

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
ЖИТОМИРСЬКИЙ ВІЙСЬКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ С. П. КОРОЛЬОВА

**ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ, ВИПРОБУВАННЯ,
ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ
СКЛАДНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

19

Житомир
2020

Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : збірник наукових праць. Вип. 19 / Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова. – Житомир : ЖВІ, 2020. – 64 с. – ISSN 2076-1546. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2020.19>.

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова, протокол № 5 від 18.12.2020.

Науковий профіль видання:

122 – Комп’ютерні науки

125 – Кібербезпека

172 – Телекомунікації та радіотехніка

255 – озброєння та військова техніка

Головний редактор – ФРИЗ С. П., доктор технічних наук, професор (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна).

Відповідальний секретар – КАНЕВСЬКИЙ Л. Б., кандидат технічних наук (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна).

Члени редакційної колегії:

ВАСЮТА К. С., доктор технічних наук, професор (Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна);

ГРИЦУК Р. В., доктор технічних наук, професор (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна);

ЖУРАВСЬКИЙ Ю. В., доктор технічних наук, старший науковий співробітник (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна);

КОВБАСЮК С. В., доктор технічних наук, старший науковий співробітник (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна);

МЕРЧИК Зигмунт, доктор технічних наук, професор (Військова технічна академія, Республіка Польща);

САЦУК І. М., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна).

ISSN 2076-1546

Наукові статті, включені до збірника наукових праць, пройшли рецензування.

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21859-11759 ПР від 21.12.2015.

ЗМІСТ

Бугайов М. В., Брановицький В. В., Хоренко Ю. О. Аналіз ефективності методів спектрального оцінювання для виявлення акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів.....	4
Савчук В. С. Підхід до верифікації моделі цільової аудиторії психологічного впливу в соціальних мережах.....	16
Карашук Н. М., Цикалов І. А., Савенко В. О. Маловтратний опромінювач дзеркальної параболічної антени для систем радіомоніторингу каналів інформації радіорелейних ліній зв'язку.....	24
Гордієнко Ю. О., Лотошко А. О., Паплінський О. О. Способи обробки сейсмічних даних для вирішення завдань моніторингу іноземних випробувальних полігонів.....	31
Карашук Н. М., Соболєнко С. О., Савенко В. О., Цикалов І. А. Удосконалена методика розрахунку антени для систем радіомоніторингу бортових джерел радіовипромінювання.....	42
Самчишин О. В., Гуменюк І. В., Сметанін К. В., Бойченко О. С. Метод шифрування / розшифрування даних на основі піксельного алфавіту монохромного зображення.....	51
Автори випуску	61
Вимоги до оформлення матеріалів	63

М. В. Бугайов, В. В. Брановицький, Ю. О. Хоренко

**АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ СПЕКТРАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ДЛЯ
ВИЯВЛЕННЯ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ
АПАРАТІВ**

Однією з найважливіших складових протидії малорозмірним безпілотним літальним апаратам є їх своєчасне та надійне виявлення. Як демаскувальну ознаку для виявлення таких об'єктів на незначних відстанях можна використовувати шум повітряного гвинта. Для приймання сигналів акустичного випромінювання безпілотних літальних апаратів застосовують енергетичний або гармонічний детектор. За низьких відношень сигнал-шум, що найчастіше зустрічаються на практиці, гармонічний детектор забезпечує вищу ймовірність виявлення порівняно з енергетичним. Принцип дії гармонічного детектора полягає в спектральному аналізі акустичних сигналів. Запропоновано математичну модель акустичного сигналу безпілотного літального апарата літакового типу. Показано, що на коротких інтервалах часу (десятки мілісекунд) такі сигнали можна розглядати як стаціонарні, для їх аналізу використовувати відомі методи спектрального оцінювання. Для обробки сигналів акустичного випромінювання безпілотного літального апарата розглянуто непараметричні, параметричні та підпросторові методи спектрального оцінювання. З метою їх порівняльного аналізу використано статистичний показник якості, який можна розрахувати як варіацію оцінки спектральної щільності потужності. Даний показник характеризує метод спектрального оцінювання щодо роздільної здатності за частотою та можливості виділяти гармонічні складові сигналу із шуму і не створювати шумових викидів, які за амплітудою перевищують сигнальні. У результаті досліджень було встановлено, що за високих відношень сигнал-шум параметричні методи є більш ефективними, ніж непараметричні. Проте таке твердження справедливе лише в разі правильного вибору порядку моделі. Показано, що застосування підпросторових методів є недоцільним для аналізу акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів. Використання значення статистичного показника якості як порога для прийняття рішення про наявність або відсутність акустичного сигналу безпілотного літального апарата в прийнятій реалізації та його подальшого оброблення доцільне для значень відношення сигнал-шум вище 5 дБ.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; спектральне оцінювання; акустичний сигнал; періодограма; статистичний показник якості.

Постановка проблеми в загальному вигляді. З кожним роком безпілотні літальні апарати (БПЛА) дозволяють вирішувати все більшу кількість завдань як у цивільній, так й у військовій сферах, що розширює перелік загроз, які вони можуть створювати. Однією з найважливіших складових протидії малорозмірним низьковисотним та малошвидкісним БПЛА є їх своєчасне й надійне виявлення. Такі літальні апарати мають, як правило, незначні розміри й оснащені електричним двигуном (ЕД). Як демаскувальну ознаку для виявлення цих об'єктів на незначних відстанях можна використовувати шум повітряного

гвинта. Для приймання сигналів акустичного випромінювання БпЛА широкого поширення набуло застосування решіток із мікрофонів [1–3]. Для подальшої обробки сигналів використовують енергетичне або гармонічне детектування [3]. За низьких відношень сигнал-шум (ВСШ), що найчастіше зустрічаються на практиці, гармонічний детектор забезпечує вищу ймовірність виявлення порівняно з енергетичним. Принцип дії гармонічного детектора полягає в спектральному аналізі акустичних сигналів. На даний час відома значна кількість методів оцінювання спектрального складу сигналів [4–7]. Кожен з них має свої переваги та недоліки в разі застосування в конкретній ситуації. Тому актуальним є завдання дослідження ефективності методів спектрального аналізу для виявлення акустичних сигналів БпЛА.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До характеристик акустичних сигналів малорозмірних БпЛА останнім часом проявляють підвищений інтерес через різке зростання їх кількості, а також через стрімкий розвиток пристроїв та алгоритмів цифрової обробки сигналів, що дає змогу простіше й надійніше їх виявляти порівняно з аналоговою обробкою [8–18]. Проте на даний час відсутній вичерпний математичний апарат, що дозволяв би надійно виявляти сигнали акустичного випромінювання БпЛА на фоні шумів. Більшість дослідників із цією метою використовують методи на основі аналізу Фур'є, не розглядаючи можливості застосування перспективних підходів для розв'язання даної задачі.

Формулювання завдання дослідження. Метою даної статті є проведення аналізу ефективності методів спектрального оцінювання для виявлення акустичних сигналів БпЛА та формулювання рекомендацій щодо їх практичного застосування.

Виклад основного матеріалу

1. Створення моделі акустичних сигналів БпЛА. Розглянемо БпЛА літакового типу з ЕД. Основним джерелом шуму в ньому є повітряний гвинт. Акустичний шум утворюється, в основному, у результаті силової взаємодії лопатей гвинта з навколишнім середовищем у процесі створення тяги і витіснення повітря з фіксованого об'єму середовища лопатями. Генерація акустичного випромінювання може також відбуватися і в разі аеродинамічної взаємодії лопатей із турбулентними утвореннями в набігаючому потоці. Відповідно до цього шум малонавантаженого гвинта поділяють на шум обертання і широкосмуговий шум.

До точки спостереження будуть доходити імпульси, викликані проходженням кожної лопаті, що збурює повітря. Дані збурення відбуваються стільки разів, скільки лопатей M має гвинт. Оскільки шум обертання має визначену частоту, то про шум гвинта можна говорити як про звук певного тембру, тобто в ньому є гармоніки.

Отже, акустичний сигнал БпЛА є сумою гармонік із частотами, кратними частоті обертання ротора двигуна F . Амплітуди гармонік, як правило, зменшуються зі збільшенням частоти. Здебільшого амплітуди гармонік є випадковими величинами. Фази гармонік також є випадковими величинами, розподіленими за рівномірним законом. Математична модель прийнятого акустичного сигналу повітряного гвинта БпЛА може бути подана у такому вигляді:

$$s(t) = \sum_{i=1}^K A_i \cos(2\pi MF \cdot i \cdot t + \varphi_i) + \xi(t), \quad (1)$$

де K – кількість гармонік акустичного випромінювання, що розглядають;

A_i – амплітуда i -ї гармоніки;

φ_i – фаза i -ї гармоніки;

$\xi(t)$ – білий гаусівський шум.

На коротких інтервалах часу (десятки мілісекунд) такі сигнали можна розглядати як стаціонарні й для їх аналізу використовувати відомі методи спектрального оцінювання.

2. Огляд методів спектрального оцінювання. Для обробки сигналів акустичного випромінювання БпЛА розглянемо непараметричні, параметричні та підпросторові методи спектрального оцінювання. Вони досить повно описані в [5], тому в даній роботі наведемо коротку характеристику тих методів, що найчастіше використовуються на практиці.

У подальшому вхідний сигнал будемо описувати в дискретній формі $x[n]$, де $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ – номер вибірки послідовності, що є адитивною сумішшю корисного сигналу $s[n]$ та білого шуму $\xi[n]$.

Непараметричні методи отримання оцінок спектральної щільності потужності (СЩП) використовують лише вибірки вхідного сигналу. Найпростішим методом спектрального оцінювання є періодограма, яка обчислюється як нормований квадрат модуля швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Частотний відлік з індексом k періодограми довжиною N відліків розраховують за таким виразом:

$$X[k] = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \right|^2. \quad (2)$$

Даному підходу властиві два суттєві обмеження: частотне розділення обмежується тривалістю часу аналізу й витіканням внаслідок обробки прямокутним вікном. Модифікована періодограма використовує віконну обробку сигналу в часовій області для згладжування країв сигналу та зменшення таким чином ефекту витікання. Використання непрямокутних вікон розширює головну пелюстку ШПФ сигналу і збільшує втрати порівняно з прямокутним вікном [19].

Більш сучасним методом непараметричного спектрального аналізу є багатоканальний метод, спектральна оцінка в якому отримується за рахунок об'єднання значної кількості ортогональних вікон. Замість використання смугових прямокутних даних метод використовує набір оптимальних фільтрів. Ці оптимальні нерекурсивні фільтри походять від дискретних сфероїдних послідовностей Слєпіана. Компроміс між розділенням та середньквадратичним відхиленням (СКВ) оцінок СЩП досягається зміною добутку частоти та смуги частот nw , що безпосередньо пов'язаний з кількістю каналів, які використовуються для обчислення спектра. З метою формування спектральних оцінок використовують $2nw-1$ каналів. Зі збільшенням nw СКВ спектральних оцінок зменшується. Проте смуга частот кожного каналу також пропорційна nw , тому зі збільшенням даного добутку збільшується витікання спектра і спектральні оцінки стають більш зміщеними. Тому для кожної послідовності даних є таке значення nw , що забезпечує компроміс між зміщенням і СКВ.

До параметричних належать такі методи, у яких сигнал вважається виходом лінійної системи, на вхід якої подається білий шум. Параметричні методи можуть дати вищу роздільну здатність порівняно з непараметричними для коротких послідовностей даних. Ці методи використовують різні підходи для спектрального оцінювання. Замість спроб отримати оцінки СЩП безпосередньо із сигналу, у них розраховуються параметри лінійної системи. Авторегресійний (АР) процес описують таким різницеvim рівнянням:

$$x[n] = -\sum_{l=1}^p a[l]x[n-l] + \xi[n], \quad (3)$$

де $a[l]$ – параметри АР моделі, а $\xi[n]$ виступає в ролі послідовності для збудження системи.

Метод спектрального оцінювання Юла – Уолкера розраховує параметри АР шляхом формування зміщених оцінок автокореляційної функції сигналу і знаходження методом найменших квадратів помилки передбачення вперед. Метод Берга для АР спектрального оцінювання ґрунтується на мінімізації помилок передбачення вперед і назад. Він забезпечує стабільність АР моделі та є ефективним щодо обчислення. Порядок АР моделі методів Юла – Уолкера та Берга p не повинен перевищувати довжини вхідної послідовності N . До параметричних належать методи коваріацій та модифікованих коваріацій. Порядок цих моделей не повинен перевищувати половини довжини вхідної послідовності.

Проблема практичного застосування параметричних методів полягає у виборі порядку моделі АР, для чого запропоновано кілька критеріїв (Акаїке, Парзен) [5]. Результати оцінювання СЩП для використання цих критеріїв мало відрізняються один від одного, у разі реальних зашумлених даних жоден з них не забезпечує задовільних результатів (дають занижені значення p). Для аналізу коротких сегментів даних запропоновано порядок моделі обрати рівним від $N/3$ до $N/2$.

Найбільш поширеним на практиці методом вибору оптимального значення порядку моделі АР є метод перебору, коли за деякого фіксованого значення p оцінюють відповідні значення параметрів моделі, за тими чи іншими критеріями визначають якість отриманої апроксимації спостережень, і далі процес повторюється для нового значення p . Остаточно обирається те значення p , для якого якість апроксимації виявилася найвищою.

Підпросторові методи, відомі також як методи з надрозділенням, формують спектральні оцінки сигналу на основі його розкладу на власні вектори кореляційної матриці. Прикладами даних методів є MUSIC (multiple signal classification) та метод власних векторів EV (eigenvector), які найкраще підходять для лінійчатих спектрів (спектрів суми гармонічних сигналів) і є ефективними для виявлення синусоїд за низьких ВСШ. Цей тип спектрального аналізу розділяє інформацію кореляційної матриці на сигнальний та шумовий підпростори. Кількість комплексних синусоїд P для моделювання сигналу не повинна перевищувати половини довжини послідовності.

Методи оцінювання частоти на основі аналізу власних значень автокореляційної матриці або відповідної матриці даних становлять собою клас методів спектрального оцінювання, що забезпечують кращі характеристики розділення й оцінювання частоти, ніж АР методи. Ключовою операцією в них є розділення інформації, що міститься в автокореляційній матриці або матриці даних, на два векторні підпростори: сигналу

і шуму. Таке розділення найбільш ефективно, якщо є апіорна інформація про кількість синусоїдальних компонент, присутніх у сигналі, або власні значення сигнальних векторів більші власних значень шумових векторів. Після виконання процедури розкладу матриці за векторами сигналу і шуму можна визначати різні функції від векторів сигналу й шуму для отримання оцінок частоти, які проте не будуть оцінками істинної СЩП, оскільки інтенсивність піків не пропорційна потужності синусоїд.

3. Аналіз ефективності методів спектрального оцінювання акустичних сигналів БпЛА. Для проведення порівняльного аналізу різних методів спектрального оцінювання будемо використовувати запис акустичного сигналу БпЛА з ЕД і повітряним гвинтом з трьома лопатями. Частота дискретизації сигналу $F_s = 8$ кГц, довжина послідовності $N = 512$. Часова реалізація та спектрограма даної послідовності відліків наведені на рис. 1.

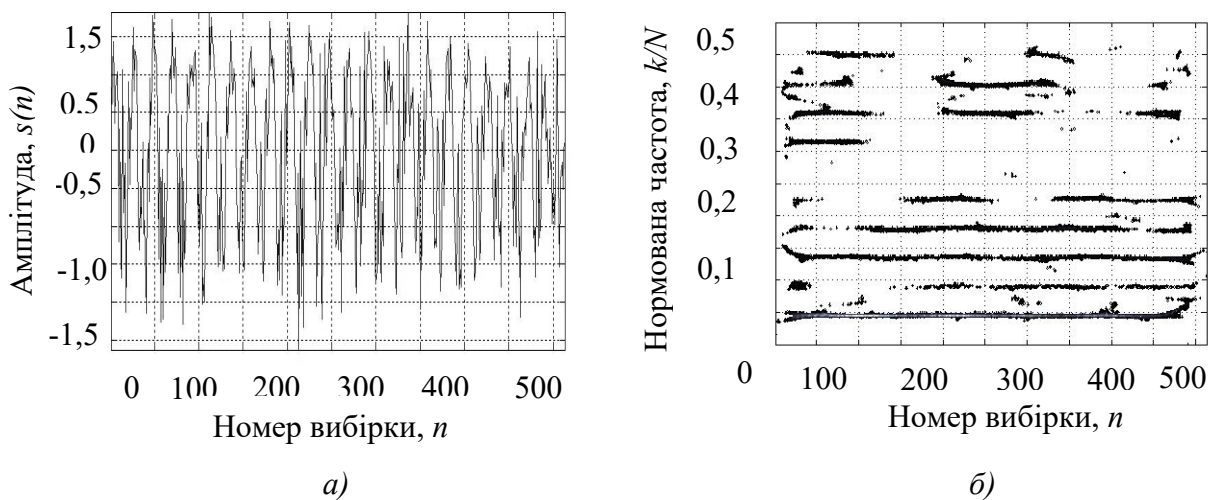


Рис. 1. Часова реалізація (а) та спектрограма (б) акустичного сигналу

У табл. 1 наведено номери бінів k та їх відносні амплітуди $X[k]$ вхідного (незашумленого) сигналу, отримані за допомогою періодограми з прямокутним вікном. Значення з даної таблиці будемо використовувати як еталонні для дослідження ефективності інших методів спектрального оцінювання.

Таблиця 1

Номери бінів та їх відносні амплітуди для вхідної послідовності $x[n]$

k	24	47	70	93	117	185	208
$X[k]$	1	0,0425	0,1191	0,1025	0,0242	0,0349	0,0289

Як показник ефективності методів спектрального аналізу будемо використовувати роздільну здатність за частотою (ширину спектральних ліній) та спроможність виділяти гармонічні складові сигналу в шумові й не створювати шумових викидів, які за амплітудою перевищують сигнальні. Об'єднаємо ці показники в один – статистичний показник якості, що можна визначати як відношення дисперсії оцінки СЩП до квадрата середнього значення цієї оцінки [20]:

$$Q = \frac{\text{var}(X)}{\text{mean}(X)^2}, \quad (4)$$

$$\text{mean}(X) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X[k], \quad \text{var}(X) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (X[k] - \text{mean}(X))^2. \quad (5)$$

Даний показник безпосередньо пов'язаний зі статистичною стійкістю спектральної оцінки. Для незначної кількості вузьких піків СЦП, що відповідає акустичному сигналу БПЛА, $\text{mean}(X)$ буде малим, а отже, Q великим (рис. 2а). Даний випадок відповідає високим значенням ВСШ q . У разі зменшення ВСШ кількість шумових викидів та їх амплітуда зростатиме, що призведе до збільшення значення $\text{mean}(X)$, а це, у свою чергу, зменшить значення Q (рис. 2б). Зменшення q для непараметричних методів спектрального оцінювання завжди призводить до зменшення Q .

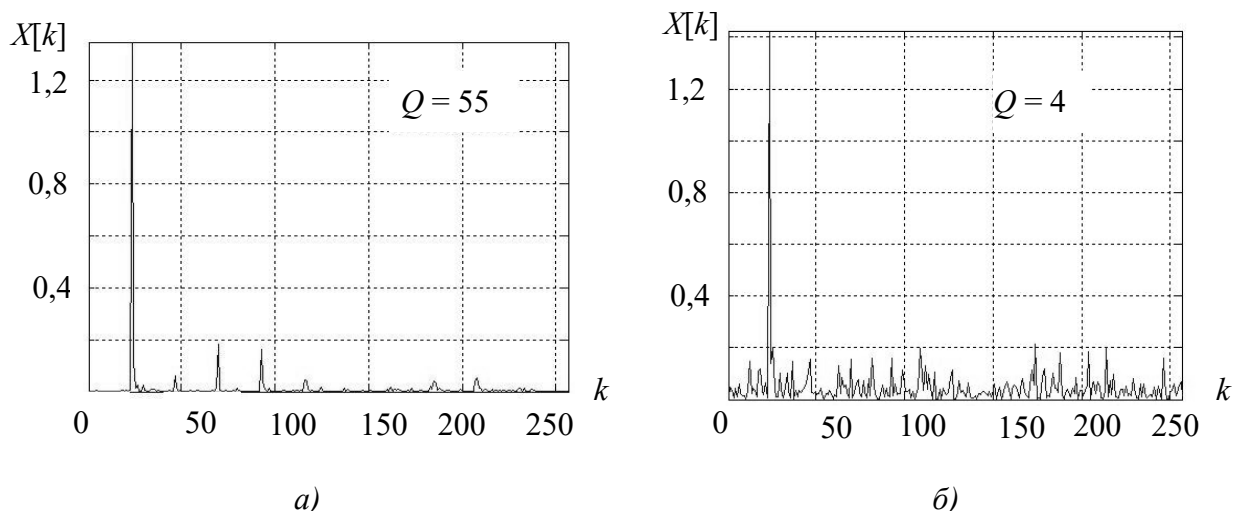


Рис. 2. Оцінки СЦП методом періодограм із прямокутним вікном для $q = 10$ дБ (а) та $q = -5$ дБ (б)

Для параметричних та підпросторових методів малі значення Q можуть з'являтися навіть за досить високих ВСШ. Це є наслідком неправильного вибору порядку моделі АР для параметричних методів (на рис. 3а p обрано надто малим) або кількості комплексних синусоїд для підпросторових методів (на рис. 3б P обрано надто великим). Проте в будь-якому разі малі значення Q вказують на низьку якість отриманих спектральних оцінок акустичних сигналів БПЛА.

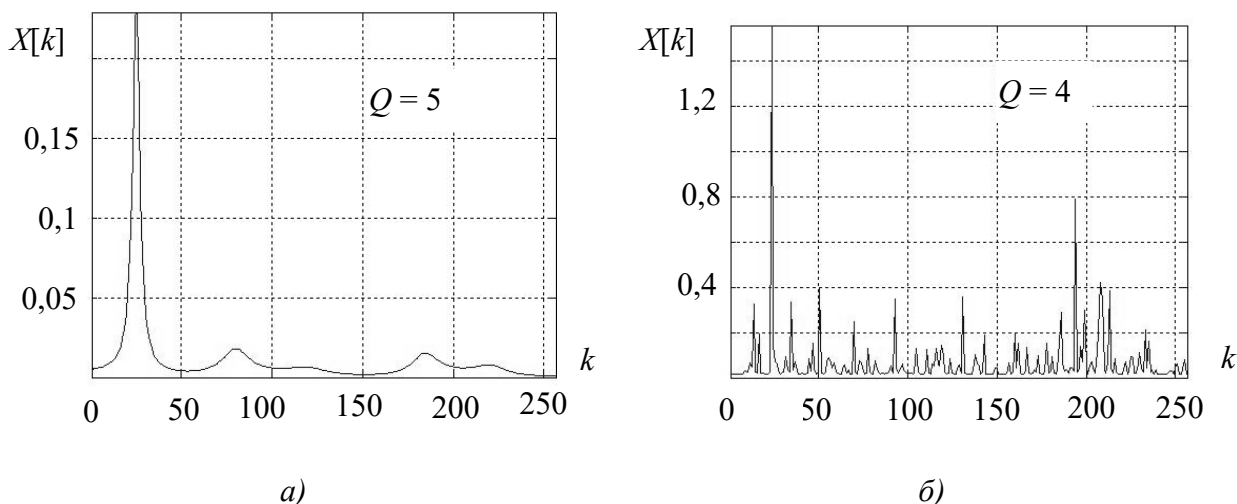


Рис. 3. Оцінка СЦП за $q = 10$ дБ методом Берга для значення порядку АР $p = 10$ (а) та методом MUSIC для кількості гармонік $P = 150$ (б)

Аналіз ефективності методів спектрального оцінювання було проведено за допомогою комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB. Суть експерименту полягала в додаванні до запису акустичного сигналу БпЛА білого гаусівського шуму, сформованого за допомогою функції `randn`, та розрахунку для кожного методу спектрального оцінювання для різних ВСШ статистичного показника якості відповідно до виразу (4). Значення Q для кожного методу розраховувалося усередненням за 1000 реалізацій СЦП. Результати моделювання наведено на рис. 4.

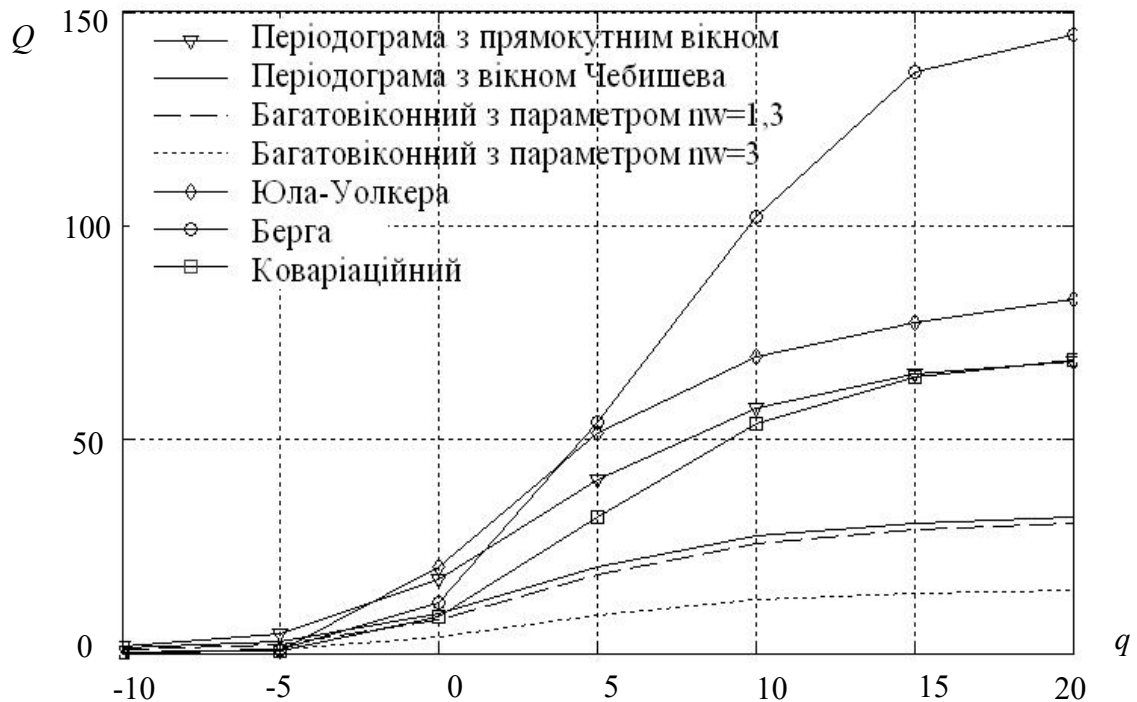


Рис. 4. Залежність статистичного показника якості методів спектрального оцінювання від ВСШ

На рис. 4 видно, що за високих ВСШ параметричні методи є більш ефективними порівняно з непараметричними. Проте таке твердження буде справедливим лише в разі правильного вибору порядку моделі. Під час проведення експерименту для кожного значення ВСШ параметр AR моделі обирався таким чином, щоб отримана СЦП була максимально наближеною до еталонних даних (табл. 1), тобто щоб не виникали хибні максимуми і не спотворювалося співвідношення між амплітудами бінів. Для високих ВСШ ($q > 10$ дБ) порядок моделі можна обирати досить високим (близьким до гранично можливого). У разі зниження ВСШ порядок моделі необхідно зменшувати, оскільки високі значення p призводять до розщеплення спектральних ліній, появи значних шумових викидів та спотворення значень відносних амплітуд гармонік, тобто перерозподілу енергії сигналу між його складовими. Зниження порядку моделі хоча й усуває ці негативні фактори, проте призводить до зміщення спектральних ліній (чим менше q , тим більше зміщення) та їх розширення, що також знижує значення Q . Під час роботи з реальними сигналами за невідомого значення ВСШ значення порядку AR доцільно обирати на рівні $p \approx 0,1N$, що є оптимальним за $q \approx 0$ дБ, і далі збільшувати та зменшувати його й відстежувати зміну значення Q . Робочим обрати необхідно те значення p , за якого Q буде максимальним.

Окремо варто розглянути підпросторові методи. Навіть за високих значень ВСШ ($q \geq 10$ дБ) неможливо визначити стратегію вибору кількості комплексних синусоїд P для адекватного відображення спектрального складу сигналу. Метод MUSIC є нестабільним навіть за малих значень P , що проявляється в перерозподілі енергії сигналу між складовими та зміщенні спектральних ліній відносно їх дійсного положення. Тому на рис. 4 результати моделювання для даного методу не відображені, а його застосування для виявлення акустичних сигналів БпЛА є недоцільним.

Для білого гаусівського шуму всі методи спектрального оцінювання (крім підпросторових) дають значення Q у межах від 0 до 2 (для параметричних порядок моделі повинен бути при цьому не вище 100). На рис. 5 показана залежність статистичного показника якості для різних порядків моделей AP , вираженого в частках довжини послідовності. Як бачимо, для малих порядків моделі ($p \leq 0,12N$) методи Юла – Уолкера, Берга та коваріаційний дають практично однакові значення Q .

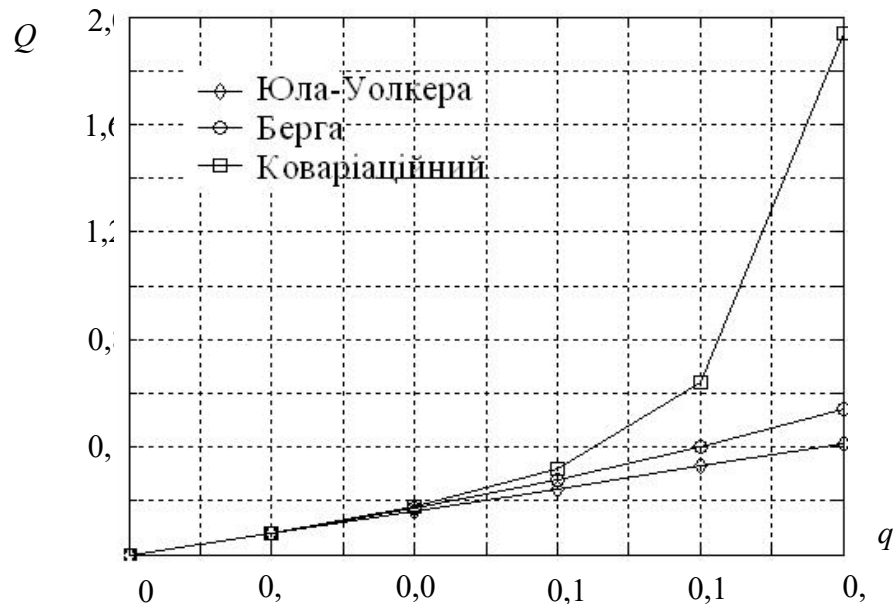


Рис. 5. Залежність статистичного показника якості методів спектрального оцінювання для білого шуму від порядку моделі AP

Для періодограми $Q \approx 0,99$, причому застосування вагової обробки майже не впливає на це значення. Для багатовіконного методу за $nw = 1,3$ значення $Q = 0,51$ і зменшується в разі збільшення даного добутку.

Не дивлячись на те, що отримане значення Q перевищує дане значення для відповідного методу спектрального аналізу для шуму, слабкі гармоніки акустичного сигналу БпЛА можуть бути повністю замасковані шумовими викидами.

Висновки. Використання значення статистичного показника якості як порога для прийняття рішення про наявність або відсутність акустичного сигналу БпЛА в прийнятій реалізації та його подальшого оброблення доцільно використовувати для значень ВСШ більше 5 дБ. Серед параметричних методів найбільш ефективними є методи Юла – Уолкера та Берга, а з-поміж непараметричних – періодограма без вагової обробки. В умовах невизначеності щодо значення ВСШ вибір порядку моделі AP здійснюється методом перебору, починаючи зі значення $p \approx 0,1N$.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку варто зосередити на розробленні алгоритмів виявлення акустичних сигналів БПЛА, для яких метод спектрального оцінювання можна динамічно змінювати залежно від сигнально-завадової обстановки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zelnio A. M. Detection of small aircraft using an acoustic array. Thesis. B.S. Electrical Engineering, Wright State University, 2007. 55 p.
2. Зінченко С. А., Свіжевський В. Ф. Пасивна акустична система виявлення безпілотних літальних апаратів Тези доп. наук.-тех. конф. // [Інформаційна безпека України], (Київ, 12–13 березня 2015 р.). Київ : КНУ, 2015. С. 74–75.
3. Minas B., Goldman G. H. Acoustic detection and tracking of a class I UAS with a small tetrahedral microphone array. Adelphi, MD 20783–1138, ARL-TR-7086 Report. 2014. 34 p.
4. Stoica P., Moses L. R. Introduction to spectral analysis. New Jersey, Prentice Hall. 1997. 345 p.
5. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. Москва : Мир, 1990. 584 с.
6. Шахтарин Б. И., Ковригин В. А. Методы спектрального оценивания случайных процессов. Москва : Гелиос АРВ, 2005. 248 с.
7. Moon T. I., Stirling W. C. Mathematical Methods and Algorithms For Signal Processing. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River. New Jersey, 2000. 978 p.
8. Sinibaldi G., Marino L. Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV // Applied Acoustics. 2013. № 74. P. 79–88.
9. Saravanakumar A., Senthilkumar K. Exploitation of Acoustic signature of low flying Aircraft using Acoustic Vector sensor // Defence Science Journal. March 2014. Vol. 64, №. 2. P. 95–98.
10. Massey K., Gaeta R. Noise Measurements of Tactical UAVs // 16th AIAA 2010-3911/CEAS Aeroacoustics Conference. 2010. P. 1–16.
11. Harvey B., O’Young S. Acoustic Detection of a Fixed-Wing UAV // Drones. 2018. № 1. <https://doi.org/10.3390/drones2010004>
12. Pham T., Srour N. TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs // U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE. 2004. Vol. 5417. P. 24–29.
13. Dumitrescu C. et al. Development of an Acoustic System for UAV Detection. Sensors. 2020. Vol. 20. <https://doi.org/10.3390/s20174870>
14. Карташов В. та ін. Алгоритми пеленгації безпілотних літальних апаратів за їх акустичним випромінюванням // Радіотехніка. 2019. № 1 (196). P. 22–31. <https://doi.org/10.30837/rt.2019.1.196.02>
15. Олейников В. Н. и др. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению // Радіотехніка : Всеукр. міжвед. науч.-техн. сб. 2019. Вып. 199. С. 29–37. DOI:10.30837/rt.2019.4.199.03
16. Карташов В., Харченко О., Чумаков В. Використання ефекту стохастичного резонансу для аналізу спектрів акустичного випромінювання малих безпілотних літальних апаратів // Радіотехніка, 2019. № 2 (197). С. 100–106. <https://doi.org/10.30837/rt.2019.2.197.13>

17. Тихонов В. А. та ін. Виявлення-розпізнавання безпілотних літальних апаратів з використанням складової моделі авторегресії їх акустичного випромінювання. Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. 2020. № 81. С. 38-46. DOI: 10.20535/RADAP.2020.81.38-46
18. Orlov V. V. et al. Study of capabilities of unmanned aerial vehicle sound location in the tasks of the monitoring of terroristic threats // Visnyk NTUU KPI Serii Radiotekhnika, Radioaaratobuduvannia. 2019. № 79. P. 24-32. DOI: 10.20535/RADAP.2019.79.24-32
19. Prabhu K. M. M. Window functions and their applications in signal processing. Taylor & Francis Group, LLC, 2014. 406 p.
20. Гордієнко Ю. О. та ін. Вплив відношення сигнал-шум на статистичний показник якості акустичного спектрального портрету безпілотного літального апарату // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. Харків : ХНУПС, 2017. № 4 (53). С. 81–85.

Подано 30.12.2020

REFERENCES

1. Zelnio, A. M. (2007). *Detection of small aircraft using an acoustic array*. Thesis. B.S. Electrical Engineering, Wright State University.
2. Zinchenko, S. A., & Svizhevskiy, V. F. (2015). Pasyvna akustychna systema vyavleniia bezpilotnykh litalnykh aparativ [Passive speaker detection system for unmanned aerial vehicles]. In *Tezy dop. nauk.-tekh. konf. "Informatsiina bezpeka Ukrainy" [Abstracts of scientific and technical reports. conf. "Information security of Ukraine"]*. Kyiv, March 12–13, 2015. (pp. 74–75). Kyiv: KNU [in Ukrainian].
3. Minas, B., & Goldman, G. H. (2014). *Acoustic detection and tracking of a class I UAS with a small tetrahedral microphone array*. Adelphi, MD 20783–1138, ARL-TR-7086 Report.
4. Stoica, P., & Moses, L. R. (1997). *Introduction to spectral analysis*. New Jersey, Prentice Hall.
5. Marple Jr., S. L. (1990). *Tsifrovoi spektralnyi analiz i ego prilozheniia [Digital Spectrum Analysis and its Applications]*. Trans. from English. Moscow [in Russian].
6. Shakhtarin, B. I., & Kovrigin, V. A. (2005). *Metody spektral'nogo otsenivaniia sluchainykh protsessov [Methods for spectral estimation of random processes]*. Moscow [in Russian].
7. Moon, T. I., & Stirling, W. C. (2000). *Mathematical Methods and Algorithms For Signal Processing*. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River. New Jersey.
8. Sinibaldi, G., & Marino, L. (2013). Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV. *Applied Acoustics*, 74, 79–88.
9. Saravanakumar, A., & Senthilkumar, K. (2014). Exploitation of Acoustic signature of low flying Aircraft using Acoustic Vector sensor. *Defence Science Journal*, Vol. 64, № 2, 95–98.
10. Massey, K., & Gaeta, R. (2010). Noise Measurements of Tactical UAVs. In *16th AIAA 2010-3911/CEAS Aeroacoustics Conference*. (pp. 1–16).
11. Harvey, B., & O'Young, S. (2018). Acoustic Detection of a Fixed-Wing UAV. *Drones*, № 1. <https://doi.org/10.3390/drones2010004>
12. Pham, T., & Srour, N. (2004). TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs. *U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE*, Vol. 5417, 24–29.

13. Dumitrescu, C. et al. (2020). Development of an Acoustic System for UAV Detection. *Sensors, Vol. 20*. <https://doi.org/10.3390/s20174870>
14. Kartashov, V. et al. (2019). Alhorytmy pelenhatsii bezpilotnykh litalnykh aparativ za yikh akustychnym vyprominiuvanniam [Algorithms of direction finding of unmanned aerial apparatus for high acoustic viprominiuvanniam]. *Radiotekhnika [Radio Engineering], 1* (196), 22–31. <https://doi.org/10.30837/rt.2019.1.196.02>
15. Oleinikov, V. N. et al. (2019). Eksperimental'naia otsenka effektivnosti algoritmov pelengovaniia bespilotnykh letatel'nykh aparatov po akusticheskomu izlucheniiu [Experimental shade of efficiency of algorithms of direction finding of unmanned aerial vehicles according to acoustic emission]. *Radiotekhnika [Radio Engineering], 199*, 29–37. DOI:10.30837/rt.2019.4.199.03 [in Russian].
16. Kartashov, V., Kharchenko, O., & Chumakov, V. (2019). Vykorystannia efektu stokhastychnoho rezonansu dlia analizu spektriv akustychnoho vyprominiuvannia malykh bezpilotnykh litalnykh aparativ [Using the stochastic resonance effect to analyze the acoustic radiation spectra of small unmanned aerial vehicles]. *Radiotekhnika [Radio Engineering], 2* (197), 100–106. <https://doi.org/10.30837/rt.2019.2.197.13> [in Ukrainian].
17. Tykhonov, V. A. et al. (2020). Vyiavlennia-rozpiznavannia bezpilotnykh litalnykh aparativ z vykorystanniam skladovoi modeli avtorehresii yikh akustychnoho vyprominiuvannia [Detection-recognition of unmanned aerial vehicles using a component model of autoregression of their acoustic radiation.]. *Visnyk NTUU "KPI". Serii Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia [Bulletin of NTUU "KPI". Series Radio Engineering], 81*, 38–46. DOI: 10.20535/RADAP.2020.81.38-46 [in Ukrainian].
18. Orlov, V. V. et al. (2019). Study of capabilities of unmanned aerial vehicle sound location in the tasks of the monitoring of terroristic threats. *Visnyk NTUU "KPI". Serii Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia [Bulletin of NTUU "KPI". Series Radio Engineering], 79*, 24–32. DOI: 10.20535/RADAP.2019.79.24-32
19. Prabhu, K. M. M. (2014). *Window functions and their applications in signal processing*. Taylor & Francis Group, LLC.
20. Hordiienko, Yu. O. et al. (2017). Vplyv vidnoshennia syhnal-shum na statystychnyi pokaznyk yakosti akustychnoho spektralnoho portretu bezpilotnoho litalnoho aparatu [Influence of signal-to-noise ratio on statistical indicator of quality of acoustic spectral portrait of unmanned aerial vehicle]. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl [Proceedings of Kharkiv National University of the Air Force], 4* (53), 81–85. Kharkiv: KhNUAF [in Ukrainian].

M. V. Buhaiov, V. V. Branovytskyi, Y. O. Khorenko

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF SPECTRAL ESTIMATION METHODS FOR DETECTION OF UAV ACOUSTIC SIGNALS

One of the most important components of counteracting small unmanned aerial vehicles is their reliable detection. You can use propeller noise to detect such objects at short distances. An energy or harmonic detector is used to receive unmanned aerial vehicles acoustic emission. At low signal-to-noise ratios, which is most common in practice, the harmonic detector provides a higher probability of detection compared to energy. The principle of the harmonic detector is based on spectral analysis of acoustic signals. A mathematical model of the acoustic signal of an

aircraft-type unmanned aerial vehicles is proposed. It is shown that at short time intervals (tens of milliseconds) such signals can be considered as stationary and for its analysis can be used known methods of spectral estimation. Nonparametric, parametric and subspace methods of spectral estimation are considered for processing of acoustic emission of unmanned aerial vehicles. To conduct a comparative analysis of different methods of spectral estimation, a statistical quality index was used, which can be calculated as a variation of the estimation of power spectral density. This index characterizes the method of spectral estimation in terms of frequency resolution and the ability to detect harmonic components of the signal into noise and not create interference that exceeds the amplitude of the signal. As a result of researches it was established that at high signal-to-noise ratios parametric methods are more effective in comparison with nonparametric. However, such a statement will be valid only if the correct order of the model. It is shown that the use of spatial methods is impractical for the analysis of acoustic signals of unmanned aerial vehicles. The use of the value of the statistical quality indicator as a threshold for deciding on the presence or absence of the acoustic signal of the unmanned aerial vehicles in the adopted implementation and its further processing should be used at SNR values greater than 5 dB.

Keywords: *unmanned aerial vehicle; spectral estimation; acoustic signal; periodogram; statistical quality index.*

ПІДХІД ДО ВЕРИФІКАЦІЇ МОДЕЛІ ЦІЛЬОВОЇ АУДИТОРІЇ ПСИХОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ В СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Ефективне планування психологічних операцій не можливе без використання інформаційних технологій, таких як засоби моделювання, що забезпечують точність спланованих операцій та передбачення їх результатів. Сучасні технології полегшують сприйняття інформації завдяки візуалізації. Будь-яку інформацію, особливо ту, що стосується соціальних мереж, аналітикам легше обробляти, якщо вона подана в схематичному вигляді. Наприклад, цільова аудиторія психологічного впливу в соціальних мережах може бути описана графом. У статті вирішується актуальне завдання верифікації моделі цільової аудиторії психологічного впливу в соціальних мережах, яка ґрунтується на поєднанні критеріїв когнітивності топологічної структури. Для верифікації математичних розрахунків використано класичні методи верифікації математичних моделей. За основу критерію когнітивності прийнято візуалізацію даних. У статті наведено метод візуалізації графа, який задає математичну модель цільової аудиторії. Наочне подання графа не лише сприяє кращому засвоєнню, а й пришвидшує аналіз зібраної інформації стосовно цільової аудиторії за рахунок автоматизації. Дані, отримані в ході прогону моделі, порівнюються з реальними, тим самим підтверджується відповідність поведінки моделі дійсним явищам. Перевірка достовірності реалізації моделі за допомогою програмного забезпечення проводилася шляхом її трасування. Адекватність моделі ґрунтується на можливості аналізу цільової аудиторії користувачем за характеристиками окремих акторів, що дають можливість визначити їх роль та проаналізувати структуру цільової аудиторії загалом. В основі вибору характеристик цільової аудиторії лежить теорія аналізу соціальних мереж. Для оцінювання адекватності моделі обрано такі дві характеристики цільової аудиторії, як: центральність із посередництва та центральність за власним вектором. Результати розрахунків отримано за допомогою програмного додатка Gephi. Як вхідні дані для перевірки адекватності моделі використовувалися дані із соціальної мережі “ВКонтакте”.

Ключові слова: верифікація; графова модель; візуалізація; цільова аудиторія; соціальні мережі.

Постановка проблеми в загальному вигляді. У наш час через нестабільність політичної та економічної ситуації в державі досить поширене маніпулювання людьми за допомогою засобів психологічного впливу (ПсВ). Найефективнішим з них є соціальні інтернет-сервіси, які дають можливість застосовувати технології нейролінгвістичного програмування та поширювати дезінформацію. Найчастіше в Інтернеті об'єктами ПсВ стають конкретні групи людей. Для створення ефективних матеріалів ПсВ та вибору відповідних методів необхідне попереднє вивчення об'єкта впливу – цільової аудиторії (ЦА). Для цього необхідно побудувати адекватну модель ЦА в соціальних мережах (СМ).

Одним із актуальних завдань є вибір методів верифікації моделей, що описують соціальні процеси та структури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що необхідною умовою для перевірки адекватності моделей є проведення їх верифікації, яка може базуватися на різних теоретичних засадах. Наприклад, у [2] використано принцип наявності ефекту спотворення в разі формалізації знань; у теорії моделювання [4–7] перевіряють відповідність результатів, отриманих на моделі, поведінці реального об'єкта; у [8] розкрито відповідності моделей експериментальним даним за обраним критерієм. Одним із перспективних напрямків верифікації графових моделей є підходи, що використовуються для визначення достовірності когнітивних карт. Так, у [3] розкрито критерії когнітивної зрозумілості математичних моделей. Для верифікації графових моделей найчастіше користуються підходом візуалізації даних. У згаданій літературі не наведено підходів до верифікації моделей, що відображають структуру соціальних груп за вхідними даними, для яких є характеристики особистостей.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є верифікації моделі ЦА в СМ шляхом візуалізації даних та перевірки їх відповідності реальній ЦА. У [9] запропоновано подати ЦА у вигляді неорієнтованого графа. Формально вона описана у вигляді графа $G(N, E)$, у якому $N = \{1, 2, \dots, n\}$ – множина вузлів (акторів); $E = \{1, 2, \dots, k\}$ – множина ребер, що відображають зв'язок акторів між собою. Під зв'язком між акторами розуміємо соціальні відносини (мають родинні зв'язки, “дружать”, “репостять”, об'єднані спільними інтересами). Вузли зважені згідно з алгоритмом PageRank, ваги ребер визначають відповідно до кількості зв'язків між акторами. Дана модель побудована на основі теорії аналізу СМ, за якою обраховуються характеристики окремих акторів ЦА. Вхідними даними для такої моделі обрано СМ «ВКонтакте».

Виклад основного матеріалу. Аналіз структури соціального графа, побудованого за графовою моделлю, повинен дозволити оцінити акторів ЦА як агентів, що поширюють ПсВ у СМ, та дослідити канали його поширення серед ЦА.

Верифікацію даної моделі пропонуємо проводити на основі таких підходів:

- 1) візуалізація даних та перевірка її на відповідність вхідним значенням, що відображають структуру ЦА;
- 2) когнітивний аналіз отриманих результатів;
- 3) трасування моделі.

Для візуалізації та аналізу графів є низка програм, характеристики яких наведено в табл. 1. З метою реалізації поставленого завдання програмний засіб обирався з огляду на такі можливості: запуск на персональному комп'ютері; вільний доступ; внесення змін відповідно до особливостей моделі; зручний вхідний формат даних та опрацювання графів великих масштабів, яким відповідають реальні СМ. Усіма перерахованими характеристиками володіє програмне забезпечення Gephi, при цьому має зручний та зрозумілий інтерфейс, дозволяє обраховувати ті характеристики акторів, які передбачає теорія аналізу СМ. Gephi має можливість аналізувати великі масиви даних для висунення гіпотез, виявляє недоліки в джерелах інформації. Це допоміжний інструмент традиційної статистики, який відзначається візуальним мисленням та інтерактивним відношенням для полегшення аргументації процесів у соціальних структурах.

Можливості програмного забезпечення для візуалізації та аналізу графів

Можливості Програмне забезпечення	Мова реалізації	Відкритий код	Формат вхідних даних	Формат вихідних даних	Обсяг вхідних даних	Доступ до використання
SocNet	C++	Ні	Pajek(.net,gml), UCINET(.dl), Graphviz(.dot), Adjacency, edge	GraphML Default, Pajek, Adjacency Matrix , PDF, PNG, JPG	Big Data	Вільний
Gephi	Java	Так	GraphViz(.dot), Graphlet(.gml), GUESS(.gdf), LEDA(.gml), NetworkX(.graphml, .net), NodeXL(.graphml, .net), Pajek(.net, .gml), Sonivis(.graphml), Tulip(.tlp, .dot), UCINET(.dl), yEd(.gml), Gephi (.gexf), edge	list(.csv), databases GUESS(.gdf), Gephi(.gexf), .svg, .png	Node 104, Edge 106	Вільний
R	R	Так	Almost all formats	Pajek, Graphml And other	Big Data	Вільний
UCInet	Java	Так	DL, Excel, VNA, Pajek, Text DL, Excel, Pajek, Mage, Metis, VNA	from netdraw	Big Data	Вільний доступ для ознайомлення до 90 днів
NodeXL	C#	Так	email, .csv (text), .txt, .xls (Excel), .xslt(Excel 2007, 2010, 2013), .net (Pajek), .dl (UCINET), GraphML	.csv (text), .txt, .xls (Excel), .xslt.dl (UCINET), GraphML	Big Data	Вільний (додатковий функціонал за ліцензією)
Pajek	Java	Ні	Convert text file and excel The format pajek UCINET(dl) GED, Ore-graph ,pgraph, Some molecular formats PDF	Pajek (.net) UCINET(dl) VOS	Very big data	Вільний
Graphviz	C, C++, Java	Так	GraphViz(.dot)	.bmp, .canon, .cmap, .eps, .fig, .gd, .gd2, .gif, .gtk, .ico, .imap, .cmapx, .ismap, .jpeg, .pdf, .plain, .png, .ps, .ps2, .svg, .svgz, .tif, .vml, .vmlz, .vrml, .wbmp, .xlib	Size Medium volume, 1000No de Big Data	Вільний
NetworkX	Paython	Так	GML, Graph6/Sparse6, GraphML, GraphViz (.dot), NetworkX (.yaml, adjacency lists, and edge lists), Pajek (.net), LEDA	GML, Gnome Dia, Graph6/Sparse6, GraphML, GraphViz (.dot), NetworkX (.yaml, adjacency lists, and edge lists), Pajek (.net), (.jpg, .png, .ps, .svg, et al.)	Big Data	Вільний

Побудуємо графову модель ЦА за алгоритмом [9] та проаналізуємо характеристики акторів ЦА на її основі. Для відображення структури ЦА було зібрано тестовий набір даних із СМ “ВКонтакте” за допомогою онлайн сервісу <https://vk.barkov.net> та методів API, оскільки він не містить необхідного повного функціоналу. За ЦА обрано мешканців міста Волновахи, старших 18 років. Тестовий набір даних містив 8421 актора та 13706 зв’язків між ними. Для модельного прикладу не враховувалися всі наявні зв’язки акторів. Через відсутність навчальної вибірки використовувалися реальні дані.

Зібрані дані були опрацьовані, на їх основі побудовано базу даних у форматі .csv, що підтримується програмою Gephi. На рис. 1 показано граф, змодельований у Gephi, у якому діаметр вершини вказує на вагу актора, тобто показує рівень ієрархії, до якої він належить.

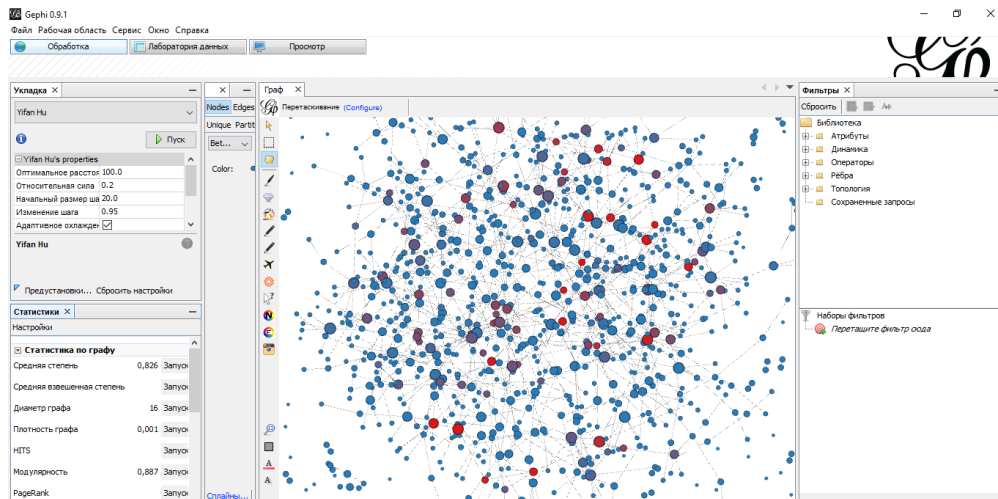


Рис. 1. Граф із виділеними вершинами за їх вагами

Якщо візуально не можна виділити одного лідера найвищого рівня ієрархії, то його можна визначити, звернувшись до бази даних, до якої автоматично заносяться результати обрахованих програмою характеристик. Так, найбільшу вагу вершини (значення PageRank) має актор Едуард Поползін (рис. 2).

No...	Id	ИМЯ	ФАМИЛИЯ	ПОЛ	ЛЕТ	РОДНОЙ Г...	УНИВЕРСИТЕТ	Eccentricity	Closeness Centrality	Betweenness Cen...	PageRank	Eigenvector Centrality
3	311330435	Эдуард	Поползин	М	56	Волноваха	НІПУ	7	3,854	5 702 480,907	0,039	0,203

Рис. 2. Виділений актор із найвищим показником PageRank у базі даних

Валідація проводилася шляхом перевірки коректності результатів моделювання та обчислених характеристик у ході аналізу на відповідність реальним даним, що відображені у СМ. Також графова модель повинна забезпечити можливість аналізу ЦА як соціальної групи, тобто давати відповідь про роль обраних акторів у мережі в цілому.

На основі побудованої графової моделі в програмному засобі Gephi проаналізовано структурні характеристики ЦА. **Центральність із посередництва** є найбільш прийнятною мірою для визначення ступеня здатності індивіда контролювати взаємодію людей у своєму соціумі. Центральність із посередництва (betweenness centrality, CB) – показник центральності, що відображає присутність вершини в найкоротших шляхах між будь-якими іншими вершинами. Це сума ймовірностей того, що інші актори у своїх взаємодіях будуть вдаватися до посередництва даного актора:

$$C_B(v) = \sum_{s \neq v \neq t} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}}, \quad (1)$$

де σ_{st} – загальна кількість найкоротших шляхів з вершини s до вершини t ;

$\sigma_{st}(v)$ – кількість найкоротших шляхів з вершини s до вершини t , що проходять через вершину v .

Обрахуємо згадану вище характеристику акторів та проаналізуємо тестову ЦА за ним. За результатами обчислень позначмо як лідера за кількістю зв'язків (значення у базі даних Betweenness Centrality) актора з id 208604976 (Артур Волноваха), що є зв'язним елементом

між різними частинами мережі. На графі актори з найбільшим значенням Betweenness Centrality мають великий діаметр та інший колір, а з найменшим – найменший діаметр (рис. 3).

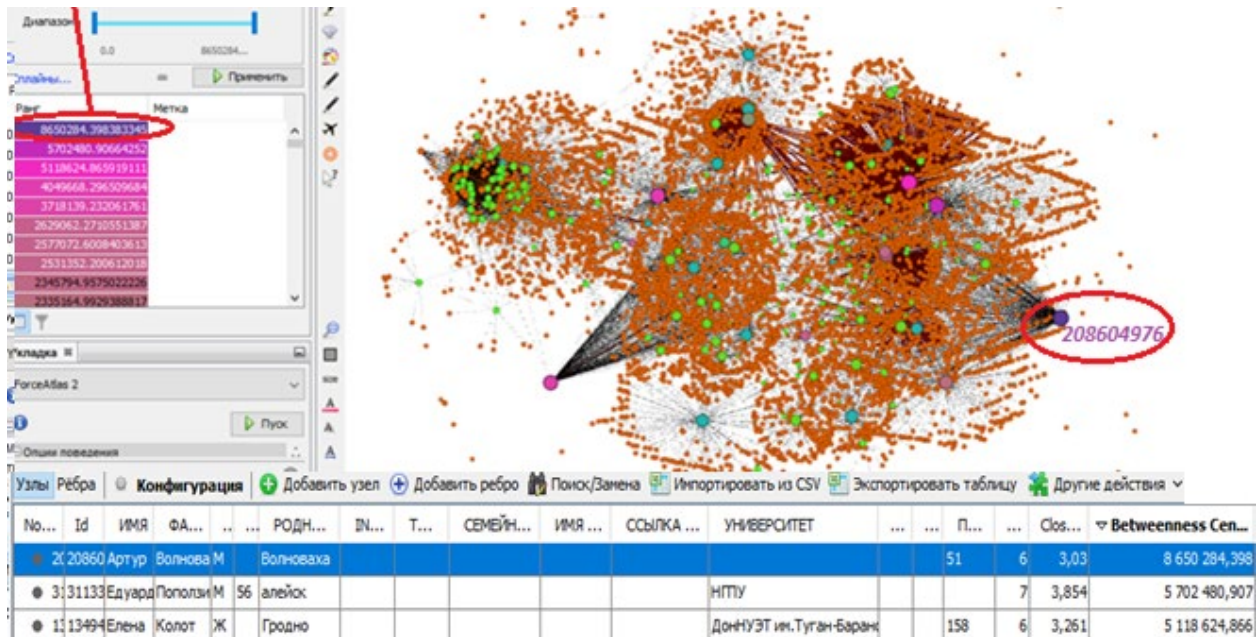


Рис. 3. Обрахунок характеристики “Центральність із посередництва” та виділені актори з високим показником

Проведене дослідження показало, що високий ступінь центральності з посередництва має вкрай невелика кількість акторів, близько 2%. Це означає, що в аналізованій ЦА не спостерігається складної розгалуженої мережі з безліччю великих кластерів і спільнот. Тобто актори мають можливість передавати інформацію, спілкуючись одночасно в декількох різних колах думок. Високий ступінь центральності з посередництва не означає, що актор істотно впливає на думку усієї ЦА, тому доцільно оцінювати впливовість. Дослідження показало, що високою центральністю за власним вектором (впливовістю) володіє Єлизавета Шароведова (рис. 4), яка має середній показник за центральністю з посередництва. На графі актори з найбільшим значенням центральності мають червоний колір та великий діаметр вершини графа.

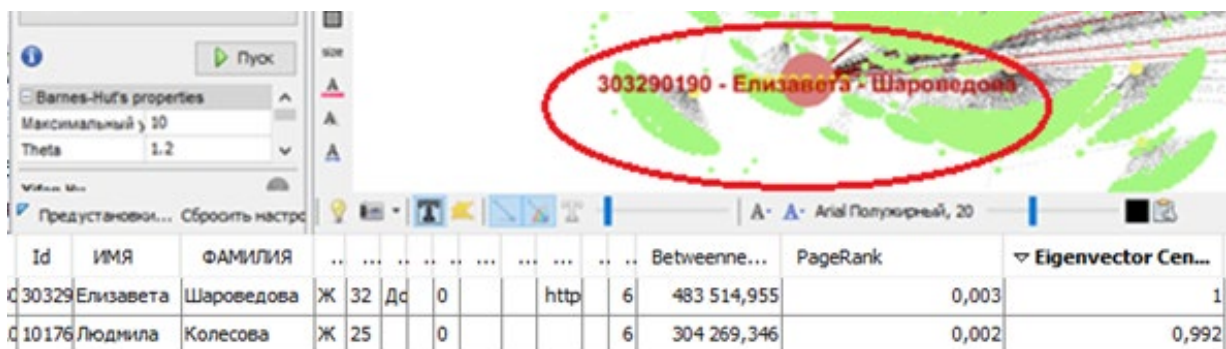


Рис. 4. Візуалізація графа з розподілом акторів за центральністю за власним вектором

Для оцінювання відповідності отриманих результатів проведемо перехресну перевірку: звіримо інформацію із СМ із тією, що відображає граф ЦА, візуалізований

у Gephi, та з базою даних, за якою він будується. Кожен актор занесений до бази даних під ідентифікаційним номером, що відповідає його id у СМ. Достовірність відображення інформації про актора наведено на рис. 5.

У верхній частині рис. 5 наведено фрагмент бази даних, за якою будується граф. У нижній – фрагмент сторінки СМ, що містить інформацію про конкретну особу. З рис. 5 випливає, що інформація, зібрана для бази даних, відповідає реальній. На рис. 6 наведено зв'язки випадково обраного актора, як його ідентифікатор виводиться id номер.

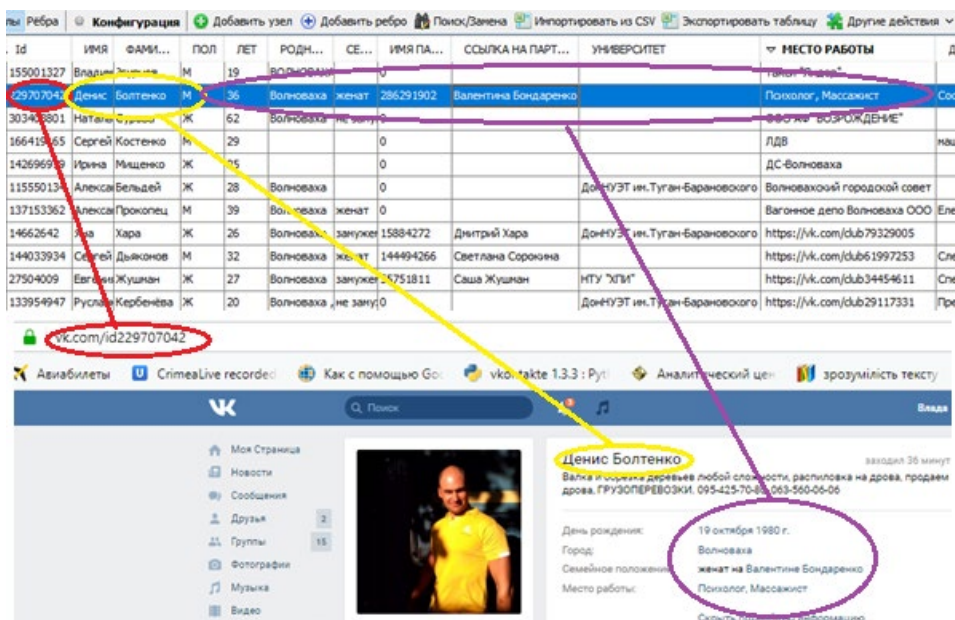


Рис. 5. Відповідність інформації бази даних відомостям із СМ на прикладі одного актора

З рис. 6 видно, що в базі даних, як і на екрані виведення графа, для актора з id 85302158 є лише два комунікатори, з якими він пов'язаний, при чому вага цього зв'язку мінімальна і дорівнює 1, про що свідчить відповідна графа в базі даних Weight. Перевірка реальної інформації в СМ підтверджує наявність між ними зв'язків категорії "Дружба", крім того, актори дійсно належать до жителів міста Волновеха.

Источник	Получатель	Id	Label	Weight
33971249	85302158	6677		1
208604976	85302158	3807		1

Рис. 6. Перевірка достовірності відображення зв'язків між акторами

Висновок. Візуалізація графової моделі, як підхід до її верифікації спеціальними програмними засобами відображення, дає можливість не лише підтвердити адекватність побудованої моделі, а й наочно опрацювати дані, швидко аналізувати характеристики графа (ЦА).

Отже, візуалізація побудованої графової моделі відповідає дійсності. За допомогою програмного засобу Gephi вона працює коректно. Користувач має можливість провести розрахунок характеристик акторів ЦА на основі розробленої моделі, а обраховані програмою значення відповідають дійсності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Биккулов А. С., Чугунов А. В. Сетевой подход в социальной информатике: моделирование социально-экономических процессов и исследования в социальных сетях : учеб. пособ. Москва : РОС, 2013. 210 с.
2. Абрамова Н. А. О формировании интерфейсных понятий компьютерных технологий и психологической корректности // Труды 2-й междунар. конф. “Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций”. Москва : ИПУ РАН, 2002. Т. 2. С. 26–35.
3. Абрамова Н. А., Коврига С. В. Некоторые критерии достоверности моделей на основе когнитивных карт // Системный анализ. Москва, 2008. № 6. С. 23–33.
4. Дыхненко Л. М., Кабаненко И. В., Кузьмин И. В. Основы моделирования сложных систем : учеб. пособ. для вузов. Киев : Вища школа, 1981. 321 с.
5. Лебедев А. Н. Моделирование в научно-технических исследованиях. Москва : Радио и связь, 1989. С. 124–135.
6. Кубланов М. С. Математическое моделирование. Ч. I. Методология и методы разработки математических моделей механических систем и процессов : учеб. пособ. 4-е изд. Москва : МГТУ ГА, 2013. 134 с.
7. Кубланов М. С. Об адекватности математических моделей и задаче идентификации // Научный вестник МГТУ ГА. Серия “Аэромеханика и прочность”. 2009. № 138. С. 101–106.
8. Кубланов М. С. Проверка адекватности математических моделей // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 211. С. 98–100.
9. Savchuk V. S. Graphic Model of The Target Audience of Psychological Influence in Social Networks // Information & Security: Hybrid Warfare Challenges and Responses: Lessons from Ukraine. Sofia. 2018. Vol. 41. P. 28–36.

Подано 30.12.2020

REFERENCES

1. Bikkulov, A. S., & Chugunov, A. V. (2013). *Setevoi podkhod v sotsial'noi informatike: modelirovanie sotsial'no-ekonomicheskikh protsessov i issledovaniia v sotsial'nykh setiakh* [A network approach in social informatics: modeling socio-economic processes and research in social networks]. Moscow [in Russian].
2. Abramova, N. A. (2002). O formirovanii interfeisnykh poniatii komp'iuternykh tekhnologii i psikhologicheskoi korrektnosti [On the formation of interface concepts of computer technology and psychological correctness]. In *Trudy 2-i mezhdunar. konf. “Kognitivnyi analiz i upravlenie razvitiem situatsii”* [Proceedings of the 2nd international. conf. “Cognitive Analysis and managing the development of situations”]. Moscow, 2002. (Vol. 2, pp. 26–35). Moscow: IPU RAN [in Russian].
3. Abramova, N. A., & Kovriga, S. V. (2008). Nekotorye kriterii dostovernosti modelei na osnove kognitivnykh kart [Some Criteria for the Reliability of Models Based on Cognitive Maps]. *Sistemnyi analiz* [System Analysis], 6, 23–33. Moscow [in Russian].
4. Dykhnenko, L. M., Kabanenko, I. V., & Kuz'min, I. V. (1981). *Osnovy modelirovaniia slozhnykh sistem* [Fundamentals of Complex System Modeling]. Kyiv [in Russian].
5. Lebedev, A. N. (1989). *Modelirovanie v nauchno-tekhnicheskikh issledovaniiax* [Simulation in scientific and technical research]. Moscow [in Russian].

6. Kublanov, M. S. (2013). Part 1. Metodologiya i metody razrabotki matematicheskikh modelei mekhanicheskikh sistem i protsessov [Methodology and methods for the development of mathematical models of mechanical systems and processes]. In *Matematicheskoe modelirovanie [Math modeling]*. (4th ed.). Moscow [in Russian].
7. Kublanov, M. S. (2009). Ob adekvatnosti matematicheskikh modelei i zadache identifikatsii [On the adequacy of mathematical models and the identification problem]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA. Seriya "Aeromekhanika i prochnost'" [Scientific Bulletin of MSTU GA. Aeromechanics and Strength Series]*, 138, 101–106 [in Russian].
8. Kublanov, M. S. (2015). Proverka adekvatnosti matematicheskikh modelei [Checking the adequacy of mathematical models]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA [Scientific Bulletin of MSTU GA]*, 211, 98–100 [in Russian].
9. Savchuk, V. S. (2018). Graphic Model of The Target Audience of Psychological Influence in Social Networks. *Information & Security: Hybrid Warfare Challenges and Responses: Lessons from Ukraine, Vol. 41*, 28–36. Sofia.

V. S. Savchuk

APPROACH TO VERIFICATION OF THE TARGET AUDIENCE MODEL OF PSYCHOLOGICAL INFLUENCE IN SOCIAL NETWORKS

Modern planning of psychological operations is not possible without the use of information technology, such as modeling tools that ensure the accuracy of planned operations and predict their results. Modern technologies also help to facilitate the perception of information through visualization. Any information, especially on social networks, is easier for analysts to process if it is presented in a schematic form. For example, the target audience of psychological influence in social networks can be represented by a graph. The article solves the urgent problem of verifying the model of the target audience of psychological influence in social networks. The approach to model verification is based on a combination of cognitive criteria of topological structure. Classical methods of verification of mathematical models are used for verification of mathematical calculations. Data visualization is taken as the basis of the cognition criterion. The article presents a method of graph visualization, which sets the mathematical model of the target audience. Visual representation of the graph not only promotes better assimilation, but also speeds up the analysis of the collected information about the target audience through automation. The data obtained during the run of the model are compared with real data, thus confirming the conformity of the behavior of the model to real phenomena. Validation of the model with the help of software was performed by tracing the model. The adequacy of the model is based on the possibility of analysis of the target audience by the user according to the characteristics of individual actors, which make it possible to determine their role and analyze the structure of the target audience as a whole. The theory of analysis of social networks is the basis of the choice of characteristics of the target audience. To assess the adequacy of the model, two characteristics of the target audience were chosen, as centrality in mediation and centrality in its own vector. The results of the calculations are presented using the software application Gephi. Data from the VKontakte social network were used as input data to check the adequacy of the model.

Keywords: verification, graph model, visualization, target audience, social networks.

Н. М. Каращук, І. А. Цикалов, В. О. Савенко

МАЛОВТРАТНИЙ ОПРОМІНЮВАЧ ДЗЕРКАЛЬНОЇ ПАРАБОЛІЧНОЇ АНТЕНИ ДЛЯ СИСТЕМ РАДІОМОНІТОРИНГУ КАНАЛІВ ІНФОРМАЦІЇ РАДІОРЕЛЕЙНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ

Аналіз досвіду сучасної збройної боротьби показує, що успішність виконання бойових завдань у певній мірі залежить від своєчасного виявлення інформації каналів зв'язку, зокрема, радіорелейних ліній зв'язку. Збільшення дальності виявлення станції радіомоніторингу можна досягти шляхом застосування дзеркальної параболічної антени з опромінювачем у вигляді конічного рупора з малими втратами за рахунок застосування узгоджувального пристрою. Проаналізовано конструктивні рішення узгоджувальних пристроїв та визначено, що більшість з них резонансні. Обґрунтовано та здійснено вибір конструкції діелектричного трансформатора (довжиною $\lambda_x/8$, λ_x – довжина хвилі в круглому хвилеводі, м) для узгодження конічного рупорного опромінювача у всій смузі його робочих частот (для хвилі типу H_{11}). Для досягнення мети використовувалися методи теорії антен й електродинаміки, зокрема теорія довгих ліній. Розроблено математичний апарат для розрахунку параметрів діелектричного трансформатора довжиною $\lambda_x/8$. Вказано, що його хвильовий опір повинен дорівнювати модулю опору навантаження. Розрахунок значення активного трансформованого опору за формулою (10) дає завжди додатне значення вхідного опору, величина якого зростає зі збільшенням реактивного опору навантаження. Достовірність отриманих формул підтверджена збіжністю за одиницями вимірювання та графіками залежностей зміни зовнішнього радіуса коаксіальної лінії живлення b (її хвильового опору), а також товщини та місця включення узгоджувального діелектричного трансформатора l_1 . Практичне значення результатів дослідження полягає в можливості покращення узгодження рупорної антени на базі круглого хвилеводу в діапазоні його робочих частот для певного типу хвилі.

Ключові слова: *маловтратний опромінювач; дальність виявлення; радіомоніторинг; узгоджувальний трансформатор; діелектричний трансформатор; конічний рупор.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Одним із шляхів забезпечення необхідної дальності виявлення системами радомоніторингу каналів інформації радіорелейних ліній зв'язку є застосування спрямованих дзеркальних параболічних антен із малими втратами. Зменшення втрат потужності сигналу в антені можна досягти, зокрема, шляхом покращення узгодження опромінювача із лінією живлення. Для більш рівномірного опромінення дзеркала доцільно застосовувати як опромінювач конічну рупорну антену. Проте розміри розкриття хвилеводу живлення не повинні бути більше визначених, оскільки в ньому можуть виникнути хвилі вищих типів, які порушуватимуть нормальну роботу хвилеводного тракту. Іншою особливістю хвилеводних випромінювачів є їх відносно погане узгодження з вільним простором [6–7]. Унаслідок різкої зміни умов поширення електромагнітної хвилі за переходу від хвилеводу до вільного простору коефіцієнт відбиття досягає за модулем величини $|\Gamma| = 3$ [6]. Наявність рупора дозволяє

© Н. М. Каращук, І. А. Цикалов, В. О. Савенко, 2020

дещо звизити діаграму спрямованості (ДС), проте проблеми узгодження круглого хвилеводу із рупором та лінією живлення не усуває.

Отже, постає необхідність вибору та розрахунку пристрою узгодження круглого хвилеводу із конічним рупором та лінією живлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для поліпшення узгодження використовують різні конструктивні рішення [8–10]: узгоджувальні трансформатори у вигляді діелектричних втулок, кілець, відрізків ліній передачі енергії; узгоджувальні пристрої для компенсації реактивних складових опору – штирі, діафрагми, короткозамкнені хвильові шлейфи; поглинальні навантаження. Розрахунок зазначених вище узгоджувальних елементів вимагає врахування неоднорідностей у хвилеводах [8], тому він зазвичай проводиться методом еквівалентних схем [8, 9]. Загальним проблемним питанням застосування зазначених неоднорідностей є їх резонансність. Їх використання не забезпечує узгодження хвилеводу круглого перетину в заданій смузі частот для хвилі H_{11} і призводить до зміни структури її поля. Часто застосовуються чвертьхвильові діелектричні трансформатори, але вони дозволяють отримати узгодження у вузькій смузі частот [9, 10]. Тому для узгодження хвилеводу круглого перетину з коаксіальною лінією живлення та конічним рупором у всій смузі частот хвилі типу H_{11} пропонуємо використання діелектричного трансформатора довжиною $\lambda_x/8$, який послідовно включається в коаксіальну лінію живлення конічної рупорної антени.

Формулювання завдання дослідження. Необхідно отримати формули для розрахунку конструкції діелектричного трансформатора довжиною $\lambda_x/8$ для узгодження конічної рупорної антени в смузі її робочих частот для хвилі типу H_{11} . Дослідити зміну зовнішнього радіуса коаксіальної лінії живлення b (її хвильового опору), а також товщини та місця включення узгоджувального діелектричного трансформатора l_1 .

Виклад основного матеріалу. Вирази для розрахунку параметрів узгоджувального діелектричного трансформатора довжиною l_m виводять для конічної рупорної антени (рис. 1).

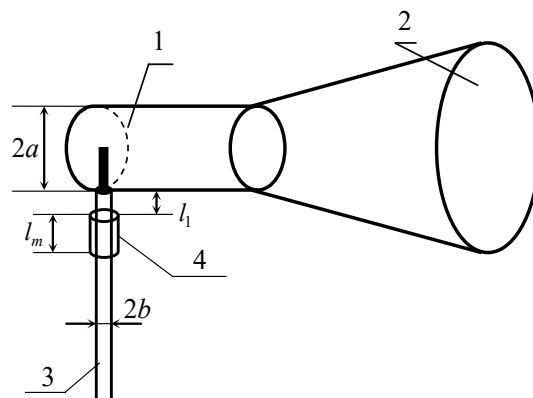


Рис. 1. Конічна рупорна антена на базі круглого хвилеводу з узгоджувальним діелектричним трансформатором довжиною l_m

Рупорна антена складається з круглого хвилеводу 1 діаметром $2a$, круглого рупора 2, коаксіальної лінії збудження 3 діаметром $2b$. Узгодження коаксіальної лінії з рупором 2 здійснюється з допомогою діелектричного трансформатора 4 довжиною $l_m = \lambda_x/8$, який вмикається на відстані l_1 від початку круглого рупора. У хвилеводі 1 збуджується основна хвиля H_{11} .

Діелектричний трансформатор перетворює опір у довгій лінії, який відповідає хвильовому опорю рупора, його визначають за таким виразом [8]:

$$Z_{ex} = \rho \frac{Z_n + j(\rho \operatorname{tg}(kl))}{\rho + jZ_n \operatorname{tg}(kl)}, \quad (1)$$

де Z_{ex} – вхідний опір відрізка довгої лінії l , Ом;

k – хвильове число, рад/м;

ρ – хвильовий опір, Ом;

Z_n – опір навантаження, Ом.

Припустимо, що довга лінія з хвильовим опором навантажена на хвильовий опір і повинна бути узгоджена з іншою довгою лінією, що має хвильовий опір ρ_2 . Для узгодження пропонуємо застосувати лінію, довжина якої дорівнює чверті довжини хвилі, яка розповсюджується в цій лінії. Для розрахунку хвильового опорю узгоджувального трансформатора застосуємо формулу (1), вважаючи, що

$$kl = \frac{2\pi \lambda}{\lambda} \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2}, \quad Z_n = \rho_1, \quad Z_{ex} = \rho_2.$$

Поділивши чисельник та знаменник правої частини (1) на $\operatorname{tg}(kl)$ і взявши границю за $kl \Rightarrow \pi/2$, у результаті отримаємо

$$\rho = \sqrt{Z_{ex} Z_n} = \sqrt{\rho_1 \rho_2}. \quad (2)$$

Розглянемо узгодження за допомогою діелектричного трансформатора довжиною $l_m = \lambda_x/8$. У формулі (1) опір навантаження має активну r та реактивну x складові:

$$Z_n = r + jx. \quad (3)$$

Запишемо для цього випадку вираз (1) у вигляді

$$Z_{ex} = \rho \frac{r + j(x + \operatorname{tg}(kl))}{\rho - x \operatorname{tg}(kl) + j r \operatorname{tg}(kl)}. \quad (4)$$

Помноживши чисельник та знаменник виразу (4) на комплексно спряжене значення знаменника, визначимо дійсну частину від уявної:

$$Z_{ex} = \rho \frac{r(\rho - x \operatorname{tg}(kl)) + (x + \rho \operatorname{tg}(kl)) r \operatorname{tg}(kl)}{(\rho - x \operatorname{tg}(kl))^2 + (r \operatorname{tg}(kl))^2} + j\rho \frac{r(\rho + x \operatorname{tg}(kl))(\rho - x \operatorname{tg}(kl)) - r^2 \operatorname{tg}(kl)}{(\rho - x \operatorname{tg}(kl))^2 + (r \operatorname{tg}(kl))^2}. \quad (5)$$

Знайдемо умови, за яких у результаті трансформації опір стане дійсним. Для цього прирівняємо уявну частину виразу (5) до нуля:

$$r(\rho + x \operatorname{tg}(kl))(\rho - x \operatorname{tg}(kl)) - r^2 \operatorname{tg}(kl) = 0. \quad (6)$$

Відмітимо, що згідно з виразом (3) модуль опору навантаження визначається як $|Z_n| = \sqrt{r^2 + x^2}$. Виберемо значення хвильового опору ρ узгоджувального трансформатора рівним модулю опору навантаження:

$$\rho^2 = r^2 + x^2. \quad (7)$$

Замінивши ρ у виразі (6), отримаємо

$$\left[\rho^2 - (r^2 + x^2) \operatorname{tg}(kl) + \rho x (1 - (\operatorname{tg}(kl))^2) \right] = 0.$$

Із отриманого виразу опір буде дійсним, якщо виконуватиметься рівність

$$(\operatorname{tg}(kl))^2 = 1, \quad (8)$$

звідси значення аргументу тангенса і довжина узгоджувального трансформатора дорівнюють:

$$kl = \frac{\pi}{4}, \quad l_m = \frac{\pi \lambda_x}{4 \cdot 2\pi} = \frac{\lambda_x}{8}. \quad (9)$$

Підставляючи довжину l_m та хвильовий опір ρ (7) у формулу (5), знайдемо значення трансформованого опору:

$$R = \rho \frac{r(\rho - x) + r(\rho + x)}{(\rho - x)^2 + r^2} = \frac{\rho r}{\rho - r}. \quad (10)$$

Отримані вирази (7), (9) і (10) дозволяють здійснити повний розрахунок параметрів узгоджувального діелектричного трансформатора. Його хвильовий опір повинен дорівнювати модулю опору навантаження, довжина – $\lambda_x/8$, а активний опір на виході визначатиметься виразом (10). Оскільки $\rho = \sqrt{x^2 + r^2}$, то вираз (10) дає завжди позитивне значення вхідного опору. Величина цього опору тим більша, чим більший реактивний опір навантаження x .

Оскільки узгоджувальний діелектричний трансформатор має невелику довжину – $l_m = \lambda_x/8$, то за зміни частоти відбувається компенсація реактивної складової на виході трансформатора.

За отриманими виразами проводилося дослідження зміни зовнішнього радіуса коаксіальної лінії живлення b (її хвильового опору), а також товщини та місця включення узгоджувального діелектричного трансформатора l_1 . На графіках на рис. 2 наведено розраховані залежності результатів узгодження коаксіальної лінії з круглим рупором за допомогою узгоджувального діелектричного трансформатора. Отримані залежності (рис. 2) справедливі для випадку поширення хвилі типу H_{11} в коаксіальній лінії живлення і в круглому хвилеводі. Згідно з рис. 2 узгоджувальний діелектричний трансформатор необхідно включати ближче до рупора, щоб відрізок лінії, у якому зберігається відбита хвиля, був якомога меншим. У такому положенні досягається необхідна смуга частот, у межах якої виконується узгодження.

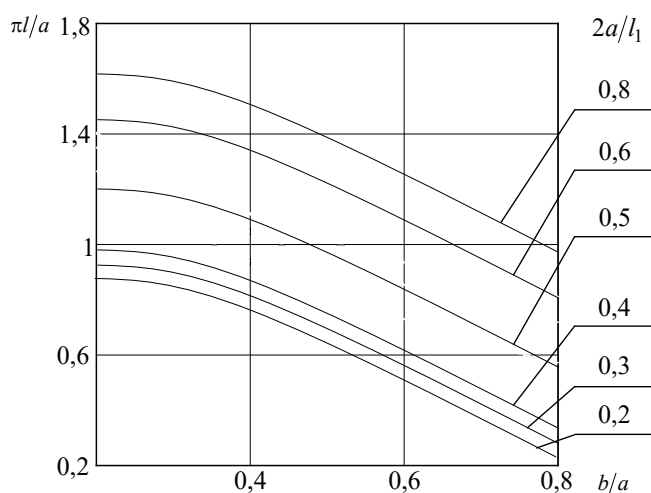


Рис. 2. Розрахункові залежності узгодження коаксіальної лінії з круглим рупором за допомогою узгоджувального діелектричного трансформатора

У такому разі узгоджувальний діелектричний трансформатор розглядається у вигляді пристрою з малими втратами, що трансформує в усій смузі частот опір навантаження в опір, близький до хвильового опору лінії, підключеної до входу узгоджувального пристрою.

Висновки. Наукова новизна результатів проведеного дослідження полягає в отриманні виразів (7), (9), (10) для розрахунку конструкції та параметрів узгоджувального діелектричного трансформатора довжиною $l_m = \lambda_x/8$, їх достовірність підтверджена збіжністю за одиницями вимірювання. Узгоджувальний діелектричний трансформатор довжиною $l_m = \lambda_x/8$ має активний опір у смузі робочих частот конічної рупорної антени.

Практичне значення результатів дослідження полягає в можливості узгодження рупорної антени на базі круглого хвилеводу в діапазоні його робочих частот для певного типу хвилі. Покращення узгодження зменшує втрати потужності сигналу в дзеркальній параболічній антені системи радіомоніторингу каналів інформації радіорелейних ліній зв'язку, що дозволяє збільшувати її дальність виявлення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Carbon-Based Composite Microwave Antennas / N. A. Dugin, T. M. Zaboronkova, C. Krafft, G. R. Belyaev // *Electronics*. 2020. No 9 (4). P. 590. <https://doi.org/10.3390/electronics9040590>
2. Moallemizadeh A., Kiani-Kharaji M., Mohammad-Ali-Nezhad S. A simple design substrate-integrated waveguide horn antenna with reduced back lobe // *International Journal of Electronics*. 2020. Vol. 107. P. 417–430. <https://doi.org/10.1080/00207217.2019.1661025>
3. Tang Y. -F., Wu K., Mallat N. -K. Development of Substrate-Integrated Waveguide Filters for Low-Cost High-Density RF and Microwave Circuit Integration: Direct-Coupled Cavity Bandpass Filters With Chebyshev Response // *Access IEEE*. 2015. Vol. 3. P. 1313–1325. <https://doi:10.1109/ACCESS.2015.2461551>
4. Sorrentino R., Bianchi G., Chang K. *Microwave and RF Engineering*. John Wiley & Sons, 2010. P. 912. ISBN: 978-0-470-66021-8.
5. Zbitou J., Errkik A. *Emerging Innovations in Microwave and Antenna Engineering*. IGI Global, 2018. P. 437. <https://doi:10.4018/978-1-5225-7539-9>
6. Santos Lima A. L., da Rosa G. S., Bergmann J. R. A mode-matching solution for the study of cylindrical waveguide bifurcation via closed-form coupling integrals // *AEU – International Journal of Electronics and Communications*. 2020. Vol. 118. P. 135–153. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153135>
7. Неганов В. А., Клюев Д. С., Табаков Д. П. *Устройства СВЧ и антенны*. Москва, 2016. 728 с.
8. Лебедев И. В. *Техника и приборы СВЧ*. Москва : Высшая школа, 1970. 437 с.
9. Jongsuebchoke I., Akkaraekthalin P., Torrungrueng D. Theory and design of quarter-wave-like transformers implemented using conjugately characteristic-impedance transmission lines // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2016. Vol. 58 (11). P. 2614–2619. <https://doi.org/10.1002/mop.30120>
10. Compact wideband multi-section quarter-wave-like transformers / T. Satitchantrakul, A. Prayoot, R. Silapunt, D. Torrungrueng // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2018. Vol. 32. P. 1911–1924. <https://doi:10.1080/09205071.2018.1482239>

Подано 30.12.2020

REFERENCES

1. Dugin, N. A., Zaboronkova, T. M., Krafft, C., & Belyaev, G. R. (2020). Carbon-Based Composite Microwave Antennas. *Electronics*, 9 (4), 590. <https://doi.org/10.3390/electronics9040590>
2. Moallemizadeh, A. A., Kiani-Kharaji, M., & Mohammad-Ali-Nezhad, S. (2020). A simple design substrate-integrated waveguide horn antenna with reduced back lobe. *International Journal of Electronics*, Vol. 107, 417–430. <https://doi.org/10.1080/00207217.2019.1661025>
3. Tang, Y.-F., Wu, K., & Mallat, N.-K. (2015). Development of Substrate-Integrated Waveguide Filters for Low-Cost High-Density RF and Microwave Circuit Integration: Direct-Coupled Cavity Bandpass Filters With Chebyshev Response. *Access IEEE*, Vol. 3, 1313–1325. <https://doi:10.1109/ACCESS.2015.2461551>
4. Sorrentino, R., Bianchi, G., & Chang, K. (2010). *Microwave and RF Engineering*. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-470-66021-8.
5. Zbitou, J., & Errkik, A. (2018). *Emerging Innovations in Microwave and Antenna*

Engineering. IGI Glodal. [https://doi: 10.4018/978-1-5225-7539-9](https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7539-9)

6. Santos Lima, A. L., da Rosa G. S., & Bergmann, J. R. (2020). A mode-matching solution for the study of cylindrical waveguide bifurcation via closed-form coupling integrals. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 118, 135–153. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153135>
7. Neganov, V. A., Kliuev, D. S., & Tabakov, D. P. (2016). *Ustroistva SVCh i antenny [Microwave devices and antennas]*. Moscow [in Russia].
8. Lebedev, I. V. (1970). *Tekhnika i pribory SVCh [Microwave equipment and devices]*. Moscow [in Russia].
9. Jongsuebchoke, I., Akkaraekthalin, P., & Torrungrueng, D. (2016). Theory and design of quarter-wave-like transformers implemented using conjugately characteristic-impedance transmission lines. *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 58 (11), 2614–2619. <https://doi.org/10.1002/mop.30120>
10. Satitchantrakul, T., Prayoot, R., & Silapunt, D. (2018). Compact wideband multi-section quarter-wave-like transformers. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 32, 1911–1924. [https://doi: 10.1080/09205071.2018.1482239](https://doi.org/10.1080/09205071.2018.1482239)

N. M. Karaschuk, I. A. Tsikalov, V. O. Savenko

IRRADIATOR WITH MINIMAL LOSSES OF PARABOLIC ANTENNA FOR RADIO MONITORING SYSTEMS OF INFORMATION CHANNELS OF RADIO RELAY COMMUNICATION LINES

Analysis of the experience of modern struggle shows that the success of combat missions to some extent depends on the timely detection of information from communication channels, in particular, radio relay communication lines. Increasing the detection range of the radio monitoring station can be achieved by using a mirror parabolic antenna with a radiation in the form of a conical horn with low losses due to the use of a matching device. The constructive decisions of matching devices are analysed and it is determined that most of them are resonant. The substantiation and selection of the design of the dielectric transformer with the length $\lambda_x/8$ (λ_x – wavelength in a round waveguide, m) for coordination of the conical horn irradiator in the whole band of its operating frequencies for the wave type is carried out. To achieve the goal, the methods of antenna theories and electrodynamics were used, in particular the theory of long lines. A mathematical apparatus has been developed for calculating the parameters of a dielectric transformer (the length $\lambda_x/8$). It is stated that its impedance must be equal to the modulus of load resistance. The calculation of the value of the active transformed resistance according to the formula (10) always gives a positive value of the input resistance, the value of which is greater the greater the reactive load reactance. The reliability of the obtained formulas is confirmed by the convergence of units and graphs of dependences of the changes of the outer radius of the coaxial power line b (its impedance), as well as the thickness and place of inclusion on the matching dielectric transformer l_1 . The practical significance of the research results lies in the possibility of improving the matching of a horn antenna based on a circular waveguide in the range of its operating frequencies for a certain type of wave.

Keywords: irradiator with minimal losses; detection range; radio monitoring; matching transformer; dielectric transformer; conical horn antenna.

Ю. О. Гордієнко, А. О. Лотошко, О. О. Паплінський

**СПОСОБИ ОБРОБКИ СЕЙСМІЧНИХ ДАНИХ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ
МОНІТОРИНГУ ІНОЗЕМНИХ ВИПРОБУВАЛЬНИХ ПОЛІГОНІВ**

У роботі проаналізовано способи обробки вимірювальних даних сейсмічного методу спостереження, які використовуються в Міжнародній системі сейсмічного моніторингу та Головному центрі спеціального контролю Державного космічного агентства України для вирішення завдань моніторингу ядерних випробувань на іноземних випробувальних полігонах. Визначено напрямки щодо удосконалення відомих і розробки нових способів обробки вимірювальних даних сейсмічного методу виявлення в умовах наявності та відсутності апріорної інформації про форму сейсмічного сигналу. Якщо відома форма очікуваного сейсмічного сигналу то моніторинг іноземних випробувальних полігонів системою сейсмічного групування можливо реалізувати шляхом доповнення методу регульованого спрямованого прийому кореляційною схемою обробки вимірювальних даних. У разі відсутності інформації про форму сейсмічного сигналу моніторинг випробувального полігону здійснюється поділом групи на дві підгрупи з подальшим застосуванням методу крос-кореляції між вихідними вибірками кожної підгрупи. Для мережі трикомпонентних станцій, за наявності інформації про форму очікуваного сейсмічного сигналу, застосовується метод порівняння з еталонним сигналом. В умовах відсутності еталонних сигналів моніторинг реалізується із застосуванням системного дискримінанту, який враховує кінетично-динамічні властивості очікуваного сигналу з осередком із заданого району. Проаналізовано можливості застосування сейсмічних станцій Міжнародної системи сейсмічного моніторингу, використання вимірювальних даних яких для вирішення завдань спостереження іноземних полігонів дозволяє суттєво зменшити час визначення параметрів сейсмічної події. Особливістю сигналів, зареєстрованих сейсмічними станціями Міжнародної системи, є наявність типів сейсмічних хвиль, характерних для подій з осередками в ближній зоні. Реалізація моніторингу випробувальних полігонів можлива шляхом врахування поляризаційних та динамічних властивостей сейсмічних хвиль. Застосування запропонованих підходів дозволить підвищити ефективність вирішення завдань виявлення ядерних вибухів на іноземних випробувальних полігонах.

Ключові слова: сейсмічний моніторинг; іноземний випробувальний полігон; система сейсмічного групування; трикомпонентна сейсмічна станція; методи обробки сейсмічних даних.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Незважаючи на мораторій щодо випробувань ядерної зброї (ЯЗ), у засобах масової інформації неодноразово з'являлися повідомлення про наміри проведення ядерних випробувань (ЯВ) окремими державами – власницями ЯЗ із метою визначення стану розвитку технології її створення. Крім того, розширюється коло держав, які впритул наблизилися до створення зразків ЯЗ. Отже, завдання контролю за ЯВ на іноземних випробувальних полігонах (ІВП) не втрачає своєї актуальності.

© Ю. О. Гордієнко, А. О. Лотошко, О. О. Паплінський, 2020

В Україні завдання контролю національними технічними засобами за дотриманням вимог міжнародних договорів про обмеження та заборону випробувань ЯЗ, а також за випробуваннями ЯЗ на ІВП та проведенням ЯВ у мирних цілях покладено на Головний центр спеціального контролю (ГЦСК) Державного космічного агентства (ДКА) України [1]. За період з 1992 по 2019 роки технічними засобами сейсмічного методу ГЦСК було зафіксовано 29 підземних ЯВ на ІВП (табл. 1).

Таблиця 1

Кількість ЯВ на ІВП, сигнали від яких були зареєстровані у ГЦСК
за період 1992–2019 рр.

Назва полігона, країна	Координати полігона		Кількість вибухів
	Широта	Довгота	
Невада, США	37.02	-115.99	5
Муруроа, Франція	-22.26	-138.81	6
Лобнор, Китай	41.82	88.42	9
Покаран, Індія	27.10	71.86	1
Далбандін, Пакистан	28.49	63.79	2
Пхунгері, Північна Корея	41.24	129.03	6

Своєчасне встановлення факту проведення ЯВ тією або іншою державою чи його спростування, оцінка ступеня технологічного розвитку створення ЯЗ є важливим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням сейсмічного моніторингу присвячено низку робіт [2–7]. Однак більшість запропонованих підходів, спрямованих на вирішення окремих проблем, вимагають значних обчислювальних затрат або потребують попередньої обробки оператором. Крім того, вони використовуються у постоперативному режимі часу, як правило, для уточнення параметрів сейсмічного джерела.

На даний час у міжнародних та національних центрах даних інших країн основна тенденція виявлення сейсмічної події в автоматичному режимі полягає у використанні відносно простих процедур обробки вимірювальних даних, які дозволяють оперативно здійснювати аналіз даних, але при цьому збільшується щільність мережі сейсмічних спостережень [2]. Територіальна обмеженість мережі сейсмічних спостережень ГЦСК, особливо після тимчасової втрати, унаслідок окупації Російською Федерацією Кримського півострова, пунктів спостереження “Севастополь” та “Євпаторія”, зумовлює необхідність розробки методологічних засад використання сейсмічного моніторингу окремими пунктами спостереження.

Іншою передумовою удосконалення методів обробки сейсмічних даних є модернізація мережі сейсмічних спостережень ГЦСК, яка проводиться в рамках міжнародних та національних проєктів.

Тому виникає необхідність проведення аналізу відомих методів обробки сейсмічних даних та визначення основних напрямків удосконалення наявних і розробки нових підходів до обробки вимірювальних даних сейсмічного методу з урахуванням особливостей завдань, які стоять перед ГЦСК у рамках контролю за випробуваннями ЯЗ на ІВП.

Формулювання завдання дослідження. Метою роботи є аналіз способів обробки вимірювальних даних сейсмічного методу спостереження, які застосовуються для

вирішення завдань моніторингу ЯВ на ІВП, та визначення основних напрямків удосконалення наявних та розробки нових підходів.

Виклад основного матеріалу. Мережа сейсмічних спостережень (МСС) ГЦСК включає трикомпонентні сейсмічні станції (ТКСС), систему сейсмічного групування (ССГ), яка увійшла до Міжнародної мережі сейсмічного моніторингу як станція PS45, та Національний центр даних (рис. 1).

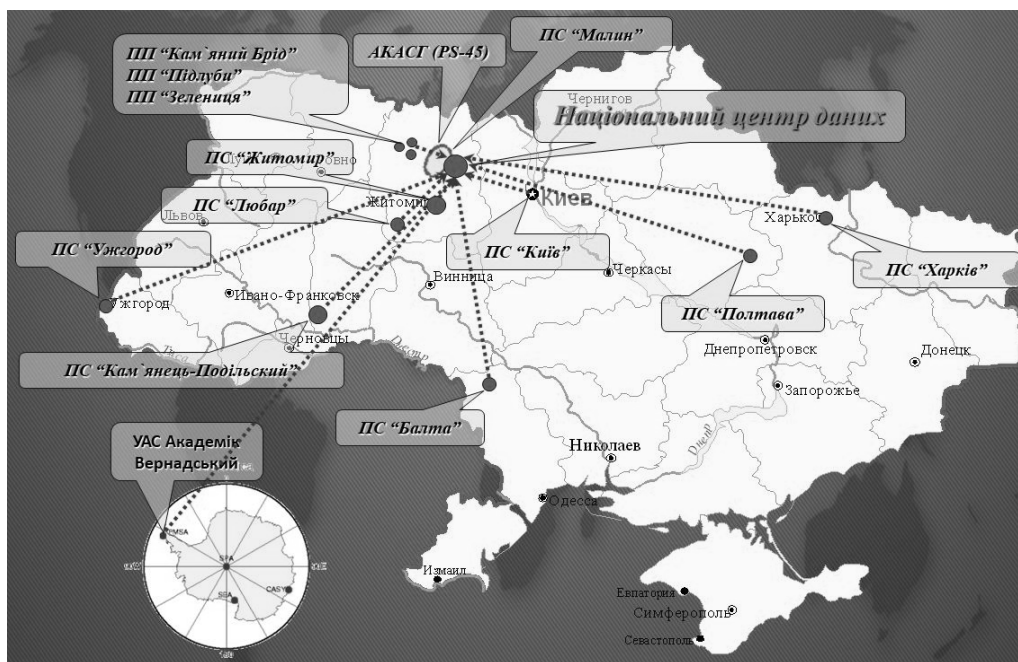


Рис. 1. Мережа сейсмічних спостережень ГЦСК

Обробка вимірювальних даних сейсмічного методу здійснюється в ручному й автоматичному режимах. Рішення про параметри сейсмічної події та можливі наслідки приймається оперативним черговим ГЦСК за результатами аналізу інформації про параметри сейсмічного сигналу (час вступу основних типів сейсмічних хвиль, їх амплітуда та період), отримані з кожного пункту спостереження. При цьому час надання інформації користувачам про параметри сейсмічної події та можливі наслідки становить до 40 хвилин [1, 6].

Модернізація сейсмічних засобів спостереження, передачі та обробки вимірювальних даних, перехід на цифрову обробку інформації, яка проводиться у ГЦСК в рамках національних та міжнародних програм, дозволяють перейти на якісно новий рівень моніторингу сейсмічної обстановки. Однак ці можливості на даний час використовуються обмежено, оскільки реалізовані в ГЦСК способи обробки сейсмічних даних ґрунтуються на алгоритмах «ручної» обробки сейсмограм оператором.

Обробка вимірювальних даних ССГ. В основі принципу сейсмічного групування лежить використання властивості когерентності сигналу й некогерентності перешкод, а також відмінності їх швидкості. Різниця в швидкостях розповсюдження сигналу і перешкод дозволяє разом із частотною фільтрацією здійснити в ході групування також швидкісну фільтрацію коливань.

На даний час для обробки вимірювальних даних ССГ використовується метод регульованого спрямованого прийому (МРСП) [7–9]. Обробка даних сейсмічної групи

з використанням МРСП проводиться шляхом затримки сигналу на виході кожного сейсмоприймача на час руху хвилі від вибраного сейсмоприймача до останнього в групі з відповідного напрямку та подальшим їх складанням. Поточне значення на виході ССГ для обраного напрямку (району) визначають у такий спосіб:

$$s_k(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t + \tau_{ik}), \quad (1)$$

де x_i – елемент часового ряду, утвореного сейсмічним процесом, який відповідає зміщенню ґрунту на i -тому сейсмоприймачі ССГ;

τ_{ik} – елемент матриці часової затримки на i -му елементі ССГ для k -го району;

N – кількість елементів сейсмічної групи.

Надалі оцінюють сигнал за такою формулою:

$$S_k(T_0) = \frac{1}{\Delta T} \int_{T_0}^{T_0 + \Delta T} |s_k(T_0 + t)| dt, \quad (2)$$

та шум як

$$P_k(T_0) = \frac{1}{\theta} \int_{T_0 - \theta}^{T_0} |s_k(T_0 - \theta + t)| dt, \quad (3)$$

де T_0 – найбільш імовірний час тривалості сигнальної функції (с);

θ – час, що передуює сигналу, протягом якого оцінюється шум (с).

Відношення

$$\alpha_k(T_0) = \frac{S_k(T_0)}{P_k(T_0)} \quad (4)$$

приймається за оцінку відношення сигнал-шум.

Показником наявності сигналу вважається перевищення порога $\alpha_k > h$. Для Української сейсмічної групи значення порога становить $h = 2,15$ [7].

Вибір конкретної точки з усіх, де перевищено порогове значення, здійснюється за визначенням конкретного m , якому відповідає максимум оцінки сигналу за формулою (4). Після грубої оцінки координат джерела здійснюється процес уточнення координат, який полягає в пошуку максимуму значення α_k для меж певної точки. Цей процес виконується вже за контуром реального часу.

Однак така реалізація вирішальної функції в разі здійснення безперервного моніторингу певного району повністю не виключає впливу сейсмічних сигналів від подій з осередками в інших районах.

На рис. 2 наведено результати обробки вимірювальних даних ССГ у ході формування максимуму діаграми спрямованості на північнокорейський випробувальний полігон (ПнКВП) для сигналу від землетрусу з району о. Хонсю (Японія) з магнітудою $M = 5,1$, який відбувся 27.04.2009. При цьому відношення сигнал-шум становить $\eta = 6,3$, що перевищує поріг виявлення.

Як видно з наведеного, використання відомих методів для реалізації вирішальної функції (1)–(4) не дозволяє виключити вплив сейсмічних сигналів з інших районів. Тому моніторинг сейсмічної обстановки з використанням ССЗ реалізовано шляхом перевірки гіпотези про відповідність сигналу певному району (рис. 3). Вибір конкретного району, для якого перевищено значення порога, здійснюється шляхом пошуку максимальної оцінки сигналу за формулою (4).

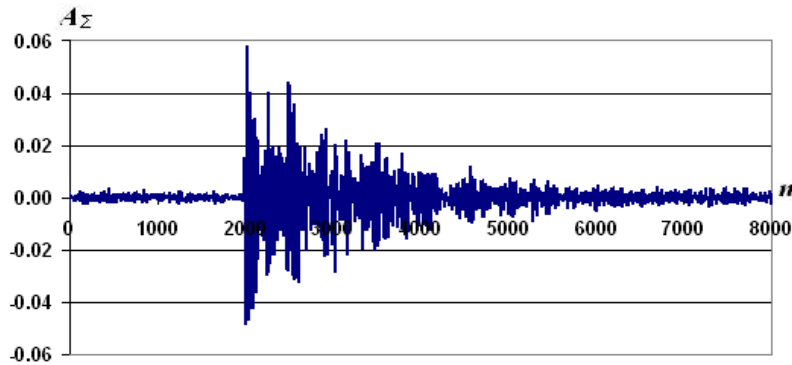


Рис. 2. Сигналограма від землетрусу в районі о. Кюсю, перерахована МРСП для ПнКВП

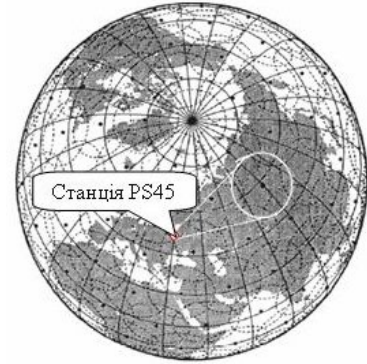


Рис. 3. Решітка глобального моніторингу станції PS45

Наступним етапом є уточнення місцеположення осередку сейсмічної події в межах визначеного району. Цей процес виконується за межами контуру реального часу.

Основним напрямком застосування ССГ для вирішення завдань виявлення ЯВ на ІВП є реалізація їх безперервного моніторингу. Для цього необхідно використовувати додаткові критерії. Одним з них є врахування особливостей хвильових форм сейсмічного сигналу. Даний спосіб використовують у процесі ручної обробки сигналограм оператором, він ґрунтується на візуальній оцінці відповідності прийнятої реалізації еталонній. При цьому якість прийняття рішення залежить від низки суб'єктивних факторів, зокрема від рівня підготовки номерів оперативно-чергової зміни.

Визначення відповідності отриманої вибірки (1) еталонному (раніше зареєстрованому) сигналу здійснюється шляхом оцінювання коефіцієнта кореляції \hat{r}_{ES} за таким виразом:

$$\hat{r}_{ES} = \frac{\hat{K}_{ES}}{\sqrt{\hat{D}_E \cdot \hat{D}_S}} \quad (5)$$

де \hat{K}_{ES} – оцінка значення кореляційного моменту для еталонного $E(t)$ та отриманого сигналів $S(t)$;

\hat{D}_E, \hat{D}_S – оцінки дисперсій $E(t)$ та $S(t)$.

Окремим питанням постає розробка методологічних засад реалізації безперервного моніторингу ІВП, на яких не проводилися ЯВ, тобто в умовах відсутності апріорної інформації про форму сейсмічного сигналу. Актуальність цього питання зростає у зв'язку з тим, що багато держав підійшли до межі володіння технологією ЯЗ.

Одним із напрямків вирішення вказаної проблеми є перехід від оцінки відношення сигналу-шум (2)–(4) до оцінки функції взаємної кореляції. Для цього сейсмічна група поділяється на дві підгрупи. Для кожної з них хвильові форми, зареєстровані сейсмометрами, складаються із затримками, що відповідають певному району. Наступним кроком є визначення оцінки функції взаємної кореляції між хвильовими формами на виході суматорів:

$$\Omega_m(T_0) = \frac{\int_{T_0}^{T_0+\Delta T} Z_m(T_0 + t) dt}{\sqrt{\int_{T_0}^{T_0+\Delta T} S_{1m}^2(T_0 + t) dt} \times \sqrt{\int_{T_0}^{T_0+\Delta T} S_{2m}^2(T_0 + t) dt}}, \quad (6)$$

де $S_{1m}(t)$ та $S_{2m}(t)$ – поточне значення на виході підгруп;

$$Z_m(T_0) = S_{1m}(T_0) \times S_{2m}(T_0) = \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L x_i(T_0 + \tau_{im}) \right) \times \left(\frac{1}{L} \sum_{j=L+1}^{2L} x_j(T_0 + \tau_{jm}) \right); \quad (7)$$

L – кількість елементів у підгрупі, $L = \frac{N}{2}$.

Обробка вимірювальних даних ТКСС. Виконання завдань сейсмічного моніторингу окремою ТКСС у загальному вигляді включає такі етапи: виявлення сейсмічного сигналу, визначення складових сейсмічного запису (встановлення типів сейсмічних хвиль), локація осередку сейсмічної події, оцінка параметрів та ідентифікація природи сейсмічного джерела. У разі однопозиційних спостережень останні три етапи виконуються за умови впевненого розв'язання задачі визначення основних складових сейсмічного запису. Тому в ході аналізу наявних методів виявлення та обробки сейсмічних даних основна увага приділятиметься саме можливості вирішення цього завдання. Іншим критерієм слід визначити простоту програмно-алгоритмічної реалізації методів обробки, що, у свою чергу, забезпечить можливість обробки вимірювальних даних у реальному режимі часу.

Основними методами виявлення сейсмічних сигналів, які використовуються в Міжнародному та національних центрах обробки сейсмічних даних, є: алгоритм кумулятивних сум, алгоритм Вейса – Аллена, поляризаційний аналіз, узгоджена фільтрація та метод розпізнавання образів [2, 6].

Перших два методи застосовуються для вирішення завдання виявлення сейсмічного сигналу. Після встановлення факту наявності в прийнятій реалізації сейсмічного сигналу застосовується апарат поляризаційного аналізу, який дозволяє визначити складові сейсмічного запису, ідентифікувати природу сейсмічної події та визначити місцеположення її осередку. Останніх два методи використано для визначення відповідності форми сейсмічного сигналу раніше зареєстрованим сейсмічним подіям.

Для виконання завдань виявлення сейсмічних сигналів від ЯВ на ІВП у ГЦСК застосовують останні два методи. При цьому оцінка відповідності прийнятої реалізації раніше зареєстрованим здійснюється лише, як правило, для вертикальних каналів трикомпонентного сейсмічного запису.

Для підвищення можливостей (показників виявлення) визначення відповідності прийнятої реалізації сейсмічному сигналу від ЯВ на підконтрольному ІВП за результатом спостережень ТКСС необхідно перейти до аналізу всіх складових трикомпонентного сейсмічного запису. Врахування поляризаційних властивостей складових сейсмічного сигналу дозволить здійснювати локацію осередку сейсмічної події за результатами спостережень як окремою ТКСС, так і МСС у цілому.

Крім того, участь ГЦСК у міжнародних проєктах дозволяє використовувати результати ресстрації ТКСС міжнародних та національних центрів даних інших країн. На рис. 4 наведено хвильові форми сейсмічного сигналу від ЯВ на ПнКВП, зареєстрованих південнокорейською станцією KS31, яка входить до Міжнародної системи сейсмічного моніторингу (МССМ) як станція PS31, та японською станцією JKA, що є складовою Національної системи сейсмічного моніторингу Японії як станція AS054.

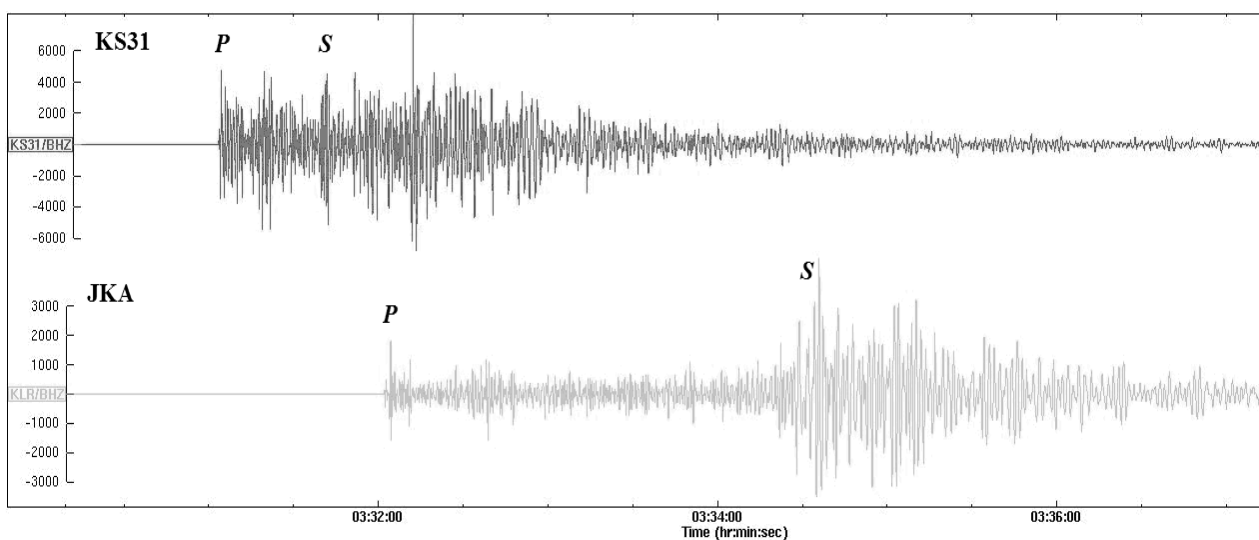


Рис. 4. Сигналограми від ЯВ на ПнКВП, зареєстровані сейсмічними станціями KS31 та JKA (вертикальний канал)

Використання вимірювальних даних МССМ дозволяє підвищити оперативність виявлення, ідентифікації, локації ЯВ та оповіщення керівництва держави про факт випробування ЯЗ та її параметри.

У табл. 2 наведено час розповсюдження сейсмічної хвилі від ПнКВП до сейсмічних станцій МССМ, вимірювальні дані яких можуть бути використані оперативно-черговою зміною ГЦСК для вирішення завдань моніторингу ПнКВП.

Таблиця 2

Час розповсюдження сейсмічної хвилі від ПнКВП до сейсмічних станцій МССМ

Сейсмічна станція, країна	Відстань до ПнКВП, км	Час пробігу P-хвилі	Час пробігу S-хвилі
KS31, Republic of Korea	435	00:01:02	00:02:04
JKA, Japan	1126	00:02:29	00:04:24
AKBB, Ukraine	7250	00:10:44	00:19:26

У цьому разі актуальним є питання застосування апарату поляризаційного аналізу для обробки вимірювальних даних ТКСС МССМ [2, 6, 10].

Врахування поляризаційних властивостей складових сейсмічного сигналу дозволить здійснювати локацію осередку сейсмічної події за результатами спостережень як окремою ТКСС, так і МСС у цілому. При цьому час отримання вимірювальних даних, необхідних для виявлення сейсмічної події та визначення її параметрів, обмежено часом надходження другої складової сейсмічного сигналу (S -хвилі) для ТКСС.

Іншим напрямком є розробка способів обробки вимірювальних даних ТКСС, які дозволять здійснювати безперервний моніторинг ІВП, використовуючи методи оптимального виявлення, враховуючи також динамічні (поляризація) та кінематичні (час розповсюдження) особливості складових сейсмічного сигналу.

За результатами сейсмічних спостережень ТКСС, стан підконтрольного ІВП можна визначити функціоналом

$$F(t) = \Omega(\alpha_P, \gamma_P, \alpha_S, \gamma_S, t - \tau_{PS}), \quad (8)$$

де α_P, γ_P – очікуваний азимут та кут виходу першої складової сейсмічного сигналу (P -хвилі) на денну поверхню, які визначаються положенням підконтрольного ІВП відносно пункту спостереження (ПС);

α_S, γ_S – очікуваний азимут та кут виходу S -хвилі на денну поверхню, які обраховують за умови ортогональності до очікуваного напрямку приходу P -хвилі;

τ_{PS} – різниця часу між вступами складових сейсмічного сигналу, яку визначають з відомості про відстань між підконтрольним ІВП та ПС за допомогою годографа.

Встановлення факту сейсмічної події в підконтрольному ІВП відбувається в разі перевищення порогу значення вирішальної функції.

Реалізація такого підходу дозволить підвищити магнітудну чутливість та оперативність оповіщення про сейсмічну подію у підконтрольному районі. Іншою перевагою даного підходу є те, що його використання не потребує наявності апріорної інформації про форму сейсмічного сигналу, що особливо важливо для моніторингу ІВП, на яких не проводилися ЯВ.

Висновки. У статті проаналізовано способи обробки вимірювальних даних сейсмічного методу спостереження, що застосовуються для вирішення завдань моніторингу ЯВ на ІВП у МСМ та ГЦСК ДКА України. Визначено напрямки удосконалення відомих та розробки нових способів обробки вимірювальних даних сейсмічного методу виявлення для ССГ та ТКСС. В умовах наявності апріорної інформації про форму сейсмічного сигналу для трикомпонентної станції застосовується метод порівняння з еталонним сигналом, для ССГ метод регульованого спрямованого прийому доповнюється кореляційною схемою обробки вимірювальних даних. За відсутності інформації про форму сейсмічного сигналу для трикомпонентної станції застосовується функціонал, який враховує кінетично-динамічні властивості очікуваного сигналу з осередком у заданому районі, для ССГ здійснюється поділенням групи на дві підгрупи з подальшим застосуванням методу кросс-кореляції між вихідними вибірками кожної підгрупи. Розглянуто можливість застосування сейсмічних станцій МССМ, що дозволяє суттєво зменшити час визначення параметрів сейсмічної події. Реалізація запропонованих підходів дозволить підвищити ефективність виявлення ЯВ на ІВП.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мережа сейсмічних спостережень України як сегмент системи моніторингу джерел потенційної екологічної небезпеки / В. М. Ващенко, С. О. Бабій, І. В. Толчонов, Ю. О. Гордієнко // Екологічна безпека. 2011. № 1. Вип. 11. С. 26–30.
2. Кедров О. К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. Москва ; Саранск, 2005. 420 с.
3. Напалов Ю. В. О теории группирования сейсмоприемников // Прикладная геофизика. 1960. Вып. 27. С. 27–34.
4. Кейпон Дж. Приложение теории обнаружения и оценки сигналов к сейсмологии больших групп // ТИИЭР. 1970. Т. 58, № 5. С. 170–180.
5. Украинская сейсмическая группа. Специализированная цифровая система сбора сейсмической информации / В. А. Дядюра, И. Ю. Михайлик, А. В. Пененко // Геофизический журнал. 2000. № 3. С. 78–81.
6. Машков О. А., Кирилюк В. А. Методика виявлення сейсмічних сигналів // Труды Академії оборони України. 2002. № 35. С. 122–131.
7. Обработка геофизических сигналов у современных автоматизированных комплексах : навч. посіб. / М. Ф. Пічугін, О. А. Машков, В. А. Кирилюк та ін. Житомир : ЖВІРЕ, 2006. 178 с.
8. Моніторинг сейсмонебезпечних районів засобами сейсмічного групування / Д. В. Голкін, О. І. Солонець, О. С. Бутенко, Ю. О. Гордієнко // Системи обробки інформації. Харків : ХУПС, 2004. Вип. 8 (36). С. 67–70.
9. Моніторинг сейсмічними засобами потенційних джерел надзвичайних подій / Р. А. Андрощук, Ю. О. Гордієнко, В. А. Кирилюк, О. І. Солонець // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ НАУ, 2011. Вип. 5. С. 173–179.
10. Поляризационный анализ сейсмических колебаний / В. Г. Алказ, Н. И. Онофраш, А. И. Перельберг. Кишинев : Штиница, 1977. 110 с.

Подано 30.12.2020

REFERENCES

1. Vashchenko, V. M., Babii, S. O., Tolchonov, I. V., & Hordiienko, Yu. O. (2011). Merezha seismichnykh sposterezhen Ukrainy yak sehment systemy monitorynhu dzherel potentsiinoi ekolohichnoi nebezpeky [Network of seismic observations of Ukraine as a segment of the monitoring system of sources of potential ecological danger]. *Ekolohichna bezpeka [Ecological safety]*, № 1, Iss. 11, 26–30 [in Ukrainian].
2. Kedrov, O. K. (2005). *Seismicheskie metody kontrolya iadernykh ispytaniy [Seismic methods of control of nuclear tests]*. Moscow [in Russian].
3. Napalov, Iu. V. (1960). O teorii gruppirovaniia seismopriemnikov [On the theory of grouping of seismic receivers]. *Prikladnaia geofizika [Applied Geophysics]*, 27, 27–34 [in Russian].
4. Keipon Dzh. (1970). Prilozhenie teorii obnaruzheniia i otsenki signalov k seismologii bol'shikh grupp [Application of Signal Detection and Evaluation Theory to Large Group

Seismology]. *TIHER [Proceeding of the IEEE]*, Vol. 58, № 5, 170–180. Trans. from English [in Russian].

5. Diadiura, V. A., Mikhailik, I. Iu., & Penenko, A. V. (2000). Ukrainskaia seismicheskaia gruppа. Spetsializirovannaia tsifrovaia sistema sbora seismicheskoi informatsii [Ukrainian seismic group. Specialized digital seismic data collection system]. *Geofizicheskii zhurnal [Geophysical journal]*, 3, 78–81 [in Russian].

6. Mashkov, O. A., & Kyryliuk, V. A. (2002). Metodyka vyivlennia seismichnykh syhnaliv [Methods of detecting seismic signals]. *Trudy Akademii oborony Ukrainy [Proceedings of the Defense Academy of Ukraine]*, 35, 122–131 [in Ukrainian].

7. Pichuhin, M. F., Mashkov, O. A., & Kyryliuk V. A. et al. (2006). Obrobka heofizychnykh syhnaliv u suchasnykh avtomatyzovanykh kompleksakh [Processing of geophysical signals in modern automated complexes]. Zhytomyr : ZhMIRE [in Ukrainian].

8. Holkin, D. V., Solonets, O. I., Butenko, O. S., & Hordiienko, Yu. O. (2004). Monitorynh seismonebezpechnykh raioniv zasobamy seismichnoho hrupuvannia [Monitoring of seismically dangerous areas by means of seismic grouping]. *Systemy obrobky informatsii [Information processing systems]*, 8 (36), 67–70. Kharkiv: KAFU [in Ukrainian].

9. Androshchuk, R. A., Hordiienko, Yu. O., Kyryliuk, V. A., & Solonets, O. I. (2011). Monitorynh seismichnymy zasobamy potentsiinykh dzherel nadzvychainykh podii [Seismic monitoring of potential sources of emergencies]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system : zb. nauk. prats [Problems of construction, testing, application and operation of complex information systems. Scientific journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 5, 173–179. Zhytomyr: ZhMI NAU [in Ukrainian].

10. Alkaz, V. G., Onofrash, N. I., Perel'berg, A. I. (1977). *Poliarizatsionnyi analiz seismicheskikh kolebanii [Polarization analysis of seismic vibrations]*. Kishinev [in Russian].

Y. O. Gordienko, A. O. Lotoshko, O. O. Paplinskiy

METHODS OF SEISMIC DATA PROCESSING FOR SOLVING TASKS OF MONITORING OF FOREIGN TESTING LANDS

The paper analyzes the methods of processing measurement data of the seismic observation method used in the International Seismic Monitoring System and the Main Center for Special Control of the State Space Agency of Ukraine to solve problems of monitoring nuclear tests at foreign test sites. The directions of improvement of known and development of new methods of processing of measuring data of seismic method of detection in the conditions of presence and absence of a priori information on the form of a seismic signal are defined. If the form of the expected seismic signal is known, then the monitoring of foreign test sites by the seismic grouping system can be realized by supplementing the method of controlled directional reception with a correlation scheme of measurement data processing. In the absence of information on the shape of the seismic signal, the monitoring of the test site is carried out by dividing the group into two subgroups, followed by the cross-correlation method between the original samples of each subgroup. For a network of three-component stations, if there is information about the

shape of the expected seismic signal, the method of comparison with the reference signal is used. In the absence of reference signals, monitoring is implemented using system discriminant, which takes into account the kinetic and dynamic properties of the expected signal with a cell from a given area. Possibilities of application of seismic stations of the International system of seismic monitoring are analyzed, use of measuring data which for the decision of problems of monitoring of foreign landfills allows to reduce time of definition of parameters of a seismic event essentially. A feature of the signals registered by seismic stations of the International System is the presence of types of seismic waves characteristic of events with cells in the near zone. Implementation of monitoring of test sites is possible by taking into account the polarization and dynamic properties of seismic waves. The implementation of the proposed approaches will increase the efficiency of solving the problem of detecting nuclear explosions at foreign test sites.

Keywords: *seismic monitoring; foreign test site; seismic grouping system; three-component seismic station; methods of seismic data processing.*

Н. М. Каращук, С. О. Соболенко, В. О. Савенко, І. А. Цикалов

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ АНТЕНИ ДЛЯ СИСТЕМ РАДІОМОНІТОРИНГУ БОРТОВИХ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

Аналіз досвіду сучасної збройної боротьби показує, що своєчасне виявлення сигналів бортових джерел радіовипромінювання системами радіомоніторингу є важливим завданням. Одним із шляхів його вирішення є застосування компактних ширококутових антен сантиметрового діапазону хвиль, тому розроблення та вдосконалення методик розрахунку ширококутових компактних антен сантиметрового діапазону хвиль є важливим та актуальним науково-практичним завданням. Запропоновано удосконалити методику розрахунку антени біжучої хвилі на основі нерегулярних симетричних щілинних ліній, розташованих на багатошаровій діелектричній підкладці (антени Вівальді), шляхом врахування товщини діелектричної підкладки, відносної ефективної діелектричної проникності шарів підкладки та двостороннього живлення для забезпечення покращення спрямованих властивостей антени та її узгодження в заданій смузі частот. Зокрема, у формулах фазового множника системи (для двох випромінювальних елементів) і результуючої діаграми спрямованості антени враховано двостороннє живлення та товщину й відносну діелектричну проникність підкладки. Наведено удосконалені формули для розрахунку та вибору таких параметрів антени: довжин L_{xn} , L_{yn} ; максимальної та мінімальної ширини щілини ω_{max} , ω_{min} ; коефіцієнта розкриву щілини R_y ; ширини смужки симетричної мікросмушкової лінії живлення ω_{cm1} у місці підключення коаксіальної лінії живлення; ширини смужки в місці перетину із щілинною лінією ω_{cm2} ; ширини симетричної щілинної лінії в основі розкриву ω ; довжини чвертьхвильового трансформатора на основі симетричної мікросмушкової лінії L_{mc} ; довжини симетричної мікросмушкової лінії живлення L_{mt} ; довжини щілини l ; діаметра резонатора D_c ; радіуса обкладинки конструктивного конденсатора R_s ; параметрів θ_s , θ ; L_s . Практична значущість отриманих результатів полягає в можливості наближеного розрахунку компактних ширококутових антен сантиметрового діапазону хвиль для систем радіомоніторингу бортових джерел радіовипромінювання з подальшим моделюванням та практичним виготовленням даних антен.

Ключові слова: антена Вівальді; ефективна діелектрична проникність; багатошарова діелектрична підкладка; нерегулярні симетричні щілинні лінії; радіомоніторинг; удосконалена методика.

Постановка проблеми в загальному вигляді. В антені біжучої хвилі на основі нерегулярної симетричної щілинної лінії, розташованої на діелектричній підкладці (антені Вівальді), головний максимум діаграми спрямованості (ДС) відхиляється. Це відбувається за рахунок зсуву фаз між напруженостями полів, що створюються будь-якими елементами, розташованими вздовж осі, який буде відмінний від нуля через те, що фазова

© Н. М. Каращук, С. О. Соболенко, В. О. Савенко, І. А. Цикалов, 2020

швидкість не дорівнює швидкості світла за наявності діелектричної підкладки [1]. Такого типу антена має також достатньо високий вхідний опір [2], що ускладнює узгодження із мікросмужковою лінією живлення. Недоліки відхилення головного максимуму діаграми спрямованості та складності узгодження антени із мікросмужковою лінією живлення можна усунути шляхом застосування двосторонньої антени, яка має низький вхідний опір і збуджується мікросмужковою лінією, розташованою всередині діелектричної підкладки [2].

Отже, методикам наближеного розрахунку антени біжучої хвилі на основі нерегулярної симетричної щілинної лінії, розташованої на діелектричній підкладці, притаманні такі недоліки (обмеження): ускладнений розрахунок поля в дальній зоні, що викликано складним розподілом струмів на поверхні антени та електромагнітного поля в ближній зоні [3]; відсутність точних методів розв'язку електродинамічної задачі; наближені методи розрахунку не враховують одночасно відносної діелектричної проникності багатосарової підкладки та двостороннього живлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Побудова точних математичних моделей для антен біжучої хвилі на основі нерегулярних симетричних щілинних ліній, розташованих на багатосаровій діелектричній підкладці, є досить складним завданням [2, 4]. Отримання необхідних розмірів та форм антени біжучої хвилі на основі нерегулярної симетричної щілинної лінії, розташованої на діелектричній підкладці відповідно до конкретних вимог, здійснюють переважно методами чисельного електродинамічного моделювання, які реалізуються в програмних комплексах, призначених для розрахунку антен та надвисокочастотних (НВЧ) пристроїв, наприклад, ANSYS HFSS, EMSS FEKO, CST Studio Suite [5, 6]. На початковому етапі чисельного моделювання випромінювачів на основі щілинних ліній застосовуються наближені методи розрахунку, які полягають в тому, що випромінювач розглядається як нерегулярна лінія передачі, яка узгоджує регулярну лінію з вільним простором. Основним критерієм узгодження є мінімізація коефіцієнта відбиття на вході узгоджувального пристрою, який, у свою чергу, залежить від хвильового опору та довжини переходу. За цього досягаються відповідні частотні характеристики антени [7]. Коли зміна розкриву антени є плавною, може бути проведена його апроксимація на регулярні ділянки з їх наступним розрахунком.

Отже, є необхідність удосконалення наближеної методики розрахунку антени біжучої хвилі на основі нерегулярних симетричних щілинних ліній, розташованих на багатосаровій діелектричній підкладці, з урахуванням особливостей конструкції (товщини багатосарової діелектричної підкладки та двостороннього живлення).

Формулювання завдання дослідження. Необхідно удосконалити методику розрахунку антени біжучої хвилі на основі нерегулярних симетричних щілинних ліній, розташованих на багатосаровій діелектричній підкладці, шляхом врахування товщини діелектричної підкладки, відносної ефективної діелектричної проникності її шарів і двостороннього живлення для покращення спрямованих властивостей антени та її узгодження в заданій смузі частот.

Виклад основного матеріалу. Антена біжучої хвилі на основі нерегулярних симетричних щілинних ліній, розташованих на багатосаровій діелектричній підкладці,

зображена на рис. 1, на якому позначено: ω_{min} , ω_{max} – мінімальна та максимальна ширина щілини; l – довжина щілини; ω_i , ω_{i+1} – ширина i -ї та $i+1$ -ї регулярної щілинної лінії відповідно; l_i – довжина i -ї регулярної щілинної лінії; L_y , L_x – ширина та довжина антени.

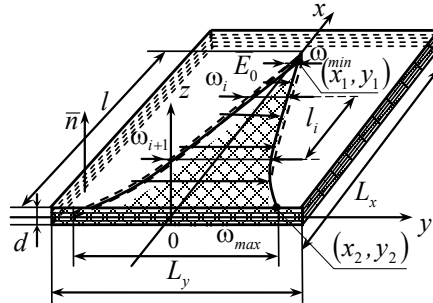


Рис. 1. Антена біжучої хвилі на основі нерегулярних симетричних щілинних ліній, розташованих на багатошаровій діелектричній підкладці

Геометричні розміри антени (рис. 1) можуть бути зменшені за наявності впливу діелектричної проникності багатошарової діелектричної підкладки без зміни електричних розмірів антени. Проте для забезпечення розрахунку таких антен необхідно у відомій методиці [8] додатково врахувати ефективну діелектричну проникність багатошарової діелектричної підкладки ϵ_{ef} .

Удосконалена методика розрахунку геометричних розмірів та характеристик антени біжучої хвилі на основі нерегулярних симетричних щілинних ліній, розташованих на багатошаровій діелектричній підкладці, включає пункти, описані нижче.

1. Розрахунок ефективної діелектричної проникності багатошарової діелектричної підкладки ϵ_{ef_n} за формулою

$$\epsilon_{ef_n} = \sum_n d_{e_n} \epsilon_{r_n}, \quad (1)$$

де d_{e_n} – відносні товщини шарів багатошарової діелектричної підкладки, м;

ϵ_{r_n} – відносні діелектричні проникності компонентів суміші.

2. Визначення ширини L_{yn} та довжини L_{xn} антени (рис. 2) залежно від необхідної ширини ДС у площинах Е та Н з урахуванням значення ефективної діелектричної проникності багатошарової діелектричної підкладки, згідно з умовами (2)–(5):

для забезпечення ширини ДС у площині Е – 70° , у площині Н – 180° :

$$L_{yn} = \lambda_{dmax} / 2; \quad (2)$$

для забезпечення приблизно однакових значень ширини ДС у площинах Е та Н:

$$L_{yn} = 1,5 \cdot \lambda_{dmax}; \quad (3)$$

для забезпечення ширини ДС 60° у площині Е та 70° у площині Н:

$$L_{yh} = \lambda_{dmax}, \quad (4)$$

де λ_{dmax} – максимальне значення робочої довжини хвилі в щілинній лінії, м.

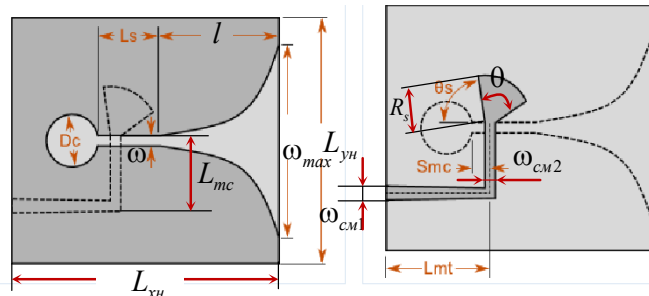


Рис. 2. Позначення геометричних розмірів антени біжучої хвилі на основі нерегулярних симетричних щілинних ліній, розташованих на багатошаровій діелектричній підкладці, та її елемента живлення

Довжина антени обирається відповідно до умови [8–10]:

$$L_{xn} \approx 1,5 \cdot L_{yh}. \quad (5)$$

3. Знаходження максимальної та мінімальної ширини щілини за формулами (6) та (7) з урахуванням ефективної діелектричної проникності багатошарової діелектричної підкладки:

$$\omega_{max} = \frac{c}{2f_{min} \sqrt{\epsilon_{ef}}}, \quad (6)$$

$$\omega_{min} = \frac{c}{2f_{max} \sqrt{\epsilon_{ef}}}, \quad (7)$$

де f_{max} – максимальна робоча частота смуги пропускання антени, Гц.

4. Розрахунок форми експоненціального розкриву антени за формулою (8) з урахуванням (9), (10) та вибраного значення коефіцієнта розкриву щілини R_y .

Форма розкриву описується такою формулою [2]:

$$x = C_1 e^{Ry} + C_2, \quad (8)$$

де C_1, C_2 – сталі, які вибираються таким чином, щоб розкрив пройшов через точки $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$, що знаходяться на його початку та кінці (рис. 1).

Коефіцієнти C_1, C_2 визначаються за формулами [2]:

$$C_1 = \frac{x_2 - x_1}{e^{Ry_2} - e^{Ry_1}}, \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{x_1 e^{Ry_2} - x_2 e^{Ry_1}}{e^{Ry_2} - e^{Ry_1}}, \quad (10)$$

де R_y – коефіцієнт розкриву щілини [2].

Коефіцієнт розкриву щілини R_y впливає на зміну хвильового опору антени: якщо він великий, то хвильовий опір змінюється стрибкоподібно від максимального до мінімального значення на вищих частотах смуги. Наприклад, якщо $R_y = 0,08$ мм, то хвильовий опір антени змінюється від 40 до 80 Ом у межах робочої смуги частот [9], тоді доцільно використовувати антену з хвильовим опором системи живлення 50 Ом.

5. Розрахунок ширини смужки симетричної мікросмужкової лінії живлення $\omega_{см1}$ (рис. 2) у місці підключення коаксіальної лінії живлення з хвильовим опором $Z_{л}$ із метою виконання умови $Z_{л} \approx Z_{лсм1}$, а також розрахунок ширини смужки в місці перетину із щілинною лінією $\omega_{см2}$ для виконання умови щодо $Z_{лсм1} \approx Z_{лсм2}$ за формулою

$$\omega_{см1,2} = d \left(\left(200 / \sqrt{\varepsilon_{эф}} Z_{лсм1,2} \right) - 1 \right). \quad (11)$$

6. Розрахунок ширини симетричної щілинної лінії в основі розкриву ω за формулою (12) таким чином, щоб забезпечити необхідне значення її хвильового опору $Z_{щл1}$:

$$\begin{aligned} Z_{щл1} = & 60 + 3,69 \sin \left(\frac{\varepsilon_{эф} - 2,22}{2} \cdot 18 \right) + 135,5 \ln(10\varepsilon_{эф}) \sqrt{\frac{\omega}{\lambda_{min}}} + 2,81 \times \\ & \times \left(1 - 0,011 \varepsilon_{эф} (4,48 + \ln(\varepsilon_{эф})) \right) \left(\frac{\omega}{d} \right) \ln \left(\frac{100d}{\lambda_{min}} \right) + 131,1 (1,028 - \ln(\varepsilon_{эф})) \times \\ & \times \sqrt{\frac{d}{\lambda_{min}}} + 12,48 \left(1 + 0,18 \ln(\varepsilon_{эф}) \left(\frac{\omega}{d} \right) \right) / \left(\sqrt{\varepsilon_{эф} - 2,06 + 0,85 \left(\frac{\omega}{d} \right)^2} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

де λ_{min} – мінімальна робоча довжина хвилі смуги пропускання антени, м.

7. Знаходження довжини чвертьхвильового трансформатора на основі симетричної мікросмужкової лінії L_{mc} за формулою (13) з урахуванням (14), (15), довжини симетричної мікросмужкової лінії живлення L_{mt} за виразом (16), а також довжини щілини $l = 2 \cdot \omega_{max}$ (рис. 2):

$$L_{mc} = \lambda_{dmin} / 4, \quad (13)$$

де λ_{dmin} – мінімальне значення робочої довжини хвилі у щілинній лінії, м.

Мінімальне значення робочої довжини хвилі в щілинній лінії знаходимо за формулою [10]

$$\lambda_{\delta min} = \lambda_{min} / \sqrt{\varepsilon_{ef}}, \quad (14)$$

де λ_{min} – мінімальна робоча довжини хвилі у вільному просторі, яка розраховується за виразом [10]

$$\lambda_{min} = c / f_{max}. \quad (15)$$

Довжину симетричної мікросмушкової лінії живлення визначаємо за виразом [9]

$$L_{mt} = \lambda_{\delta min} / 2. \quad (16)$$

8. Вибір параметрів антени: діаметра резонатора D_c ; радіуса обкладинки конструктивного конденсатора R_s ; параметрів θ_s , θ ; L_s (рис. 2).

Розмір резонатора щілинної лінії має значний вплив на реактивну складову опору на нижніх частотах смуги. Діаметр резонатора $D_c > 5$ мм (рис. 2) знижує мінімальну робочу частоту, проте опір різко збільшується, що призводить до зростання коефіцієнта стоячої хвилі за напругою на нижніх частотах смуги [9]. Тому значення діаметра резонатора доцільно обирати $D_c \leq 5$ мм. Значення параметрів θ_s , θ (рис. 2) мають бути в межах $70^\circ - 90^\circ$, радіус обкладинки конструктивного конденсатора $R_s - 4-5$ мм, $l = 2 \cdot \omega_{max}$, $L_s - 1-4$ мм [9].

9. Проведення ступінчатої апроксимації розкриву антени на регулярні щілинні лінії за умовою [7], перевірка збереження умови біжучої хвилі уздовж розкриву [7] з урахуванням змінної товщини діелектричної підкладки в місці i -ої ділянки апроксимації щілини.

10. Розрахунок поперечної компоненти напруженості електричного поля для i -ї регулярної ділянки антени за виразом відповідно до [7].

11. Розрахунок напруженості електричної складової електромагнітного поля в площинах E та H з урахуванням товщини діелектричної підкладки для всіх регулярних щілинних ліній, які утворюють антену після ступінчатої апроксимації її розкриву [7].

12. Визначення результуючого поля в дальній зоні за сумарним вкладом кожної регулярної ділянки відповідно до формули

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N E_{\theta, \varphi}^i(\theta, \varphi), \quad (17)$$

де $E_{\theta, \varphi}^i(\theta, \varphi)$ – вклад i -ї регулярної ділянки направляючої структури антени в поле дальньої зони, В/м.

13. Розрахунок результуючої ДС антени з урахуванням фазового множника системи (18) за формулою (19):

$$\psi(\theta) = \sum_{i=0}^{L-1} \left(-j \frac{1}{2} e^{jk_0 d_i \sin \theta} \right), \quad (18)$$

де k_δ – хвильове число ($k_\delta = 2\pi/\lambda_\delta$), рад/м;

θ – кут від нормалі до осі антенної системи, град;

$$E_p(\theta, \varphi) = \sum_{j=1}^2 E_j(\theta, \varphi) \cdot \psi(\theta), \quad (19)$$

де $E_j(\theta, \varphi)$ – результуюче поле в дальній зоні від j -ї нерегулярної симетричної щілинної лінії (верхньої та нижньої відносно багатопарової діелектричної підкладки).

Висновки. Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні формул математичного апарату для наближеного розрахунку геометричних розмірів антени біжучої хвилі на основі нерегулярних симетричних щілинних ліній, розташованих на багатопаровій діелектричній підкладці, шляхом врахування ефективної діелектричної проникності багатопарової діелектричної підкладки, її товщини та двостороннього живлення.

Достовірність удосконалених формул підтверджена шляхом збіжності за одиницями вимірювання.

Отримані результати мають практична значущість, яка полягає в можливості наближеного розрахунку компактних широкосмугових антен сантиметрового діапазону хвиль для систем радіомоніторингу бортових джерел радіовипромінювання з подальшим моделюванням та практичним виготовленням даних антен.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Юпиков О. А., Еремкин В. Ю. Электродинамическая модель антенной решетки из элементов Вивальди и ее импеданс. Экспериментальная верификация результатов моделирования // Матеріали 13-го міжн. форуму «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», (23–25 квітня 2009) Ч.1. Харків: ХНУРЕ, 2009. С. 78–81.
2. Подгорный О. В. Проектирование антенн и фазированных антенных решеток. Минск : Бестпринт, 2012. 427 с.
3. Манойлов В. П., Павлюк В. В., Ставісюк Р. Л. Широкопугові рупорні антени зі складною формою поперечного перерізу : Монографія. Житомир : Вид-вещь О. О. Євенок, 2016. 212 с.
4. Карашук Н. М., Манойлов В. П., Морозов Д. С., Сидорчук О. Л. Антена Вивальді на основі симетричних щілинних ліній // Вісник НТУУ “КПІ”. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. Київ : НТУУ “КПІ”, 2018. № 73. С. 5–10.
5. Explore Pervasive Engineering Simulation. URL: www.ansys.com (last accessed: 10.03.2021).
6. CST Studio Suite. Программное обеспечение для моделирования электродинамических и мультифизических задач. CST, 2017. 32 с. URL: CST/CST_STUDIO_SUITE2018_Rus.pdf (дата звернення: 17.03.2021).
7. Фролов А. А., Гирич С. В., Заярный В. П. Изучение электродинамических характеристик антенн и антенных систем СВЧ диапазона // Изв. вузов. Радиофизика. Т. LII, № 4. 2009. С. 328–335.

8. Дубровка Ф. Ф., Сушко О. Ю. Аналіз антени Вівальді та малоелементних антенних решіток на їх основі // Вісник НТУУ КПІ. Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. Київ, 2008. № 36. С. 72–76.
9. Frank B. Gross. *Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering* // McGraw-Hill: New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011. P. 526.
10. Zhou Y., Huang J., Wu W. Conformal LPDA antenna array for direction finding application // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. Vol. 9. P. 272–284.

Подано 30.12.2020

REFERENCES

1. Iupikov, O. A., & Eremkin, V. Iu. (2009). Elektrodinamicheskaja model' antennoi reshetki iz elementov Vival'di i ee impedans. Eksperimental'naja verifikatsiia rezul'tatov modelirovaniia [Electrodynamic model of an antenna array made of Vivaldi elements and its impedance. Experimental verification of simulation results]. In *Materiali 13-go mizhn. Foruma «Radioelektronika i molodezh v XXI veke». Ch. 1 [Materials of the 13th International Forum "Radio electronics and youth in the XXI century". Part 1]*. Kharkiv, April 23–25, 2009. (pp. 78–81). Kharkiv: KhNURE [in Russian].
2. Podgornyj, O. V. (2012). *Proektirovanie anenn i fazirovannykh antennykh reshetok [Design of antennas and phased antenna arrays]*. Minsk [in Belarusian].
3. Manoilov, V. P., Pavliuk, V. V., & Stavisiuk, R. L. (2016). *Shyrokosmuhovi ruporni anteny z skladnoiu formoiu poperechnoho pererizu [Broadband horn antennas with a complex cross-sectional shape]*. Zhytomyr [in Ukrainian].
4. Karashchuk, N. M., Manoilov, V. P., Morozov, D. S., & Sydoruk, O. L. (2018). Antena Vivaldi na osnovi symetrychnykh shchilynnykh linii [Vivaldi antenna based on symmetrical slit lines]. *Visnyk NTUU "KPI". Radiotekhnika. Radioaparatabuduvannja [Bulletin of NTUU "KPI". Radio Engineering Series. Radio engineering]*, 73, 5–10 [in Ukrainian].
5. Explore Pervasive Engineering Simulation. Retrieved from: www.ansys.com
6. *CST Studio Suite. Programmnoe obespechenie dlia modelirovaniia elektrodinamicheskikh i mul'tifizicheskikh zadach. [Electrodynamic and multiphysics simulation software]*. (2017). Retrieved from: [CST/CST_STUDIO_SUITE2018_Rus.pdf](#) [in Russian].
7. Frolov, A. A., Girich, S. V., & Zaiarnyi, V. P. (2009). Izuchenie elektrodinamicheskikh kharakteristik antenn i antennykh sistem SVCh diapazona [Study of the electrodynamic characteristics of antennas and antenna systems in the microwave range]. *Iz. vuzov. Radiofizika [Izvestiya Vuzov. Radiophysics]*, Vol. LII, 4, 328–335 [in Russian].
8. Dubrovka, F. F., & Sushko, O. Yu. (2008). Analiz anteny Vivaldi ta maloelementnykh antennykh reshitok na yikh osnovi [Analysis of Vivaldi antenna and low-element antenna arrays based on them]. *Visnyk NTUU KPI. Serija Radiotekhnika. Radioaparatabuduvannja [Bulletin of NTUU KPI. Radio Engineering Series. Radio engineering]*, 36, 72–76 [in Ukrainian].
9. Frank B. Gross. (2011). *Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering*. McGraw-Hill: New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid,

Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto, The McGraw-Hill Companies, Inc.

10. Zhou, Y., Huang, J., & Wu, W. (2016). Conformal LPDA antenna array for direction finding application. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9, 272–284.

N. M. Karashchuk, S. O. Sobolenko, V. O. Savenko, I. A. Tsykalov

ADVANCED METHOD OF ANTENNA CALCULATION FOR RADIO MONITORING SYSTEMS OF ON-BOARD RADIO SOURCES

Analysis of the experience of modern armed struggle shows that timely detection of signals onboard radio sources by radio monitoring systems is an important task. One way to ensure its solution is the use of compact broadband antennas in the centimeter range. Therefore the development and improvement of methods for calculating broadband compact antennas in the centimeter wave range is an important and relevant scientific and practical task. An improved method for calculating a traveling wave antenna based on irregular symmetrical slit lines located arranged on a multilayer dielectric substrate (Vivaldi antennas) is proposed, by taking into account the thickness of the dielectric substrate, the relative effective dielectric constant of the substrate layers and two-way power supply to improve the directional properties of the antenna and its coordination in a given frequency band. In particular, the formulas of the phase multiplier of the system (for two radiating elements) and the resulting pattern of the antenna take into account the two-way power supply and the thickness and relative dielectric constant of the substrate. These advanced formulas for calculating and selecting these options antennas, lengths; maximum and minimum slot width; the coefficient of opening the gap; the width of the strip of symmetrical microstrip power line at the connection of the coaxial power line; the width of the strip at the intersection with the slit line; the width of the symmetrical slit line at the base of the opening; the length of a quarter-wave transformer based on a symmetrical microstrip line; the length of the symmetric microstrip power line; slit length; resonator diameter; the radius of the cover of the structural capacitor. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of an approximate calculation of compact broadband antennas in the centimeter wavelength range. The results make it possible to model and manufacture these antennas for radio monitoring systems for onboard radio sources.

Keywords: *Vivaldi antenna; effective dielectric constant; multilayer dielectric substrate; irregular symmetrical slit lines; radio monitoring; improved methodology.*

О. В. Самчишин, І. В. Гуменюк, К. В. Сметанін, О. С. Бойченко

МЕТОД ШИФРУВАННЯ / РОЗШИФРУВАННЯ ДАНИХ НА ОСНОВІ ПІКСЕЛЬНОГО АЛФАВІТУ МОНОХРОМНОГО ЗОБРАЖЕННЯ

Удосконалення доступності інформаційних технологій та зростання об'єму цифрового трафіка призводить до актуалізації проблеми захисту даних. Особливо значущою є проблема передачі конфіденційних даних незахищеними каналами зв'язку, наприклад, мережею Інтернет. Останнім часом спостерігається значне збільшення кількості кібератак, зокрема спроб перехоплення та крадіжки конфіденційної інформації. Її захист у комп'ютерних інформаційно-телекомунікаційних системах є пріоритетним завданням. На сьогоднішній день одним із найбільш надійних методів захисту інформації справедливо вважається шифрування. Криптографічні перетворення даних є найбільш ефективним засобом системи зберігати конфіденційність інформації в ході її введення, виведення, передачі, обробки та зберігання, а також протистояти її руйнуванню, розкраданню чи спотворенню. Але найефективнішим способом забезпечення захищеності інформації є суміщене використання стеганографічних і криптографічних засобів. З метою гарантування високої стійкості зашифрованої інформації під час передачі її каналами мережі інформаційно-телекомунікаційних систем та зниження рівня загрози несанкціонованого доступу до неї або атаки на шифр запропоновано змінити підхід щодо розв'язання задачі шифрування даних. Запропоновано метод шифрування / розшифрування цифрової текстової інформації на основі піксельного алфавіту монохромного зображення, який ґрунтується на приховуванні або деформації графічних даних. Такий підхід дозволяє забезпечити високу стійкість зашифрованої інформації та значно зменшити рівень загрози несанкціонованого доступу до неї або атаки на шифр за рахунок кодування кожного символу динамічним випадковим числом з діапазону його значень та приховування шифрованого тексту в позиції графічних даних з урахуванням таємного ключа, який відомий тільки відправнику та адресату.

Ключові слова: шифрування / розшифрування даних; криптографічний алгоритм; цифрова стеганографія; інформаційно-телекомунікаційна система.

Постановка проблеми в загальному вигляді. На сьогодні важливим чинником, що впливає на політичну й економічну складові національної безпеки, є ступінь захищеності інформації й інформаційного середовища. Особливо актуальною є проблема передачі конфіденційних даних незахищеними каналами зв'язку, наприклад, мережею Інтернет. Через стрімкий розвиток засобів обчислювальної техніки й відкритих мереж передачі даних виникає нагальна потреба в забезпеченні шифрування інформації в режимі реального часу. Хоча сьогодні застосовують багато алгоритмів шифрування, проте сучасні стандарти шифрування є досить повільними, оскільки передбачають велику кількість операцій [2]. Отже, виникає необхідність у розробці алгоритму шифрування, який міг би здійснювати це на порядок швидше. Найефективнішим способом забезпечення конфіденційності інформації є суміщене використання стеганографічних і криптографічних засобів.

© О. В. Самчишин, І. В. Гуменюк, К. В. Сметанін, О. С. Бойченко, 2020

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Широке застосування комп'ютерних технологій в автоматизованих системах обробки інформації та управління призвело до загострення проблеми захисту інформації від несанкціонованого доступу. В останні роки з розвитком ІТ-індустрії кількість спроб отримати несанкціонований доступ до конфіденційної інформації збільшилася, а проблемами інформаційної безпеки зацікавилися багато вчених та фахівців різних країн [3, 4]. Це свідчить про те, що потреба в захисті конфіденційної інформації значно зросла.

З-поміж великої кількості різноманітних методів захисту від несанкціонованого доступу особливе місце займають криптографічні методи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що найбільшу популярність у комп'ютерній стеганографії здобули підходи, що використовують у ролі контейнера зображення [6].

Найбільш близьким способом, який розглядається як аналог розробленого авторами методу, є шифрування та розшифрування цифрових даних, переданих або збережених з використанням методу передачі пріоритетних пікселів [1], за яким здійснюється кодування та декодування цифрових даних, переданих або збережених із використанням пріоритетного способу передачі пікселів інформаційного вмісту, що підлягає захисту. Кожна група пікселів містить значення позиції, що використовується як пріоритетне, йому присвоюється хоча б один ключ, за допомогою якого значення позиції пікселя або групи пікселів за запитом шифруються чи розшифровуються. Але цей спосіб не дозволяє забезпечити достатню криптостійкість та унеможливити успішну атаку на шифр за рахунок можливості визначення пріоритетності пікселів або значень їх позицій під час передачі зашифрованого повідомлення, а також має невисоку швидкодію шифрування та розшифрування цифрової текстової інформації за рахунок високої операційної складності алгоритму шифрування, який застосовується в ньому.

Формулювання завдання дослідження. З метою забезпечення високої стійкості зашифрованої інформації для передачі її каналами мережі інформаційно-телекомунікаційних систем (ІТС) та зниження рівня загрози несанкціонованого доступу до неї або атаки на шифр запропоновано змінити підхід щодо розв'язання задачі шифрування даних. Тому необхідно розробити метод шифрування цифрової текстової інформації, який ґрунтується на приховуванні або деформації графічних даних, який не мав би недоліків аналогу.

Виклад основного матеріалу. Терміни, які використовуються в запропонованому методі:

Повідомлення – вихідне текстове повідомлення;

Довжина – кількість символів Повідомлення;

Нормативний алфавіт – символи Повідомлення (літери української абетки, цифри 0–9, спеціальні та символи пунктуації), яке шифрується та передається каналами мережі ІТС;

Алфавіт шифрування – статичні діапазони значень яскравостей пікселів монохромного зображення (0–255), які присвоюються кожному символу Нормативного алфавіту;

Шифрування – процес заміни Нормативного алфавіту Повідомлення елементами Алфавіту шифрування;

Шифротекст – результат Шифрування;

Ключ – позиції із визначеним інтервалом розміщення пікселів на графічних даних з яскравістю, що відповідають Алфавіту шифрування;

Стегоповідомлення – результат приховування Шифротексту;

Відправник – користувач, який здійснює Шифрування Повідомлення та передачу Шифротексту;

Адресат – користувач, який отримує та розшифровує Шифротекст у Повідомлення;

Програма – комп'ютерна програма, яка здійснює Шифрування Повідомлення та розшифрування Шифротексту.

Поставлене завдання вирішується в такий спосіб: у методі шифрування / розшифрування даних на основі піксельного алфавіту монохромного зображення, за яким визначають Ключ, кожному елементу Нормативного алфавіту присвоюють статичний діапазон значень яскравості пікселів монохромного зображення. Формується Алфавіт шифрування, за яким здійснюється Шифрування Повідомлення та приховується Шифротекст у цифрове зображення шляхом його деформації, зокрема кодування значення яскравості пікселів, що відповідають Алфавіту шифрування, на позиції з визначеним Ключем. Після передачі Адресату та отримання Стегоповідомлення відбувається його розшифрування в Повідомлення з використанням Алфавіту шифрування за визначеним Ключем.

Такий підхід дозволяє забезпечити високу стійкість зашифрованої інформації та значно зменшити рівень загрози несанкціонованого доступу до неї або атаки на шифр за рахунок Шифрування кожного символу Повідомлення динамічним випадковим числом із діапазону значень відповідного символу. Значне зниження рівня загрози несанкціонованого доступу до інформації або атаки на шифр досягається за рахунок приховування Шифротексту в позиції графічних даних із урахуванням Ключа, який відомий Відправнику та Адресату.

Шифрування / розшифрування даних на основі піксельного алфавіту монохромного зображення проводиться за декілька етапів.

1. Формування Алфавіту шифрування, за яким кожному символу Нормативного алфавіту присвоюються статичний діапазон значень яскравостей пікселів монохромного зображення (0–255) для: літер української абетки; літер англійської абетки; цифр 0–9; спеціальних символів.

2. Перетворення Нормативного алфавіту Повідомлення в Шифротекст.

3. Формування Ключа (визначення початкового положення першого елемента Шифротексту та інтервалу наступних).

4. Формування Стегоповідомлення (приховування Шифротексту або деформація графічних даних значеннями Алфавіту шифрування в позиції, що визначені Ключем).

5. Передача (приймання) Стегоповідомлення.

6. Розшифрування Стегоповідомлення (визначення значень яскравостей пікселів у позиціях, заданих Ключем, перетворення їх у Нормативний алфавіт та формування Повідомлення).

Етап формування Алфавіту шифрування. Для множини всіх доступних символів, які використовуються в Повідомленні, задаються статичні діапазони значень, що знаходяться в межах $[000; 255]$, а саме:

літер української абетки (табл. 1): $B_1 = \{b_{\alpha''}, b_{\sigma''}, \dots, b_{\rho''}\}$, $B_1 \in [000; 095]$;

літер англійської абетки (табл. 2): $B_2 = \{b_{„a”}, b_{„b”}, \dots, b_{„z”}\}$, $B_2 \in [096; 173]$;

цифр (табл. 3): $B_3 = \{b_{„0”}, b_{„1”}, \dots, b_{„9”}\}$, $B_3 \in [174; 203]$;

спеціальних символів (табл. 4): $B_4 = \{b_{„?”}, b_{„!”}, \dots, b_{„пробіл”}\}$, $B_4 \in [204; 255]$.

Таблиця 1

Алфавіт шифрування літер української абетки

Нормативний алфавіт	А (а)	Б (б)	В (в)	Г (г)	Д (д)	Е (е)	Є (є)	Ж (ж)
Алфавіт шифрування	000–002	003–005	006–008	009–011	012–014	015–017	018–020	021–023
Нормативний алфавіт	З (з)	И (и)	І (і)	Ї (ї)	Й (й)	К (к)	Л (л)	М (м)
Алфавіт шифрування	024–026	027–029	030–032	033–035	036–038	039–041	042–044	045–047
Нормативний алфавіт	Н (н)	О (о)	П (п)	Р (р)	С (с)	Т (т)	У (у)	Ф (ф)
Алфавіт шифрування	048–050	051–053	054–056	057–059	060–062	063–065	066–068	069–071
Нормативний алфавіт	Х (х)	Ц (ц)	Ч (ч)	Ш (ш)	Щ (щ)	Ь (ь)	Ю (ю)	Я (я)
Алфавіт шифрування	072–074	075–077	078–080	081–083	084–086	087–089	090–092	093–095

Таблиця 2

Алфавіт шифрування літер англійської абетки

Нормативний алфавіт	A (a)	B (b)	C (c)	D (d)	E (e)	F (f)	G (g)	H (h)	
Алфавіт шифрування	096–098	099–101	102–104	105–107	108–110	111–113	114–116	117–119	
Нормативний алфавіт	I (i)	J (j)	K (k)	L (l)	M (m)	N (n)	O (o)	P (p)	Q (q)
Алфавіт шифрування	120–122	123–125	126–128	129–131	132–134	135–137	138–140	141–143	144–146
Нормативний алфавіт	R (r)	S (s)	T (t)	U (u)	V (v)	W (w)	X (x)	Y (y)	Z (z)
Алфавіт шифрування	147–149	150–152	153–155	156–158	159–161	162–164	165–167	168–170	171–173

Таблиця 3

Алфавіт шифрування цифр

Нормативний алфавіт	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Алфавіт шифрування	174–176	177–179	180–182	183–185	186–188	189–191	192–194	195–197	198–200	201–203

Алфавіт шифрування спеціальних символів

Нормативний алфавіт	?	!	.	,	%	=	+	/	:
Алфавіт шифрування	204– 206	207– 209	210– 212	213– 215	216– 218	219– 221	222– 224	225– 227	228– 230
Нормативний алфавіт	;	'	\	_	<	>	()	Пробіл
Алфавіт шифрування	231– 233	234– 236	237– 239	240– 242	243– 245	246– 248	249– 251	252– 254	255

Особливість формування Алфавіту шифрування полягає в поданні його в триадній (трицифровій) формі, при цьому кожен його елемент відповідає величині яскравості пікселя монохромного зображення, який приховуватиметься в (або деформуватиме) графічні дані, зокрема растрове зображення RGB-моделі.

Етап перетворення Нормативного алфавіту Повідомлення у Шифротекст. Для кожного окремого Нормативного алфавіту

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_i\}; i = \overline{1, n},$$

де n – Довжина Повідомлення, здійснюється заміна на випадкове значення із заданого йому діапазону Алфавіту шифрування. Наприклад, $b_{„a”} = [000; 002]$ (літера “А” української абетки може бути замінена числами: 000, 001 та 002), у результаті чого формується Шифротекст:

$$G = \{rand(b_m)_i\},$$

де $rand$ – функція генерування випадкових чисел.

Етап формування Ключа. Для Шифротексту обирається значення початкового положення першого його елемента $k_1(x, y)$, яке відповідає розташуванню першого пікселя монохромного зображення, та наступних з урахуванням визначених інтервалів (горизонтального – Δx , вертикального – Δy). У результаті цього формується Ключ Шифрування, розмірність якого повинна бути не менша Довжини Повідомлення:

$$K = \{k_i(x, y)\}; 1 \leq x \leq (w-1), 1 \leq y \leq (h-1),$$

де w – ширина зображення;

h – його висота.

Формування Стегоповідомлення. Пікселі з яскравостями, які відповідають значенням сформованого Шифротексту, розміщуються в позиції (x_i, y_i) , визначеній Ключем $K = \{k_i(x, y)\}$. У такий спосіб здійснюється приховування Шифротексту в графічні дані або деформація растрового зображення RGB-моделі.

Результатом цього етапу є Стегоповідомлення у вигляді $S = \{G, K\}$.

Етап передачі (приймання) Стегоповідомлення. Відправлення Відправником та приймання Адресатом Стегоповідомлення здійснюється з використанням наявних мережевих протоколів передачі даних. На цьому етапі визначається доступність Відправника та Адресата до мережі, формується таблиця маршрутизації, окреслюються маршрути з мінімальною вартістю з'єднання, за якими здійснюється безпосередня передача Стегоповідомлення.

Етап розшифрування Стегоповідомлення. За отриманим Стегоповідомленням $S = \{G, K\}$ Адресат із використанням відомого Ключа $K = \{k_i(x, y)\}$, переданого окремо альтернативними каналами зв'язку, визначає позиції пікселів (x_i, y_i) , оцінює значення їх яскравостей, формує Шифротекст $G = \{(b_m)_i\}$, за заздалегідь відомим Алфавітом шифрування здійснює послідовне його перетворення в Нормативний алфавіт та Повідомлення:

$$M = \{(b_{m_1} \rightarrow m_1), (b_{m_2} \rightarrow m_2), \dots, (b_{m_i} \rightarrow m_i)\}.$$

Суть методу шифрування / розшифрування даних на основі піксельного алфавіту монохромного зображення пояснюється за допомогою ілюстрації (див. рис. 1–4), де показано один із можливих варіантів Шифрування Повідомлення (див. рис. 1, 2) та розшифрування Шифротексту (див. рис. 3, 4).

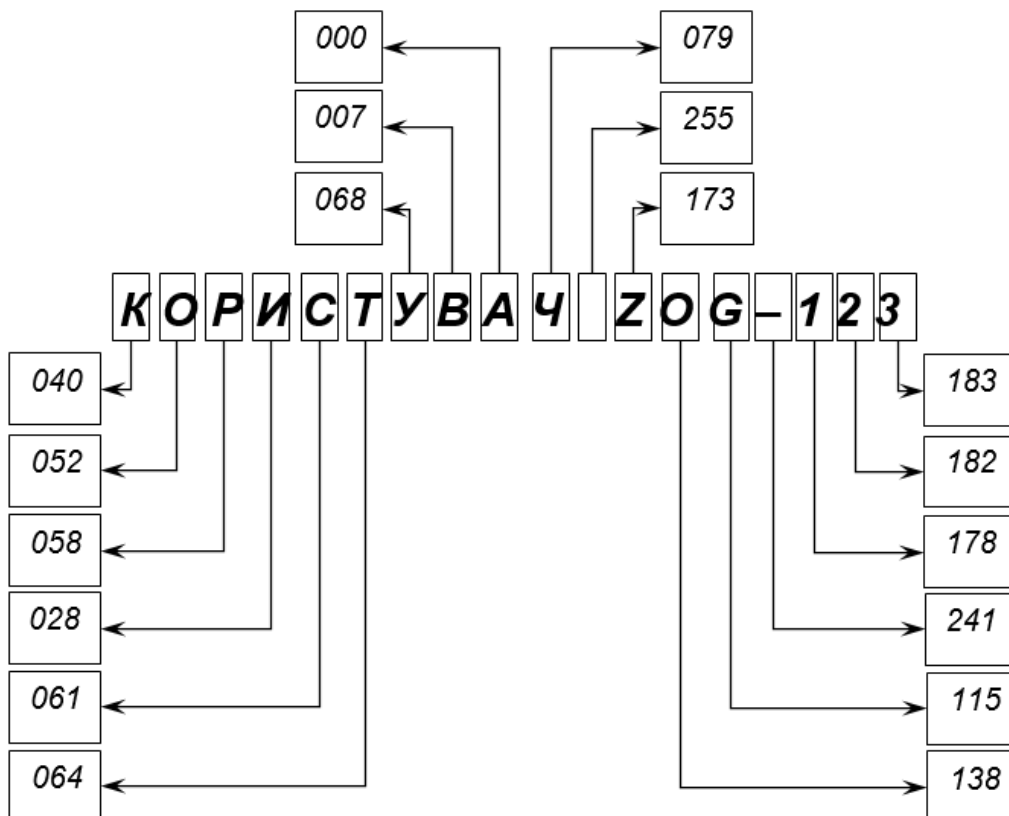


Рис. 1. Перетворення Нормативного алфавіту Повідомлення в Шифротекст

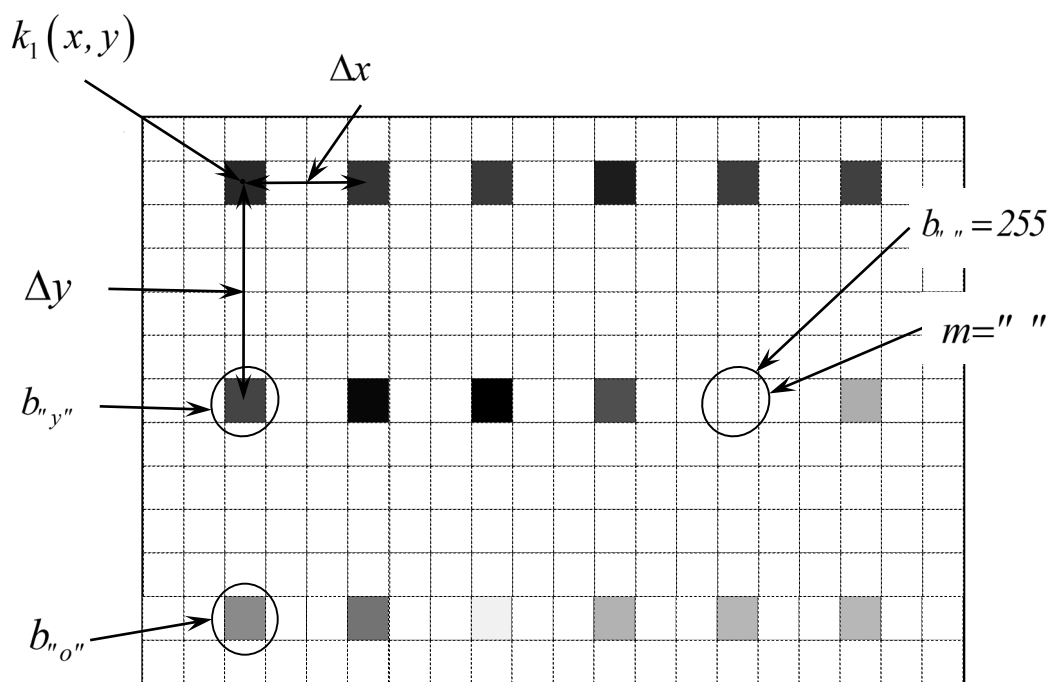


Рис. 2. Формування Ключа та Стегоповідомлення

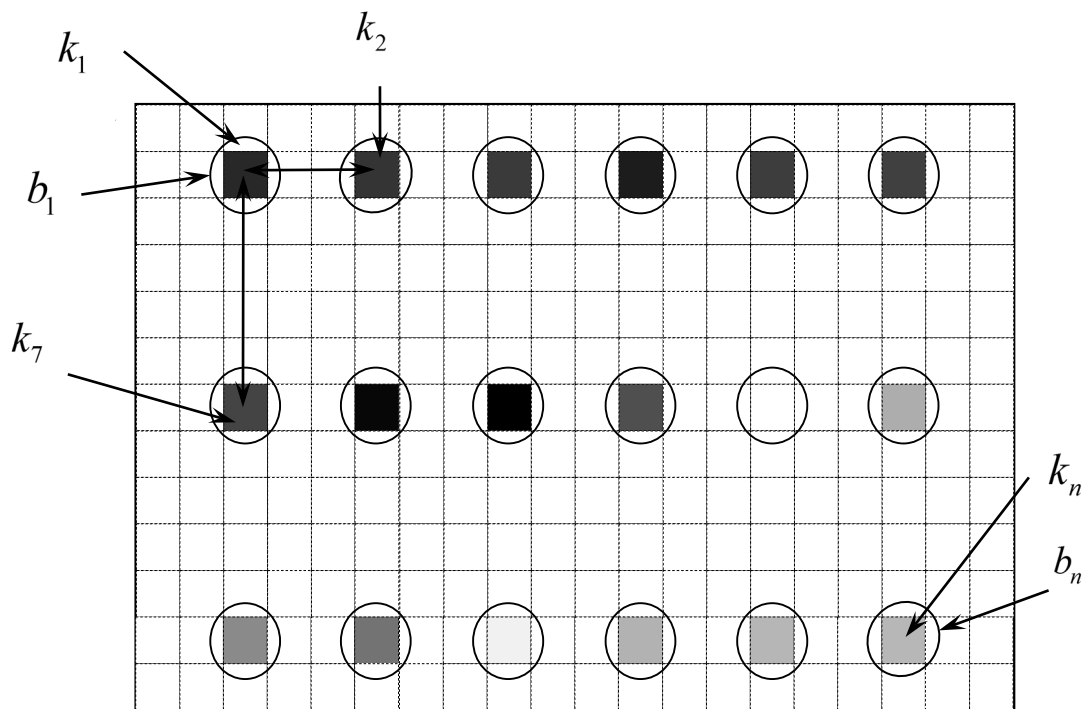


Рис. 3. Розшифрування Стегоповідомлення

Отже, у зазначеному методі здійснюється Шифрування та розшифрування цифрових даних за таким алгоритмом: визначають Ключ; присвоюють кожному елементу Нормативного алфавіту статичний діапазон значень яскравості пікселів монохромного зображення; формують Алфавіт шифрування; шифрують Повідомлення з використанням Алфавіту шифрування; формують Стегоповідомлення шляхом задання значення яскравості пікселів, що відповідають Алфавіту шифрування, на позиціях,

визначених Ключем, приховують Шифротекст у цифрове зображення; здійснюють передачу Адресату та отримання Стегоповідомлення; розшифровують Стегоповідомлення в Повідомлення з використанням Алфавіту шифрування за визначеним Ключем.

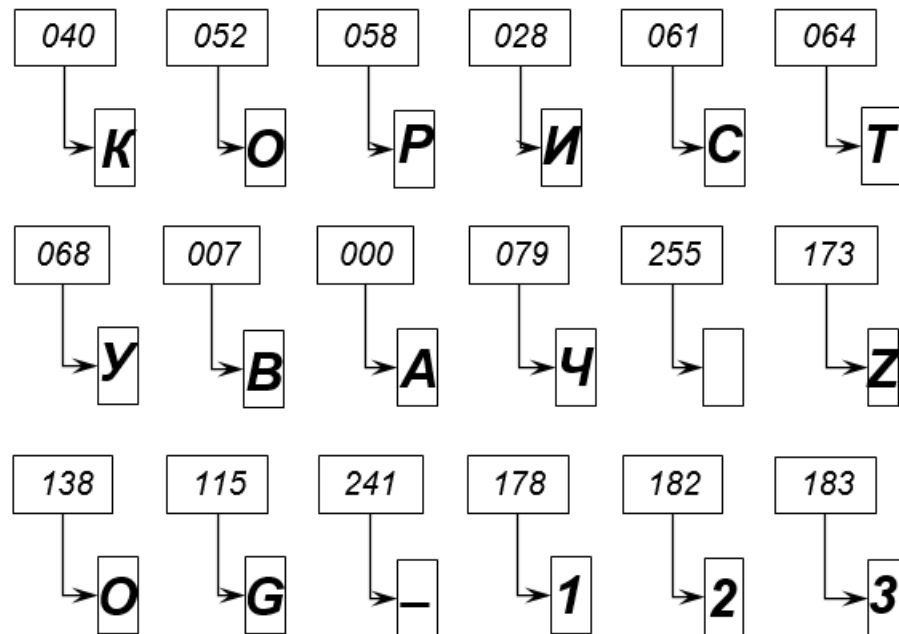


Рис. 4. Перетворення в Нормативний алфавіт та Повідомлення

Для автоматизації шифрування / розшифрування Повідомлення розроблено програму “Програмне забезпечення для шифрування / дешифрування даних на основі піксельного алфавіту зображення” (“PixelEncoder 1.0.0.0”) [5]. Програма дозволяє реалізувати:

- 1) формування Ключа та Алфавіту шифрування;
- 2) введення Повідомлення, визначення його Довжини та формування Шифротексту;
- 3) приховування Шифротексту або деформацію графічних даних значеннями Алфавіту шифрування Шифротексту в позиції, визначеній Ключем;
- 4) розшифрування Шифротексту.

Висновки. Запропонований метод забезпечує: високу стійкість зашифрованої інформації; зменшення рівня загрози несанкціонованого доступу до Повідомлення або атаки на шифр за рахунок Шифрування кожного символу Повідомлення динамічним випадковим числом з діапазону значень яскравості відповідного символу; зниження рівня загрози несанкціонованого доступу до Повідомлення за рахунок приховування Шифротексту в позиції графічних даних із урахуванням Ключа, який відомий лише Відправнику та Адресату.

Розроблений метод шифрування / розшифрування даних на основі піксельного алфавіту монохромного зображення доцільно застосовувати для ефективного функціонування мереж ІТС у ході передачі інформації каналами зв'язку в умовах наявності загрози здійснення несанкціонованого доступу до неї або атаки на шифр в інтересах забезпечення високої стійкості зашифрованої інформації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Method for encrypting and decrypting digital data transmitted or stored using the prioritized pixel transmission method: German patent. de № 10229976a1, МПК H04 L9/14, H04 N7/24, declared 03.07.2002, published 22.01.2004. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/ef/10/4c/c9f4a4c0617dd9/de10229976a1.pdf> (last accessed: 08.09.2019).
2. Криптографія: загальні визначення, класифікація, асиметричні та симетричні криптоалгоритми, їх порівняння. 2014. URL: <https://dehtyarov09.wordpress.com/2014/03/16/криптографія-загальні-визначення-кл-2> (дата звернення: 08.09.2019).
3. Хорошко В. А., Чекатков А. А. Методи й засоби захисту інформації. Київ : Юніор, 2003. 504 с.
4. Захист інформації в телекомунікаційних системах. URL: <http://tks.nau.edu.ua/wp-content/uploads/2016/05/Zahyst-informatsiyi-v-telekomunikatsijnyh-systemah> (дата звернення: 03.10.2019).
5. Програмне забезпечення для шифрування / дешифрування даних на основі піксельного алфавіту зображення. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 101123. Дата реєстрації 09.12.2020.
6. Хорошко В. А., Шелест М. Е. Введение в компьютерную стеганографию. Киев : Нац. авіаційний ун-т, 2002. 152 с.

Подано 30.12.2020

REFERENCES

1. *Method for encrypting and decrypting digital data transmitted or stored using the prioritized pixel transmission method*: German patent. de № 10229976a1, МПК H04 L9/14, H04 N7/24, declared 03.07.2002, published 22.01.2004. Retrieved from <https://patentimages.storage.googleapis.com/ef/10/4c/c9f4a4c0617dd9/de10229976a1.pdf>.
2. *Kryptohrafiia: zahalni vyznachennia, klasyfikatsiia, asymetrychni ta symetrychni kryptoalhorytmy, yikh porivniannia [Cryptography: general definitions, classification, asymmetric and symmetric cryptoalgorithms, their comparison]*. (2014). Retrieved from <https://dehtyarov09.wordpress.com/2014/03/16/kryptohrafiia-zahalni-vyznachennia-kl-2> [in Ukrainian].
3. Khoroshko, V. A., & Chekatkov, A. A. (2003). *Metody y zasoby zakhystu informatsii [Methods and means of information protection]*. Kyiv [in Ukrainian].
4. *Zakhyst informatsii v telekomunikatsiinykh systemakh [Information protection in telecommunication systems]*. (2019). Retrieved from <http://tks.nau.edu.ua/wp-content/uploads/2016/05/Zahyst-informatsiyi-v-telekomunikatsijnyh-systemah> [in Ukrainian].
5. *Prohramne zabezpechennia dlia shyfruvannia / deshyfruvannia danykh na osnovi pikselnoho alfavitu zobrazhennia. Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir [Software for encrypting / decrypting data based on the pixel alphabet of the image. Certificate of copyright registration for the work]* № 101123. Date of registration 09.12.2020 [in Ukrainian].
6. Khoroshko, V. A., & Shelest, M. E. (2002). *Vvedenie v komp'iuternuiu steganografiu [Introduction to computer steganography]*. Kyiv [in Russian].

O. V Samchyshyn, I. V. Humeniuk, K. V. Smetanin, O. S. Bojchenko

METHOD OF ENCRYPTION/DECRYPTION OF DATA ON THE BASIS OF THE PIXEL ALPHABET OF MONOCHROME IMAGE

Improving the availability of information technology and increasing the volume of digital traffic leads to an important problem of data protection. A particularly pressing issue is the problem of transmitting confidential data through unsecured communication channels, such as the Internet. Recently, there has been a significant increase in the number of cyberattacks, including attempts to intercept and steal confidential information transmitted through global information networks. Information security in computer information and telecommunication systems is a priority. To date, one of the most reliable methods of protecting information is rightly considered to be encryption. Cryptographic data transformations are the most effective way for a system to maintain the confidentiality of information as it is entered, output, transmitted, processed, and stored, and to resist its destruction, theft, or distortion. But the most effective way to ensure the confidentiality of information is the combined use of steganographic and cryptographic means. In order to ensure high stability of encrypted information when transmitting it through the network of information and telecommunications systems and reduce the threat of unauthorized access to it or attack on the cipher, it is proposed to change the approach to solving the problem of data encryption. A method of encrypting / decrypting digital text information based on the pixel alphabet of a monochrome image, which is based on hiding or distorting graphic data, is proposed. This approach allows you to ensure high stability of encrypted information and significantly reduce the risk of unauthorized access to confidential information or attack on the cipher by encrypting each character with a dynamic random number from the range of values of the corresponding character and hiding the encrypted text in the position of graphic data. sender and recipient only.

Keywords: *data encryption / decryption, cryptographic algorithm, digital steganography, information and telecommunication system.*

Бойченко Олег Сергійович – кандидат технічних наук, заступник начальника науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– системи технічного захисту інформації.

Брановицький Віталій Володимирович – старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– розроблення спеціалізованих інформаційних систем.

Бугайов Микола Вікторович – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– математичні методи й алгоритми оброблення сигналів.

Гордієнко Юрій Олексійович – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– обробка геофізичної інформації.

Гуменюк Ігор Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– комп'ютерні мережі та компоненти;
– інформаційна та кібернетична безпека.

Каращук Наталія Миколаївна – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– техніка надвисоких частот;
– методи зменшення втрат потужності сигналу в антенно-фідерних системах.

Лотошко Анастасія Олександрівна – курсовий офіцер навчального курсу факультету Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– обробка спеціальної інформації.

Паплінський Олексій Олександрович – начальник навчального курсу факультету Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– обробка спеціальної інформації.

Савенко Володимир Олександрович – курсант Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– основи електродинаміки та антени.

Савчук Владислава Сергіївна – доктор філософії, науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- інформаційно-психологічні операції;
- інформаційно-аналітична робота.

Самчишин Олексій Володимирович – кандидат технічних наук, професор кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- інформаційна та кібернетична безпека;
- системи захисту інформації;
- криптографічні системи захисту інформації.

Сметанін Кирило Володимирович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- технології програмування;
- інформаційна та кібернетична безпека.

Соболенко Сергій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- інваріантні антенні решітки.

Хоренко Юрій Олександрович – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- комплекси та засоби радіоелектронної розвідки

Цикалов Іван Андрійович – курсант Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- техніка надвисоких частот та антени.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

Стаття подається в одному примірнику друкованого тексту на білому папері формату А4 у редакторі Microsoft Word шрифтом Times New Roman, розмір літер – 12 пт, стиль – normal (звичайний), міжрядковий інтервал – 1.2, абзац з відступом 0,8 см, інтервал перед та після абзацу – 0 пт, параметри сторінки: зліва – 2,25 см, справа – 2,25 см, зверху – 2,12 см, знизу – 1,2 см, від краю до верхнього та нижнього колонтитула – 1,25 см; сторінки без нумерації. Обсяг статті від 5 до 10 сторінок (без анотацій).

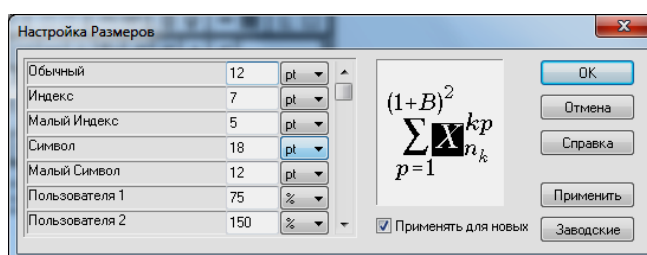
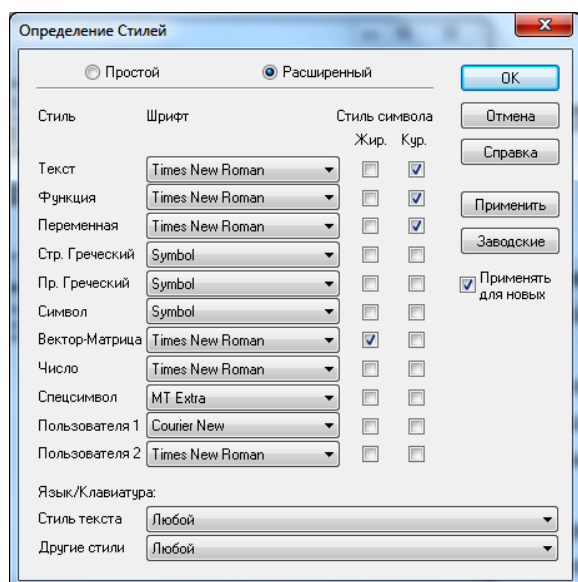
Наукова праця має бути якісно відредагована та **підписана авторами** на звороті останнього аркуша із зазначенням: «У статті інформація з обмеженим доступом відсутня».

До статті додаються: **витяг з протоколу** засідання вченої (наукової, науково-технічної) ради установи (підрозділу) з обґрунтуванням доцільності опублікування роботи; **рецензія** за підписом провідного вченого в даному напрямі наукових досліджень – доктора наук; **дані про авторів** із зазначенням прізвища, імені та по батькові (повністю), наукового ступеня, вченого звання, посади або професії, наукових інтересів (обов'язково), контактного телефону, e-mail.

Разом зі статтею подається її електронний варіант з розширенням doc (e-mail, на CD-R, DVD-R) із файлами, які містять: текст статті українською мовою; прізвища, назву, анотацію (із ключовими словами) українською та англійською мовами, REFERENCES, а також дані про авторів.

ПОРЯДОК ОФОРМЛЕННЯ РУКОПISУ

1. Індекс УДК зазначається в лівому верхньому куті перед відомостями про авторів.
2. Ініціали та прізвища авторів – у правому куті (без наукового ступеня та вченого звання, шрифт напівжирний, без нахилу і підкреслювань).
3. Назва статті друкується великими літерами (шрифт напівжирний, без нахилу і підкреслювань) по центрі аркуша без переносів і відокремлюється від тексту одним вільним рядком зверху та знизу.
4. Анотація українською мовою з ключовими словами друкується курсивом під назвою статті й відокремлюється від заголовка та тексту одним вільним рядком. Її обсяг разом із ключовими словами має становити не менше 1800 друкованих знаків (разом із пробілами).
5. Формули в статтях повинні бути надруковані за допомогою редактора формул *Equation Editor*. Усі параметри мають повністю відповідати наведеним нижче формам.



Усі формули розміщують у таблиці без обрамлення, по центрі, без абзацу. Номер формули зазначається посередині висоти другої колонки з виключкою вправо. Усі буквені позначення у формулах та рисунках, а також у тексті статті повинні бути однаковими за розміром і гарнітурою. Допускаються виділення напівжирним шрифтом, курсивом та підкреслювання за бажанням автора.

6. Рисунки до статті потрібно виконувати в редакторі Microsoft Word за допомогою функції «Створити малюнок». Не допускаються рисунки, оформлені як растрові зображення, або такі, що не піддаються редагуванню. Усі текстові написи на рисунках слід робити тільки в кадрах або текстових рамках. Розміри рисунка не повинні виходити за межі полів.

7. Стандартні таблиці слід виконувати в редакторі Microsoft Word. Вони повинні мати короткий заголовок.

8. Відповідно до постанови президії ВАК України від 15 січня 2003 року № 7-05/1 «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліку ВАК України» наукові статті, що подаються до друку, повинні містити такі необхідні елементи з їх зазначенням: постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано вирішення даної проблеми та на які спирається автор, а також обов'язково виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячена стаття; постановка завдання (формулювання цілей статті); виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших розробок у даному напрямку. Список літератури (не менше 5 джерел) розміщується після статті в порядку згадування або в алфавітному порядку; посилання на літературу в тексті слід давати в квадратних дужках, наприклад, [1]. Бібліографічний опис оформлюється згідно з ДСТУ 8302:2015 «Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання».

9. Після списку літератури наводиться REFERENCES, оформлений у стилі APA.

10. Далі подаються англійською мовою: прізвища авторів, назва статті, анотація та ключові слова (обсягом не менше ніж 1800 знаків разом із пробілами).

Редакція не несе відповідальності за викладену в статті інформацію. Автори відповідають за точність наведених у публікації даних, цитат, статистичних матеріалів тощо. Матеріали, оформлені з відхиленням від зазначених вимог, редколегія не розглядає.

Публікація в збірнику наукових праць безкоштовна та не передбачає отримання автором (авторами) гонорару та авторського примірника. Установа, представником якої є автор (автори) статті, включається до списку організацій, яким розсилається збірник наукових праць.

Статті приймаються за адресою: Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова (науково-організаційне відділення), просп. Миру, 22, м. Житомир, 10004.

Телефон для довідок: (0412) 48-30-19 (дод. 48-632, 46-675).

E-mail: nov.zvir@gmail.com

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ, ВИПРОБУВАННЯ, ЗАСТОСУВАННЯ
ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СКЛАДНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

Збірник наукових праць

Випуск 19

Видавничий оригінал виготовлений
у науково-організаційному відділенні ЖВІ

Редактор: **Л. М. Марищук**
Комп'ютерна верстка та макетування **Л. М. Марищук**

Свідоцтво про реєстрацію № 877 від 21 жовтня 2013 року.
Підписано до друку 15.01.2021. Формат 60 × 84 / 8.
Ум. друк. арк. 7,44. Тираж 100 прим. Зам. 16 офс.

Безкоштовно
Друкарня ЖВІ

10004, м. Житомир, просп. Миру, 22