

Якщо прийняти синфазний канал еталонним  $x_k$ , а квадратурний викривленим (розбалансованим)  $y_{k-}$ , то, враховуючи амплітудні та фазові неідентичності реального формувача квадратур, у вираженнях для  $x_k$ ,  $y_k$  необхідно доповнити наступне:

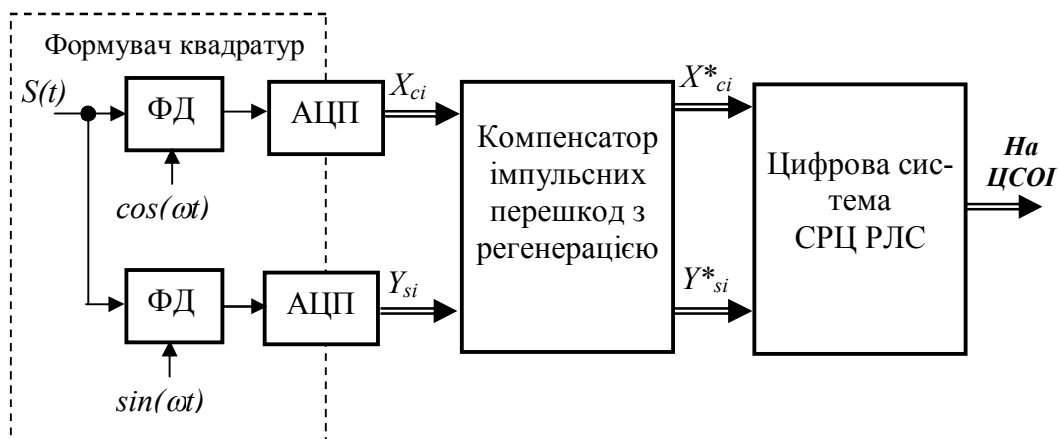


Рис. 1. Структурна схема формувача квадратур та варіант застосування компенсатора імпульсних перешкод з регенерацією в РЛС «старого парку»

$$x_k = U_{ck} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot F_d \cdot T \cdot k + \psi_k), \quad (3)$$

$$y_{k\_} = (1 \pm \Delta) \cdot U_{sk} \times \sin(2 \cdot \pi \cdot F_d \cdot T \cdot k + (\psi_k \pm \phi)), \quad (4)$$

де  $\Delta$  – амплітудна неідентичність каналів;  $\phi$  – фазова неідентичність каналів.

Для врахування різноканальності коефіцієнтів передачі квадратурних каналів (тобто різноканальності нахилу їх амплітудних характеристик), вираження для викривлених квадратурних компонентів  $x_{k\_}$ ,  $y_{k\_}$  можна представити такими виразами [4]:

$$x_{k\_} = K_{c.f.} \cdot x_k + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_{c.f.n} \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot x_k) + b_{c.f.n} \cdot \sin(\pi \cdot n \cdot x_k) \right];$$

$$y_{k\_} = K_{кв.} \cdot y_k + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_{кв.n} \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot y_k) + b_{кв.n} \cdot \sin(\pi \cdot n \cdot y_k) \right],$$

де  $K_{c.f.}$ ,  $K_{кв.}$  – середні нахили амплітудних характеристик квадратурних каналів;  $a_{c.f.n}$ ,  $a_{кв.n}$ ,  $b_{c.f.n}$ ,  $b_{кв.n}$  – коефіцієнти розкладання у ряд Фур'є хибного сигналу, що виникає за рахунок відхилення амплітудних характеристик від ідеальних.

Для проведення оцінки ефективності застосування компенсатора імпульсних перешкод, алгоритм дії якого реалізує подвійне ДПХ з одночасним відновленням (регенерацією) уражених складових корисного сигналу в кепстральній площині, імітувались дискретні значення квадратурних складових сигналів НІЗ та луна-сигналів від цілей для вибраного  $k$ -го дискрету дальності однієї частотної пачки. Імітатор квадратур сигналу допрацьований з врахуванням амплітудних та фазових неідентичності реального формувача квадратур, розрахованих за формулами наведеними вище для  $x_{k\_}$ ,  $y_{k\_}$ .

Вхідні дані для проведення імітаційного експерименту були такі:

середні нахили амплітудних характеристик квадратурних каналів були зафіксовані наступними значеннями:

$$K_{c.f.} = 1, K_{кв.} = 0.9;$$

коефіцієнти нелінійності:

$$a_{c.f.n} = 0; a_{кв.n} = 0;$$

значення коефіцієнтів нелінійності  $b_{c.f.1}$ ;  $b_{кв.1}$  змінювалось випадковим чином у діапазоні від 0 до 1 за рівномірним законом (рис. 2) (розглядався випадок, коли нелінійність представлена відрізками синусоїди);

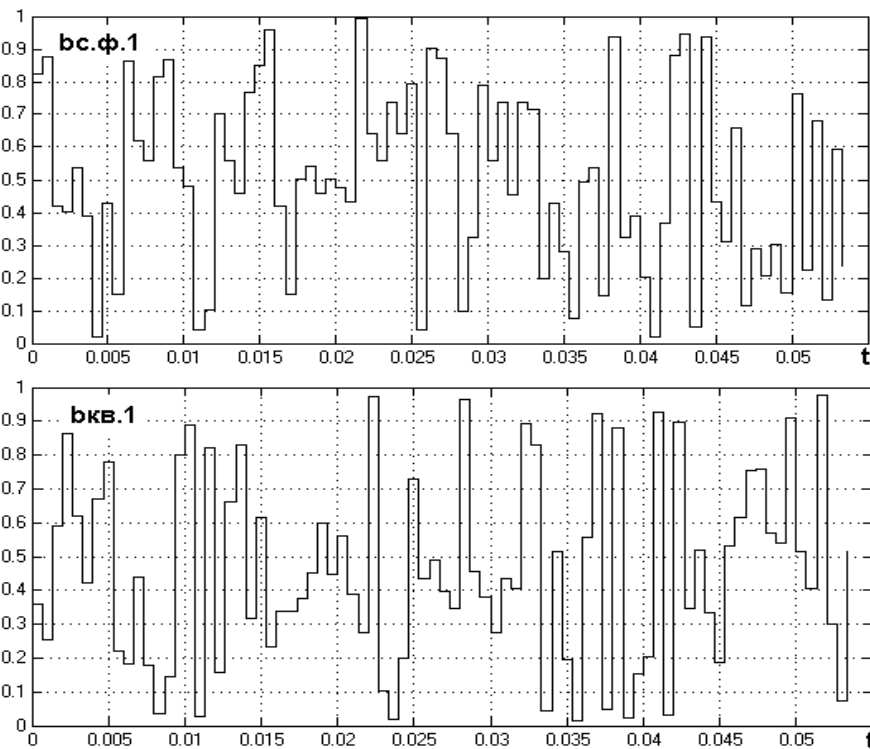


Рис. 2. Імітовані значення коефіцієнтів нелінійності  $b_{c.f.1}$ ,  $b_{кв.1}$

імітувалась повітряна ціль, що рухається з радіальною швидкістю  $V_r = 911.3$  км/год ( $\lambda=10$  см,  $F_d = 5063$  Гц), ехо-сигнали від цілі на вході компенсатора імпульсних перешкод з регенерацією амплі-

туда = 10 абс.од., початкова фаза =  $0^\circ$ , доплерівський зсув фази =  $135^\circ$ ;

імітувалась складна сигнально-перешкодова обстановка - на когерентно-імпульсну РЛС діє декілька

джерел НІЗ (загальна кількість уражених імпульсами НІЗ дискрет дальності однієї частотної пачки (8 Тп), k-го кільця дальності становить від одного до трьох); часовий розподіл уражень імпульсами НІЗ, амплітудні значення встановлювались для трьох випадків:

а) НІЗ №1:  
амплітуда = 150 абс.од.,  
час дії – ураження k-го дискрету дальності у 4-му періоді повторювання  $T_{п}$ ,  
початкова фаза =  $75^\circ$ ,

б) НІЗ №1:  
амплітуда = 150 абс.од.,  
час дії – ураження k-го дискрету дальності у 2-му періоді повторювання  $T_{п}$ ,  
початкова фаза =  $27^\circ$ ;

НІЗ №2:  
амплітуда = 150 абс.од.,  
час дії – ураження k-го дискрету дальності у 4-му періоді повторювання  $T_{п}$ ,  
початкова фаза =  $75^\circ$ ;

в) НІЗ №1:  
амплітуда = 150 абс.од.,  
час дії – ураження k-го дискрету дальності у 2-му періоді повторювання  $T_{п}$ ,  
початкова фаза =  $27^\circ$ ;

НІЗ №2:  
амплітуда = 150 абс.од.,  
час дії – ураження k-го дискрету дальності у 4-му періоді повторювання  $T_{п}$ ,  
початкова фаза =  $75^\circ$ ;

НІЗ №3:  
амплітуда = 200 абс.од.,  
час дії – ураження k-го дискрету дальності у 7-му періоді повторювання  $T_{п}$ ,  
початкова фаза =  $-70^\circ$ .

Фазова неідентичність імітувалась за рахунок введення фазового зміщення в одному з квадратурних каналів  $\phi$  згідно виразу (4). Фазове зміщення імітувалось випадковим чином за нормальним законом з нульовим середнім та параметром  $\sigma$ , що змінювався від  $0^\circ$  до  $30^\circ$ .

За результатами досліджень побудовані графіки, що відображають вплив амплітудних та фазових неідентичностей квадратурних каналів на ефективність застосування компенсатора НІЗ з регенерацією при різних кількостях уражень НІЗ.

Оскільки, за показник ефективності в даному випадку, приймається різниця між кількістю хибних регенерувань модуля спектральної щільності луна-сигналів цілі, при відсутності та при наявності неідентичностей, то у якості кількісного показника такої ефективності можемо використовувати ймовірність виникнення хибних регенерувань  $P_{ERROR}$ . Доцільно вважати, що достатньою мірою ефективності роботи даного компенсатора є виконання наступної умови –  $P_{ERROR} \leq 0,1$ .

Як видно з рис. 3, якщо НІЗ уражає k-й дискрет дальності в одному періоді (випадок а, крива 1), то різке зниження ефективності застосування компенсатора з регенерацією спостерігається лише при  $\sigma \geq 10^\circ$ . Для випадку ураження НІЗ k-го дискрету дальності у 2-му, 4-му періодах  $T_{п}$  (випадок б, крива 2), кількість хибних регенерувань за рахунок збільшення  $\sigma$  залишається майже такою ж.

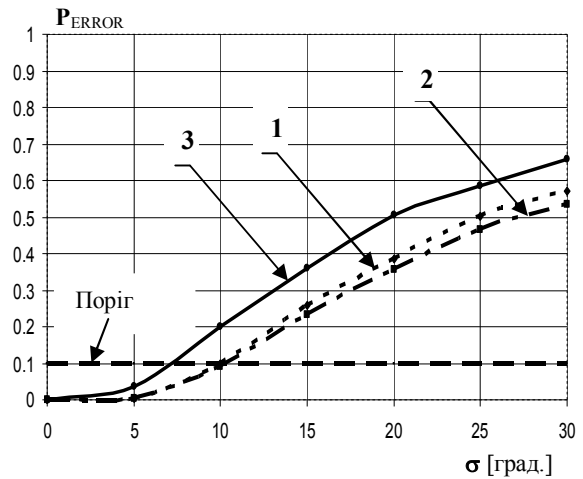


Рис. 3. Вплив неідентичностей квадратур на ефективність застосування компенсатора НІЗ з регенерацією для випадку 1-го, 2-х та 3-х уражень НІЗ

Якщо НІЗ уражає k-й дискрет дальності у 2-му та 4-му та 7-му періодах  $T_{п}$  (випадок в, крива 3), то різке зниження ефективності застосування компенсатора з регенерацією спостерігається лише при  $\sigma \geq 7^\circ$ .

Під час досліджень також встановлено, що на характер залежності  $P_{ERROR} = f(\sigma)$  впливу зазнає не тільки кількість уражень НІЗ дискрет дальності у визначеній частотній пачці, але й випадковий розподіл початкових фаз НІЗ. Так, при ураженні НІЗ k-го дискрету дальності лише у 7-му  $T_{п}$ , з амплітудним значенням = 200 абс.од., початковою фазою =  $-70^\circ$ , також спостерігається різке зниження ефективності застосування компенсатора з регенерацією при  $\sigma \geq 7^\circ$  (крива 3).

Якщо у відсотковому співвідношенні порівнювати вплив амплітудних та фазових неідентичностей, то при заданих вище умовах необхідно зазначити, що найбільшого впливу на ефективність застосування компенсатора НІЗ з регенерацією зазнає перш за все фазова неідентичність. Більше 90% помилкових регенерувань, насамперед, пов'язані не з амплітудною неідентичністю, а з фазовою.

Таким чином, за результатами досліджень можна зробити такі висновки.

Для забезпечення достатньої ефективності функціонування компенсатора імпульсних переш-

код з регенерацією в РЛС «старого парку», де застосовується аналоговий спосіб формування квадратур, необхідно забезпечити фазову квадратурну неідентичність не гірше  $\sigma \geq 7^\circ$ . Якщо умови, щодо фазової неідентичності каналів, виконати не вдається, необхідно передбачити застосування перед компенсатором відомих схем корекції квадратур.

## Висновки

Як видно з результатів проведених досліджень, ефективність застосування компенсатора НІЗ, що реалізує алгоритм регенерації уражених складових сигналу цілі в кепстральній площині, залежить від амплітудних та фазових неідентичностей квадратурних каналів.

Найбільшого впливу на ефективність застосування компенсатора НІЗ з регенерацією зазнає перш за все фазова неідентичність.

Подальші дослідження можна спрямувати у напрямку розробки різноманітних методів та схем корекції квадратурного розбалансу.

Оскільки амплітудні неідентичності в даному випадку були зафіксовані, то залишається потреба більш детально проаналізувати ефективність застосування компенсатора при різноманітних амплітудних неідентичностях.

## Список літератури

1. Оцінка ефективності застосування компенсатора імпульсних перехідів в складній сигнально-перешкодовій обстановці / І.М. Невмержицький, С.М. Ковалевський, А.А. Гризо, О.Л. Мельник // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 1 (34). – С. 82-86.

2. Компенсатор імпульсних перехідів, алгоритм дії якого реалізує подвійне дискретне перетворення Хартлі з одночасним відновленням уражених складових корисного сигналу в кепстральній площині / І.М. Невмержицький, С.М. Ковалевський, А.А. Гризо, С.В. Яровий // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 2(8) – С. 67 - 72.

3. Пат. 75793 Україна, МПК G01S 7/34, G01S 7/00. Компенсатор імпульсних перехідів з відновленням уражених складових корисного сигналу / Невмержицький І.М., Ковалевський С.М., Гризо А.А., Яровий С.В.; Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. - №U201207323; Заявл. 15.06.2012; Опубл. 10.12.2012, Бюл. №23.

4. Цифровые фильтры и устройства обработки сигналов на интегральных микросхемах: Справочное пособие / Ф.Б. Высоцкий, В.И. Алексеев, В.Н. Пачин и др.; Под ред. Б.Ф. Высоцкого. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.

Надійшла до редколегії 23.01.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕИДЕНТИЧНОСТИ КВАДРАТУРНЫХ КАНАЛОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЕНСАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ КЕПСТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА

І.М. Невмержицький, С.Н. Ковалевський, А.А. Гризо, В.В. Ковзун, А.А. Мачула

*В статті проводиться аналіз і оцінка впливу неідентичності квадратурних каналів на ефективність застосування компенсатора імпульсних поємок, алгоритм дії якого реалізує подвійне дискретне Хартлі з одночасним (регенерацією) уражених складових корисного сигналу в кепстральній області. Оцінка впливу на ефективність роботи компенсатора проводилась з урахуванням амплітудної та фазової неідентичності квадратурних каналів. Амплітудна і фазова неідентичність імітується відхиленням амплітудної та фазової характеристик каналів від ідеальної. Робота компенсатора імітувалась для випадку впливу на когерентно-імпульсну РЛС несинхронних імпульсних поємок, які випадковим чином будуть уражені від одного до трьох дискрет дальності однієї частотної пачки. За показателем ефективності приймається різниця між кількістю помилок регенерації модуля спектральної густоти сигналів ехо-сигнала, при відсутності та при наявності неідентичності. Показано, що неідентичність квадратур приводить до зниження ефективності застосування компенсатора, особливо в складній поємоковій обстановці.*

**Ключові слова:** компенсатор імпульсних поємок, амплітудна неідентичність, фазова квадратурна неідентичність, Хартлі, оцінка ефективності.

## RATING OF INFLUENCE NOT IDENTITY OF QUADRATURES CHANNELS ON EFFICIENCY OF APPLICATION OF THE EQUALISER OF PULSE JAM WITH REGENERATION CAPSTRAL OF COMPONENTS OF THE USEFUL SIGNAL

I.M. Nevmerzhtsky, S.N. Kovalevsky, A.A. Grizo, V.V. Kovzun, A.A. Machula

*In article the analysis and a rating of influence not identity of orthogonal channels on efficiency of application of the equaliser of pulse jam which algorithm of action realizes double discrete is spent transformation Hartly with simultaneous regeneration of the struck components of a useful signal in capstral planes. The rating of influence on an overall performance of the equaliser was spent in view of peak and phase not identity of orthogonal channels. Peak and phase not identity it is simulated by a deviation of peak and phase characteristics of channels from ideal. Job of the equaliser was simulated for a case of influence on coherently-pulse radar nonsynchronous pulse handicapes, which casual in the image will amaze from one up to three discret range of the certain frequency pack. For a parameter of efficiency is accepted difference between quantity erroneous regeneration the module of spectral density of signals of an echo - signal, at absence and at presence not identity. It is shown, that not identity quadratures results in decrease in efficiency of application of the equaliser, personsenno in difficult jam to conditions.*

**Keywords:** the equaliser of pulse handicapes, peak not identity, phase quadratures not identity, transformation Hartly, a rating of efficiency.