

УДК 621.396

І.М. Невмержицький, А.А. Гризо, І.І. Калініченко, Р.Ю. Клименко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ВІЗУАЛЬНО-ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИФРОВОГО КОМПЕНСАТОРА НЕСИНХРОННИХ ІМПУЛЬСНИХ ЗАВАД, ЩО РЕАЛІЗУЄ ПОДВІЙНЕ ДИСКРЕТНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ХАРТЛІ

Стаття присвячена візуально-імітаційному моделюванню цифрового компенсатора несинхронних імпульсних завад, що реалізує подвійне дискретне перетворення Хартлі. Візуально-імітаційна модель компенсатора несинхронних імпульсних завад створена завдяки використанню засобу візуального моделювання Simulink. Запропоновано два варіанти побудови компенсатора несинхронних імпульсних завад – в частотній та часовій площині. Надані рекомендації щодо використання запропонованої візуально-імітаційної Simulink-моделі компенсатора несинхронних імпульсних завад для планування та проведення широкого спектра досліджень.

**Ключові слова:** візуально-імітаційне моделювання, компенсатор несинхронних імпульсних завад, перетворення Хартлі.

### Вступ

**Постановка проблеми.** В [2] розглянута цифрова система селекції рухомих цілей (СРЦ), що реалізує дискретне перетворення Хартлі (ДПХ). Цікавим, при дослідженні впливу на СРЦ одиничної несинхронної імпульсної завади (НІЗ) виявився той факт, що після когерентної обробки сигналів, відгук НІЗ присутній у всіх фільтрах з однаковим модулем амплітуди, при цьому зсув фази між спектральними складовими НІЗ сусідніх фільтрів ДПХ постійний та визначається часом надходження одиничної завади на вхід системи СРЦ [2].

Проведені дослідження цифрової СРЦ в складній сигнально-завадовій обстановці (імітувався вплив декількох імпульсів НІЗ на одну частотну пачку зондувальних імпульсів) показали, що амплітудний портрет спектру суміші луна-сигналів та НІЗ перестає бути рівномірним. Так, в результаті моделювання, було встановлено, що у випадку дії на когерентно-імпульсну РЛС трьох НІЗ суттєво збільшується рівень когерентно накопиченої імпульсної завади на виході цифрової СРЦ, яка реалізує ДПХ.

Таким чином, присутність НІЗ сприяє збільшенню шумів у порівнянні з їх дійсним рівнем.

Збільшення рівня шумів, в свою чергу, призводить до погіршення показників якості виявлення цілей. Виявлювачі з системою стабілізації рівня хибних триггерів за дальністю сформулюють хибні сигнали виявлення за фільтрами ДПХ, в яких модуль спектральної складової завади найбільший. Враховуючи цей факт, візуально-імітаційне моделювання цифрового компенсатора несинхронних імпульсних завад, що реалізує подвійне дискретне перетворення Хартлі є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Компенсатори НІЗ, які використовують методи придушення імпульсних завад в трактах обробки сигналів РЛС на сьогодні достатньо досліджені та вивче-

ні. Так, наприклад, в [1] розглядається лінійна одноканальна цифрова система компенсації НІЗ, яка забезпечує виявлення та придушення імпульсних завад в дискреті дальності, що аналізується. Запропонований авторами [1] лінійний алгоритм компенсації НІЗ ґрунтується на використанні доплерівських фазових фільтрів, сформованих із коефіцієнтів дискретного перетворення Фур'є (ДПФ).

Ідеї, покладені в основу побудови даного алгоритму, спонукали авторів даної статті на створення компенсатора НІЗ для цифрової СРЦ, що реалізує дискретне перетворення Хартлі. Тому **метою даної статті** є створення цифрового компенсатора НІЗ, алгоритм виявлення та компенсації завад якого реалізує подвійне дискретне перетворення Хартлі.

Оцінка ефективності наведеного алгоритму проводилась завдяки візуально-імітаційному моделюванню. Візуально-імітаційна модель компенсатора НІЗ створювалась завдяки використанню пакету розширення Simulink системи MATLAB. Цей пакет має дружній інтерфейс, реалізує велику кількість стандартних математичних операцій, оснащений потужними графічними засобами комплексної візуалізації та має багаті бібліотеки спеціалізованих блоків типових підсистем. Все це надає широкі можливості для ефективної роботи спеціалістів різних галузей, про що свідчить їх активне використання в наукових дослідженнях та у навчальному процесі технічних університетів [2].

### Виклад основного матеріалу

Основні загальні етапи візуально-імітаційного моделювання цифрового компенсатора НІЗ, що реалізує подвійне перетворення Хартлі, засобами Simulink розкриті далі. Вони можуть бути розширені в залежності від ступеня деталізації системи, її складності, а також фахової підготовки розробника та можливостей пакету розширення Simulink.

Для побудови візуально-імітаційної моделі цифрового компенсатора НІЗ використовувались структурні схеми компенсатора НІЗ для двох варіантів компенсації: у частотній та часовій площині (рис. 1, а, б).

Дані схеми відображають у цілому алгоритм компенсації імпульсних завад, які потрапляють через приймальний тракт когерентно-імпульсної РЛС на вхід цифрової системи СРЦ, що реалізує ДПХ [2].

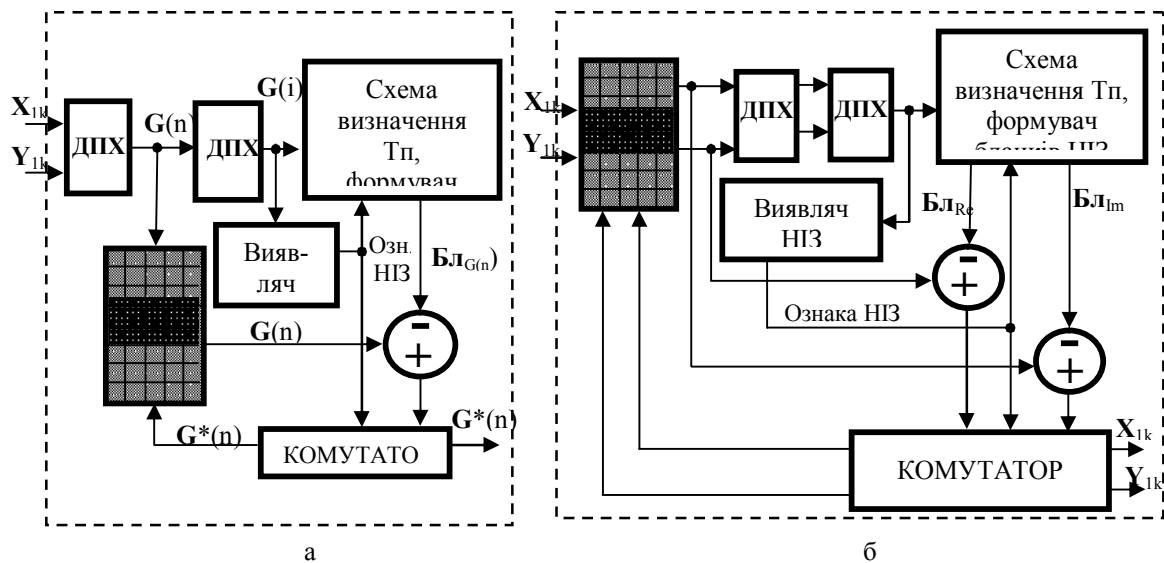


Рис. 1. Структурні схеми одноканальних цифрових компенсаторів НІЗ:  
а – частотна площина; б – часова площина

Структурний аналіз наведених схем компенсації показав, що основними елементами компенсатора НІЗ є: пристрій розрахунку ДПХ (для отримання спектру сигналів); пристрій виявлення НІЗ (пороговий пристрій, на виході якого формується сигнал „Ознака НІЗ” у випадку перевищення задовою порогу виявлення завади); схема визначення періоду повторювання зондувальних імпульсів ( $T_n$ ) та формувач бланків НІЗ (на виході даної схеми формуються імпульси бланків „Бл”). Решта елементів схем компенсації виконують другорядні функції: ОЗП – оперативний запам’ятовуючий пристрій (для зберігання спектру або квадратурних складових сигналу на час компенсації усіх виявлених імпульсних завад); пристрій віднімання та комутатор.

Вхідними сигналами компенсатора НІЗ є дискретні значення двох квадратурних складових сигналів (це луна-сигнали від цілей, підстиляючої поверхні та місцевих предметів, від штучно створюваних противником хмар півхвильових диполів та потужних гідро метеорних утворень, а також сигнали несинхронних імпульсних завад) з виходів АЦП ( $X_{ik}$  і  $Y_{ik}$ ).

Для імітації цих сигналів використовувалась вже розроблена у [2] Simulink-модель блоку імітації вхідних сигналів.

Для підтвердження та ілюстрації роботи Simulink-моделі імітатора вхідних сигналів, для випадку восьми фазових фільтрів ДПХ ( $N=8$ ), на рис. 2 наведені дискретні значення обох квадратурних складових  $X_{ik}$  і  $Y_{ik}$ , за умови ураження НІЗ  $k$ -го дискрету

дальності у 2-му періоді повторювання  $T_n$  (рис. 2, а) та  $k$ -го дискрету дальності у 2-му, 4-му та 6-му періоді  $T_n$  (рис. 2, б). Імітовані дискретні сигнали НІЗ (рис. 2). спостерігаються на фоні дискретних значень сигналів від цілі, для якої доплерівський зсув фази задавався таким, щоб відгук від неї накопичувався у третьому фазовому фільтрі ДПХ.

На вхід компенсаторів (рис. 1,а,б) з виходу імітатора надходять дискретні значення квадратурних складових сигналів НІЗ та луна-сигналів від цілей (рис. 2, а, б) для вибраного  $k$ -го дискрету дальності однієї частотної пачки (дискретні значення показані не як адитивна суміш, а окремо).

Сигнали НІЗ та луна-сигнали від цілей імітувались за наступних умов:

а) НІЗ№1: амплітуда - 100 абс.од., початкова фаза - випадкова, час дії – ураження  $k$ -го дискрету дальності у 2-му періоді повторювання  $T_n$ ; ціль: амплітуда – 10 абс.од., початкова фаза – 0, доплерівський зсув фази – 135;

б) НІЗ№1: амплітуда - 100 абс.од., початкова фаза - випадкова, час дії – ураження  $k$ -го дискрету дальності у 2-му періоді повторювання  $T_n$ ; НІЗ№2: амплітуда - 150 абс.од., початкова фаза - випадкова, час дії – ураження  $k$ -го дискрету дальності у 4-му періоді повторювання  $T_n$ ; НІЗ№3: амплітуда – 120 абс.од., початкова фаза – випадкова, час дії – ураження  $k$ -го дискрету дальності у 6-му періоді повторювання  $T_n$ ; ціль: амплітуда – 10 абс.од., початкова фаза – 0, доплерівський зсув фази – 135.

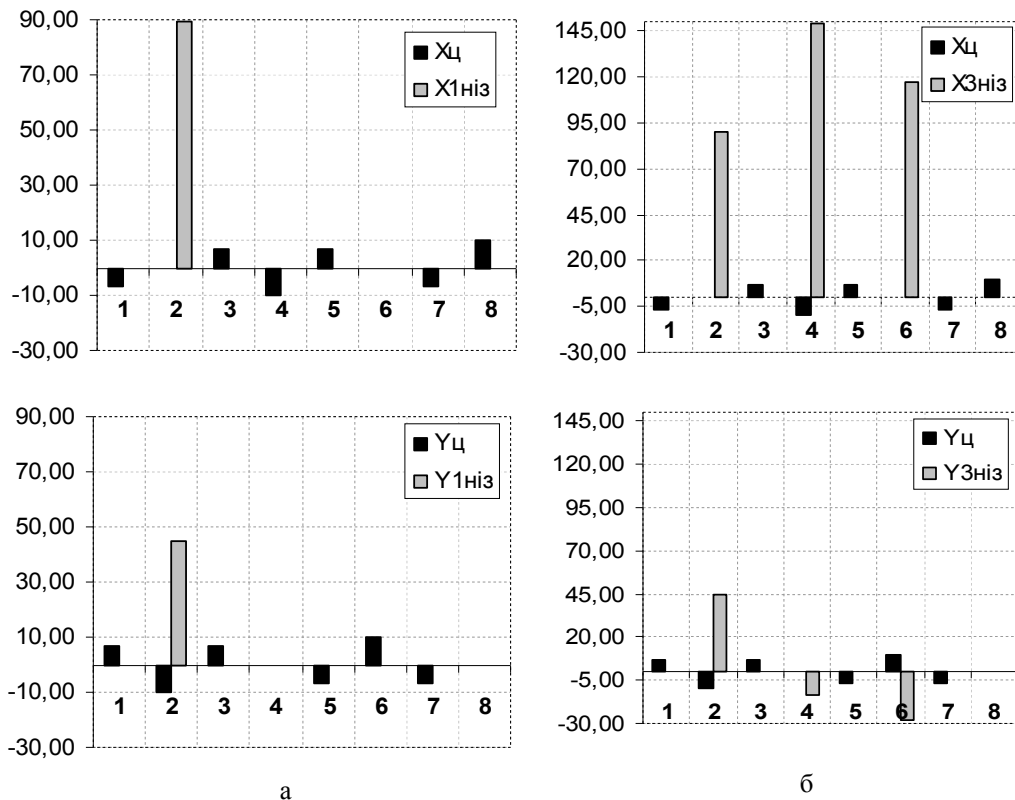


Рис. 2. Дискретні значення квадратурних складових луна-сигналів від цілей та сигналів НІЗ на виході імітатора за умови:  
 а – ураження НІЗ  $k$ -го дискрету дальності у 2-му періоді повторювання  $T_n$ ;  
 б – ураження НІЗ  $k$ -го дискрету дальності у 2-му, 4-му та 6-му періоді  $T_n$ .

Для проведення оцінки ефективності компенсації сигналів завад компенсатором, який реалізує подвійне ДПХ імітувались також і луна-сигнали від пасивних завад (ПЗ): амплітуда – 15 абс.од., початкова фаза – 0, доплерівський зсув фази – 0. На рис. 2, а, б дискретні значення ПЗ не показані, але у подальшому їх вплив буде врахований при проведенні дослідження.

Таким чином, адитивна суміш луна-сигналів від цілі, ПЗ та сигналів НІЗ подається на пристрій розрахунку ДПХ для отримання енергетичного спектру сигналу (рис. 3, а, б). Інформація про спектральні складові вхідного сигналу записується в ОЗП (рис. 1, а), де затримується на час, необхідний для проведення компенсації всіх імпульсних завад.

Як видно з рис. 3, а, за умови ураження  $k$ -го дискрету дальності одним імпульсом НІЗ енергетичний спектр на виході пристрою ДПХ рівномірний.

Повторне перетворення Хартлі від даного спектру (рис. 3, в) має різко виражений відгук у 7 фазових фільтрі.

За номером фільтру ДПХ, модуль амплітуди якого максимальний, можна визначити період повторювання зондувальних імпульсів, серед відгуків яких була присутня імпульсна завада [1].

За умови ураження  $k$ -го дискрету дальності де-

кількома імпульсами НІЗ енергетичний спектр на виході пристрою ДПХ перестає бути рівномірним (рис. 3, б). Повторне перетворення Хартлі від даного спектру (рис. 3, г) має вже різко виражені відгуки у 3, 5 та 7 фазових фільтрах.

Для виявлення впливу НІЗ у виявлювачі НІЗ відбувається послідовне порівняння модулів амплітуд фільтрів другого ДПХ з порогом виявлення імпульсної завади. При перевищенні відгуком фазового фільтру ДПХ порогу виявлення пристрій виявлювача НІЗ формує ознаку НІЗ, за якою відбувається виявлення моменту ураження завадою відповідного періоду повторювання та формування бланку на компенсацію цієї НІЗ.

В залежності від розгляду схеми компенсатора НІЗ (у частотній або часовій площині) для першого випадку формується бланк у вигляді відгуку восьми фазових фільтрів ДПХ на кожен одиничну імпульсну заваду ( $B_{G(n)}$ ), для другого бланки формуються для дискретних значень обох квадратурних складових  $X_{ik}$  і  $Y_{ik}$ , ( $B_{Re}$  і  $B_{Im}$ ).

Таким чином, повторно обробляючи спектральні складові вихідних сигналів пристрою ДПХ за алгоритмом ДПХ можна виявити та компенсувати всі наявні у аналізованому дискреті дальності імпульсні завади.

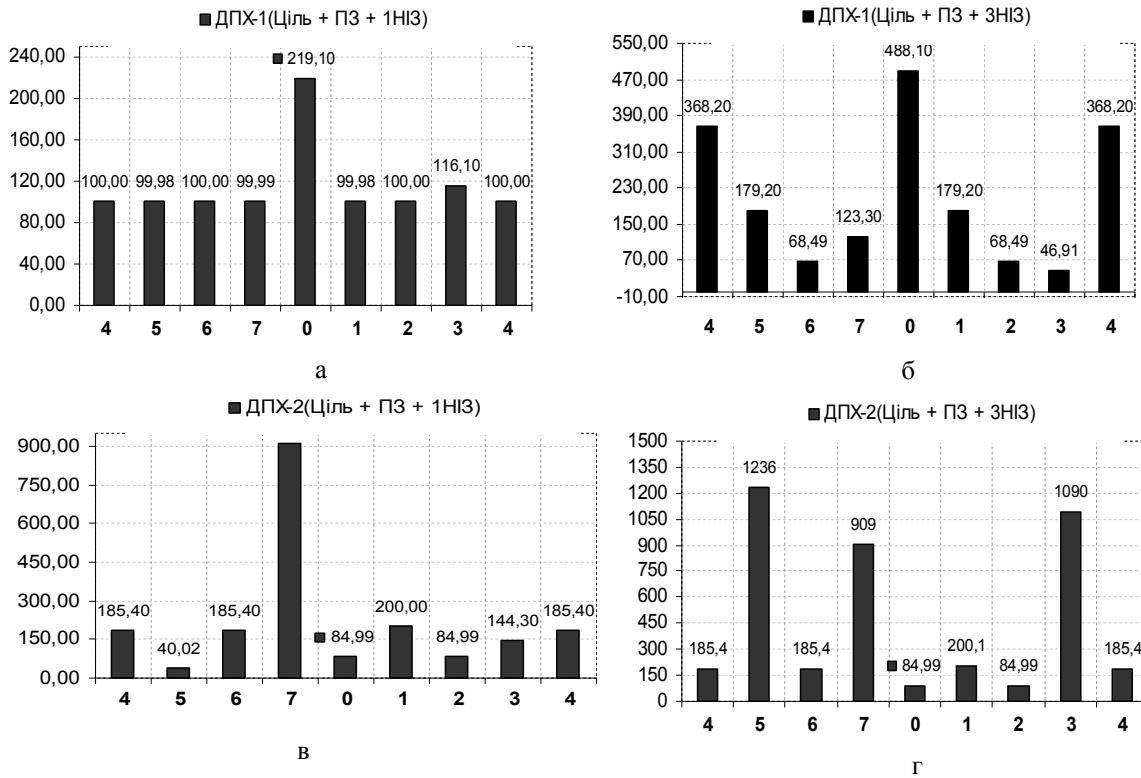


Рис. 3. Енергетичні спектри луна-сигналів від цілей, ПЗ та сигналів НІЗ на виході пристроїв ДПХ: а, в – перше, друге ДПХ – ураження НІЗ k-го дискрету дальності у 2-му періоді повторювання  $T_{п}$ ; б, г – перше, друге ДПХ – ураження НІЗ k-го дискрету дальності у 2-му, 4-му та 6-му періоді  $T_{п}$

Для оцінки ефективності компенсації імпульсних завад двома типами компенсаторів НІЗ (рис. 1, а, б) було проведено візуально-імітаційне моделювання цих компенсаторів із застосуванням пакету розширення Simulink системи MATLAB.

Результати моделювання наведені на рис. 4, де

показані модулі амплітуди спектрів вхідних сигналів за відсутності НІЗ (присутні луна сигнали лише від цілі та ПЗ) та при наявності додатково однієї НІЗ (Ціль+ПЗ+компенсація 1-ї НІЗ) та трьох НІЗ (Ціль+ПЗ+компенсація 3-х НІЗ).

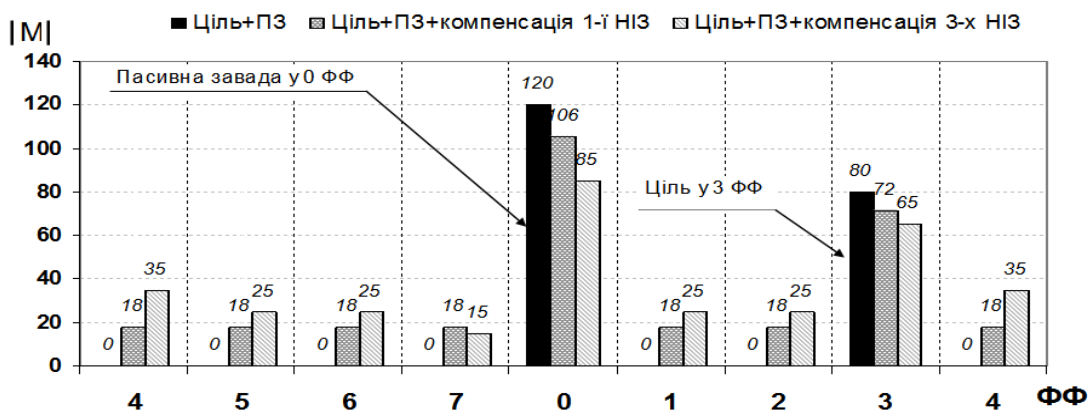


Рис.4 Модулі амплітуди спектрів вхідних сигналів за відсутності НІЗ та за наявності додатково однієї, та трьох НІЗ

Рисунок дозволяє наглядно оцінити ефективність роботи схеми компенсатора при заданій вхідній повітряній та завадовій обстановці.

За результатами моделювання можна зробити наступні висновки.

У випадку ураження НІЗ k-го дискрету дальності у 2-му періоді повторювання  $T_{п}$ , модуль спектральної щільності ПЗ збільшився майже в 2 рази (рис. 3, а – 219 абс.од.) у порівнянні з випадком відсутності НІЗ (рис. 4 – 120 абс.од.). Модуль спектральної

щільності цілі також збільшився майже на 50% (рис. 3, а – 116 абс.од.) у порівнянні з випадком відсутності НІЗ (рис. 4 – 80 абс.од.).

Для випадку компенсації НІЗ що уражає к-й дискрет дальності у 2-му періоді повторювання  $T_n$  спостерігається зменшення модуля спектральної щільності ПЗ на 11,6% (рис. 4 – 106 абс.од., за умови еталонного значення 120 абс.од.).

Для випадку компенсації НІЗ що уражає к-й дискрет дальності у 2-му, 4-му та 6-му періодах  $T_n$  спостерігається зменшення модуля спектральної щільності ПЗ на 29,2% (рис.4 -85 абс.од., за умови еталонного значення 120 абс.од.).

Що стосується когерентно накопиченої амплітуди цілі у 3 фільтри ДПХ, то: для випадку компенсації НІЗ що уражає к-й дискрет дальності у 2-му періоді повторювання  $T_n$  спостерігається зменшення модуля спектральної щільності цілі на 10% (рис. 4 – 72 абс.од., за умови еталонного значення 80 абс.од.); для випадку компенсації НІЗ що уражає к-й дискрет дальності у 2-му, 4-му та 6-му періодах  $T_n$  спостерігається зменшення модуля спектральної щільності цілі на 18,7% (рис. 4 – 65 абс.од., за умови еталонного значення 80 абс.од.).

Таке зменшення модулів спектральної щільності цілі пояснюється насамперед тим, що за рахунок повної компенсації впливу НІЗ, компенсується і відповідна дискретна складова вхідного сигналу. Рівень фону в ненульових фільтрах ДПХ, за рахунок повної компенсації впливу НІЗ, також зростає. Це особливо помітно за умови ураження к-го дискрету дальності у 2-му, 4-му та 6-му періодах  $T_n$ .

## Висновки

Завдяки використанню засобу візуально-імітаційного моделювання Simulink підтверджена можливість створення цифрового компенсатора НІЗ, алгоритм виявлення та компенсації завад якого реалізує подвійне дискретне перетворення Хартлі. Результати оцінки ефективності такого компенсатора у допустимій мірі співпадають з результатами оцінки ефективності компенсатора НІЗ, запропонованого авторами [1].

Подальші дослідження компенсатора НІЗ необхідно спрямувати у напрямку зменшення ефекту бланкування дискретних складових луна-сигналів ПЗ та цілей за рахунок компенсації імпульсних завад.

## Список літератури

1. Цифровая система компенсации несинхронных импульсных помех / В.А. Часовский, Н.П. Чернобородова, М.П. Чернобородов, Д.М. Пиза // *Радиоэлектроника. Информатика. Управление.* – 2002. – №2. – С. 41-44.
2. Візуально-імітаційне моделювання цифрової системи СРЦ, що реалізує дискретне перетворення Хартлі / І.М. Невмержицький, А.А. Гризо, І.І. Калініченко, Р.Ю. Кліменко // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України.* – Х.: ХУПС. – 2010. – Вип. 2(4). – С. 137-140.

Надійшла до редколегії 11.11.2010

Рецензент: д-р техн. наук, доц. Р.Є. Пашенко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### ВИЗУАЛЬНО-ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО КОМПЕНСАТОРА НЕСИНХРОННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО ДВОЙНОЕ ДИСКРЕТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ХАРТЛИ

И.М. Невмержицкий, А.А. Грызо, И.И. Калиниченко, Р.Ю. Клименко

Статья посвящена визуально-имитационному моделированию цифрового компенсатора несинхронных импульсных помех, реализующего двойное дискретное преобразование Хартли. Визуально-имитационная модель компенсатора несинхронных импульсных помех создана с помощью использования средства визуального моделирования Simulink. Предложены два варианта построения компенсатора несинхронных импульсных помех – в частотной и временной плоскости. Приведены рекомендации по использованию предложенной визуально-имитационной Simulink-модели компенсатора несинхронных импульсных помех для планирования та проведения широкого спектра исследований.

**Ключевые слова:** визуально-имитационное моделирование, компенсатор несинхронных импульсных помех, преобразование Хартли

### VISUAL - IMITATING MODELLING OF THE DIGITAL EQUALISER OF THE NONSYNCHRONOUS PULSE HANDICAPES REALIZING DOUBLE DISCRETE TRANSFORMATION HARTLY

I.M. Nevmerzhtsky, A.A. Grizo, I.I. Kalinichenko, R.Ju. Klimentko

Article is devoted to visual-imitating modelling of the digital equaliser of the nonsynchronous pulse handicapes realizing double discrete transformation Hartly. The visual-imitating model of the equaliser of nonsynchronous pulse handicapes is created with the help of use of means of visual modelling Simulink. Two variants of construction of the equaliser of nonsynchronous pulse handicapes – in a frequency and time plane are offered. Recommendations on use visual - imitating Simulink-models of the equaliser of nonsynchronous pulse handicapes for planning that carrying out of a wide spectrum of researches are resulted.

**Keywords:** visual-imitating modelling, the equaliser of nonsynchronous pulse handicapes, transformation Hartly