

УДК 621.396

[https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.4\(32\).47-60](https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.4(32).47-60)

**С. О. Галкин**, кандидат технічних наук, доцент  
<https://orcid.org/0000-0002-0693-1629>  
 (Національний технічний університет  
 "Харківський політехнічний інститут", м. Харків)

**М. М. Калюжний**, кандидат технічних наук,  
 старший науковий співробітник  
<https://orcid.org/0000-0003-0964-6062>

**О. І. Задонський**, кандидат технічних наук,  
 старший науковий співробітник  
<https://orcid.org/0000-0002-9451-4509>

**В. О. Ковшар**, кандидат технічних наук  
<https://orcid.org/0000-0001-7285-5452>  
 (Харківський національний університет  
 радіоелектроніки, м. Харків)

## ІМІТАЦІЙНЕ МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННО- ОБ'ЄКТОВОЇ ОБСТАНОВКИ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ СИСТЕМАМИ МОНІТОРИНГУ

*Розглянуті основні складові частини процесу імітаційного математичного моделювання радіоелектронно-об'єктової обстановки:*

– дані сценарію зміни радіоелектронно-об'єктової обстановки;

– принципи моделювання окремих випромінювань радіоелектронних засобів та функціонування об'єктів, як сукупності радіоелектронних засобів;

– принципи моделювання окремих засобів радіомоніторингу та системи моніторингу, як сукупності засобів радіомоніторингу, що функціонують для досягнення єдиної мети і за єдиним алгоритмом;

– середовище обміну даними між імітаційними математичними моделями зазначених елементів.

Показана можливість застосування розробленого науково-алгоритмічного апарата для оптимізації складу і налагодження алгоритмів роботи системи радіомоніторингу і її окремих складових.

**Ключові слова:** радіоелектронно-об'єктова обстановка, радіоелектронні засоби, системи моніторингу, імітаційне математичне моделювання, алгоритм.

### ВСТУП

Під радіоелектронно-об'єктовою обстановкою (РЕОО) слід розуміти сукупність стаціонарних та рухомих об'єктів і радіоелектронних засобів (РЕЗ) повітряного, наземного і морського базування, що виконують завдання управління силами і засобами шляхом випромінювання і обробки радіосигналів. РЕОО зазвичай розглядають в заданих межах простору, частотного діапазону та часу.

Для добування інформації про місцезнаходження, класи (типи) таких об'єктів, стан їх радіоелектронних засобів в масштабі часу, близькому до реального, створюють системи моніторингу радіоелектронно-об'єктової обстановки (СМ РЕОО).

На СМ РЕОО покладають наступні завдання [1–6]:

– збір і обробка інформації про об'єкти та РЕЗ, що на них розміщені;

– визначення місця розташування об'єктів та РЕЗ, встановлення відповідності між РЕЗ та об'єктами, на яких вони встановлені, та супроводження траєкторій їх руху;

– розпізнавання типів РЕЗ, режимів їх роботи, класів (типів) їх носіїв;

– відображення отриманої інформації про об'єкти і радіовипромінювання від них;

– оцінювання РЕОО, що складається в регіоні.

Оцінювання РЕОО полягає в комплексній обробці різної за структурою, темпами надходження і параметрами точності інформації про координати і параметри руху об'єктів, а також сигнали, які вони випромінюють.

Якість функціонування СМ РЕОО в цілому визначається [1, 4, 5]:

– складом сил, що мають у розпорядженні системи, та тактико-технічними характеристиками засобів, що використовуються для отримання інформації про випромінювання та об'єкти, які є їх джерелами;

– розміщенням сил і засобів моніторингу в просторі;

– алгоритмами комплексної обробки інформації про координати, параметри руху об'єктів та радіосигнали, що ними випромінюються;

– алгоритмом функціонування всієї системи моніторингу.

СМ РЕОО є складними системами. При побудові та вдосконаленні таких систем необхідно:

– оцінювати якість функціонування варіантів побудови за визначеною системою показників та критеріїв та приймати обґрунтоване рішення щодо найкращого з варіантів;

– оцінювати якість та виконувати налаштування алгоритмів збору та обробки інформації як в окремих засобах моніторингу, так і в системі в цілому;

– проводити підготовку операторів засобів моніторингу та оцінювати її якість та ін.

Для вирішення таких задач розроблено систему імітаційного математичного моделювання РЕОО.

Метою статті є:

– викладення основних результатів розробки системи імітаційного моделювання, близької до реального часу динамічної РЕОО і систем її моніторингу;

– демонстрація можливостей застосування розробленого науково-методичного апарату та програмно-алго-

ритмічного забезпечення для налагодження процесу роботи системи радіомоніторингу, оптимізації її структури, налагодження алгоритмів функціонування засобів радіомоніторингу, оцінки ефективності вирішення окремих завдань радіомоніторингу і системи в цілому.

### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕОО ТА СИСТЕМИ ЇЇ МОНІТОРИНГУ

Система імітаційного математичного моделювання призначена для підтримки прийняття рішень при побудові СМ РЕОО і відпрацювання практично всіх завдань ведення радіомоніторингу:

- виявлення, вимірювання параметрів сигналів і їх розпізнавання;
- розпізнавання джерел радіовипромінювання і режимів їх роботи;
- розпізнавання об'єктів, що випромінюють радіосигнали та їх станів (задач, які вони вирішують);
- визначення місця розташування нерухомих, відслідковування траєкторій рухомих об'єктів та ін.

Система імітаційного моделювання РЕОО забезпечує:

- імітаційне математичне моделювання радіосигналів, які випромінюють РЕЗ, що знаходяться на об'єктах;
- імітаційне математичне моделювання функціонування об'єктів з урахуванням особливостей місцевості, де вони розташовані, та їх РЕЗ, що випромінюють радіосигнали;
- математичне моделювання радіодоступності випромінювань об'єктів засобом моніторингу обстановки в заданому регіоні з урахуванням втрат на трасі розповсюдження радіохвиль, рельєфу місцевості та інших факторів;
- імітаційне математичне моделювання роботи засобів моніторингу;
- імітаційне моделювання складу, дислокації, типів засобів моніторингу обстановки в заданому регіоні;
- імітаційне математичне моделювання сценаріїв динамічної зміни РЕОО та функціонування засобів її моніторингу в заданому регіоні;
- моделювання алгоритмів обробки інформації в системі;
- математичне моделювання функціонування системи в цілому.

Систему імітаційного математичного моделювання РЕОО реалізовано у вигляді спеціалізованого програмного комплексу.

У програмному комплексі моделюється робота РЕЗ, що працюють на випромінювання і, таким чином, беруть участь у формуванні РЕОО. Будь-які РЕЗ можуть бути віднесені до однієї з трьох категорій: засоби радіозв'язку, засоби радіолокації, засоби радіонавігації. Методики моделювання функціонування засобів радіолокації та радіонавігації є аналогічними. Тому у подальшому викладенні матеріалу статті, без втрати загальності, розглядається процес моделювання функціонування засобів зв'язку та засобів радіолокації.

На рис. 1 наведена структура програмного комплексу для вирішення задач оцінювання якості функціонування

варіанту побудови СМ РЕОО або алгоритму функціонування СМ РЕОО.

Модель динамічної РЕОО  $M_{РЕОО}$  надається у вигляді множини, яка складається з  $N$  моделей рухомих/нерухомих, наземних/надводних/повітряних об'єктів  $M_{РЕОО} = \{MO_n\}$ ,  $n=1 \dots N$ . Модель кожного з об'єктів  $MO_n$  подається у вигляді сукупності  $MO_n = \langle MR_n, \{MFC_i\}_n, \{MFR_j\}_n \rangle$ ,  $i=1 \dots I_n$ ,  $j=1 \dots J_n$ ;  $MR_n$  – моделі руху  $\{MFC_i\}_n$  – множини моделей функціонування РЕЗ радіозв'язку та  $\{MFR_j\}_n$  – множини моделей функціонування РЕЗ радіолокації  $n$ -го об'єкта.

На  $n$ -му об'єкті існують  $I_n$  РЕЗ радіозв'язку та  $J_n$  РЕЗ радіолокації.

Модель руху  $n$ -го об'єкта забезпечує можливість розрахунку місцезнаходження цього об'єкта у будь-який момент часу  $t$  від початку моделювання. Тобто  $MR_n = f_n(t, \{PC_k\}_n)$  є функцією модельного часу  $t$  та маршруту руху об'єкта  $\{PC_k\}_n$ . Вихідними даними моделі руху є вектор географічних координат положення об'єкта –  $\langle x, y, h \rangle^T$  ( $x$  – довгота,  $y$  – широта,  $h$  – висота об'єкта над рівнем моря) для заданого моменту модельного часу  $t$ .

Маршрут руху  $n$ -го об'єкта задається у вигляді множини точок зміни параметрів руху (ТЗПР) об'єкта  $\{PC_k\}_n$ , що є вхідними даними для моделі.

Кожна ТЗПР  $PC_k$  подається у вигляді вектора параметрів руху об'єкта:  $PC_k = \langle \tau, x, y, h, \alpha, hv, vv \rangle^T$ , де  $\tau$  – позначка модельного часу,  $x$  – довгота,  $y$  – широта,  $h$  – висота,  $\alpha$  – курс об'єкта (кут між напрямком на північ та вектором горизонтальної швидкості),  $hv$  – горизонтальна швидкість,  $vv$  – вертикальна швидкість.

Алгоритм  $fn(t, \{PC_k\}_n)$  розрахунку місцезнаходження об'єкта на заданий момент часу  $t$  побудований з наступних міркувань. Вважається, що  $n$ -й об'єкт в ТЗПР  $PC_{n,k}$  із географічними координатами  $x_{n,k}, y_{n,k}$  на висоті польоту  $h_{n,k}$  опиняється у момент часу  $\tau_{n,k}$  який відраховується від моменту початку моделювання. Від поточної ТЗПР  $PC_{n,k}$  до наступної ТЗПР  $PC_{n,k+1}$  об'єкт рухається прямолінійно рівномірно із курсом  $\alpha_{n,k}$  і горизонтальною та вертикальною швидкостями  $hv_{n,k}, vv_{n,k}$  відповідно. Курс, вертикальна і горизонтальна швидкості руху об'єкта змінюються стрибком в ТЗПР, максимально можлива величина стрибка визначається типом об'єкта.

Маршрут руху об'єкта – це сукупність ТЗПР ( $\{PC_k\}_n$ ), яка є складовою частиною сценарію зміни РЕОО та вхідними даними для моделі  $MR_n$ . Програмне забезпечення створення сценарію обмежує користувача при завданні маршруту руху об'єкта і не дозволяє йому допустити такі критичні помилки, як “зіткнення з землею”, “вихід в космос”. Ситуації “зіткнення об'єктів” не моделюються, події пов'язані зі збігом в будь-який момент часу координат повітряних/наземних/надводних об'єктів системою не відслідковуються, об'єкти продовжують рух без змін.

Параметри сукупності ТЗПР  $MR_n = \{PC_k\}_n$ , що визначають маршрут повітряного/наземного об'єкта, є узгодженими між собою. Узгодження параметрів полягає в наступному. Нехай  $PC_{n,k}$  і  $PC_{n,k+1}$ , сусідні ТЗПР із сукупності точок, що задають маршрут  $n$ -го об'єкта. Об'єкт, який в момент часу  $t = \tau_k$  знаходиться в точці з координатами  $(x_k, y_k)$  на висоті  $h_k$  та рухається з горизонтальною і

вертикальною швидкостями  $h_{v_k}$  та  $v_{v_k}$  з курсом  $\alpha_k$ , в момент часу  $t = \tau_{k+1}$ , буде знаходитися в точці з координатами  $(x_{k+1}, y_{k+1})$  на висоті  $h_{k+1}$ . Такий процес формування маршруту дозволяє побудувати у базі даних програмного забезпечення будь-яку траєкторію для будь-якого об'єкта. Розроблені інструменти програмного забезпечення надають описану узгодженість ТЗПР маршруту при створенні користувачами маршрутів об'єктів для моделювання.

Моделі функціонування  $i$ -го засобу радіозв'язку  $MFC_{n,i} = \langle AFC(t, PC_k, ModFC(\vec{\gamma}_{m1})) \rangle$  та / або  $j$ -го засобу радіолокації  $MFR_{n,j} = \langle AFR(t, PC_k, ModFR(\vec{\alpha}_{m2})) \rangle$  на  $n$ -му об'єкті забезпечують можливість визначення наявності/ відсутності випромінювання радіосигналів РЕЗ в будь-який момент модельного часу  $t$ , але, якщо є випромінювання радіосигналів, то визначення вектора його параметрів проводиться відповідно до сценарію.

Вхідними даними для цих моделей є:

- маршрут руху об'єкта як сукупність ТЗПР –  $MR_n = \{PC_k\}_n$ ;
- відомості про включення/виключення/зміну режиму роботи РЕЗ в цих точках відповідно до сценарію зміни РЕО, що моделюється;
- вектори параметрів радіосигналів, що відповідають режимам роботи РЕЗ.

Вихідними даними моделей є:

- якщо РЕЗ, відповідно до сценарію – працює, то вектор параметрів випромінювання обирається відповідний режиму роботи, ( $\vec{\gamma}_{m1}$  – для засобів радіозв'язку,  $\vec{\alpha}_{m2}$  – для засобів радіолокації або радіонавігації);
- якщо РЕЗ не працює – ознака відсутності випромінювання.

При побудові програмного забезпечення вважалося, що засоби зв'язку та радіолокації вмикаються/змінюють режими роботи/вимикаються лише в ТЗПР. Тому ТЗПР можна також називати “точками зміни параметрів руху та режимів роботи радіоелектронних засобів” (ТЗПР та РР РЕЗ).

У програмному забезпеченні склад векторів параметрів радіовипромінювань  $\vec{\alpha}$  та  $\vec{\gamma}$  відповідає [7–9].

Сценарій зміни РЕО (рис. 1) є базою вхідних даних для моделей рухомих/нерухомих, наземних/надводних/повітряних об'єктів.

Процес моделювання РЕО для кожного дискретного моменту модельного часу  $t$  на інтервалі від 0 до  $t_{max}$  із інтервалом дискретизації міститься у розрахунку та розміщені в базі даних протоколу моделювання РЕО відомостей:

- про місцезнаходження кожного з об'єктів, що описаний у сценарії зміни РЕО;
- векторів параметрів радіовипромінювань кожного РЕЗ кожного з об'єктів.

Інтервал дискретизації  $\Delta t$  обирається таким чином, щоб на будь-яке включення РЕЗ, що розміщені на об'єктах, перепало не менш трьох – чотирьох відліків дискретного модельного часу.

База даних протоколу моделювання РЕО є середовищем обміну даними між моделлю РЕО та моделлю СМ РЕО.

Модель СМ РЕО  $M_{CM} = \langle \{MFM_i\}, Aso, Ao \rangle$ ,  $i=1 \dots M$  надана у програмному забезпеченні як сукупність:

- множини моделей засобів радіомоніторингу –  $\{MFM_i\}$ ,  $i=1 \dots M$ ;
- алгоритму сумісної обробки/об'єднання інформації від засобів моніторингу –  $Aso$ ;
- алгоритму оцінки РЕО на підставі інформації, яку видають моделі засобів моніторингу –  $Ao$ .

Вхідними даними для моделі  $i$ -го засобу радіомоніторингу  $MFM_i$  є:

- момент модельного часу  $t$ ;
- координати місць знаходження об'єктів, що моделюються, на момент модельного часу  $t$ ;
- вектори параметрів випромінювань кожного з РЕЗ кожного об'єкта, якщо вони на момент модельного часу випромінюють;
- координати місця розташування засобу моніторингу;
- ТТХ засобу моніторингу.

Імітаційна модель засобу моніторингу  $MFM_m$  для кожного вектора параметрів випромінювання  $\vec{\gamma}$  або  $\vec{\alpha}$ , який відповідає моменту модельного часу  $t$ :

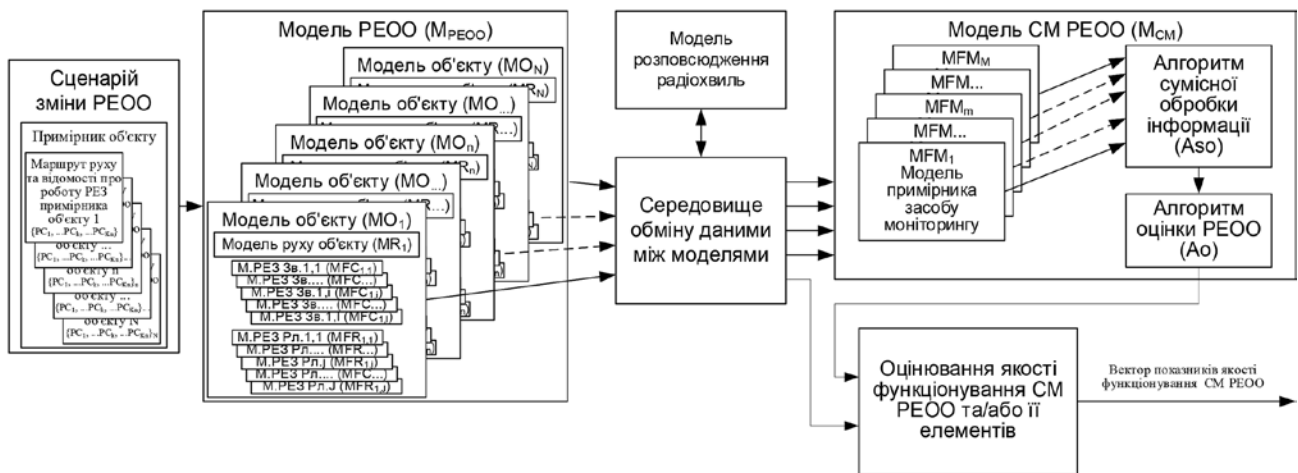


Рис. 1. Структура програмного комплексу для вирішення задач оцінювання якості функціонування варіанту побудови СМ РЕО або алгоритму функціонування СМ РЕО

– перевіряє відповідність умов можливості прийому по частотному діапазону;

– розраховує співвідношення сигнал/шум на вході приймача радіомоніторингу;

– формує вектори вимірних параметрів  $\vec{\gamma}_{вим}$  або  $\vec{\alpha}_{вим}$  шляхом додавання до вектора параметрів випромінювання  $\vec{\gamma}$  або  $\vec{\alpha}$ , який є в протоколі моделювання РЕОО на момент часу  $t$ , випадкових добавок із Гаусівським законом розподілу. Параметри розподілу визначаються на підставі відношення сигнал/шум на вході приймача та ТТХ засобу радіомоніторингу;

– записує вектор вимірних параметрів  $\vec{\gamma}_{вим}$  або  $\vec{\alpha}_{вим}$  в протокол моделювання роботи СМ РЕОО.

Таким чином, вихідними даними моделі засобу радіомоніторингу  $MFМ_m$  на кожний момент модельного часу є вектори вимірних параметрів  $\vec{\gamma}_{вим}$  або  $\vec{\alpha}_{вим}$  кожного з випромінювань РЕЗ, кожного з об'єктів, які є на цей час в протоколі моделювання РЕОО (середовищі обміну даними – (рис. 1).

Вхідними даними для алгоритму сумісної обробки/об'єднання інформації від засобів моніторингу  $Aso$  – (рис. 1) є сукупність векторів, вимірних усіма засобами СМ РЕОО,  $\vec{\gamma}_{вим}$  або  $\vec{\alpha}_{вим}$  усіх випромінювань на момент модельного часу  $t$ .

Алгоритм сумісної обробки/об'єднання інформації від засобів моніторингу –  $Aso$  видає в базу даних протоколу моделювання роботи СМ РЕОО об'єднані дані про вектори  $\vec{\gamma}_{вим}$  або  $\vec{\alpha}_{вим}$  усіх випромінювань на момент модельного часу  $t$ .

Вхідними даними алгоритму оцінки РЕОО, на підставі об'єднаної алгоритмом інформації, є вектори  $\vec{\gamma}_{вим}$  або  $\vec{\alpha}_{вим}$  усіх випромінювань на момент модельного часу  $t$ .

Оцінювання якості функціонування варіанту побудови СМ РЕОО та/або алгоритмів обробки інформації (рис. 1) полягає у обчисленні показників якості функціонування визначеної системи, як підсумку за весь період моделювання від моменту модельного часу  $t=0$  до моменту модельного часу  $t=t_{max}$ .

Вхідними даними для оцінки якості є:

а) відомості з середовища обміну даними (протоколу моделювання РЕОО) для кожного з об'єктів, що моделюються, для кожного дискретного моменту часу:

- місцезнаходження та параметри руху об'єктів,
- режими роботи та вектори параметрів радіосигналів РЕЗ, що розміщені на об'єктах;

б) відомості з протоколу моделювання роботи СМ РЕОО – результати оцінки СМ РЕОО для кожного з об'єктів, що моделюються, для кожного дискретного моменту часу:

- місцезнаходження, параметри руху, траєкторії об'єктів,
- ознаки виявлення/не виявлення випромінювання радіосигналів РЕЗ об'єктів,
- вектори параметрів радіосигналів, які виміряні засобами моніторингу,
- результати визначення відповідності виявлених сигналів РЕЗ об'єктам,
- результати розпізнавання радіосигналів та режимів роботи РЕЗ,

– результати розпізнавання об'єктів,

– результати оцінювання РЕОО системою моніторингу РЕОО, що моделюється.

Вихідними даними оцінки якості є вектор показників якості функціонування СМ РЕОО.

Для забезпечення процесу оцінювання якості функціонування СМ РЕОО та/або алгоритмів її роботи програмне забезпечення імітаційного математичного моделювання РЕОО містить базу даних, що складається з наступних компонентів:

- електронна карта місцевості району моделювання;
  - ТТХ радіоелектронних засобів зв'язку;
  - ТТХ радіоелектронних засобів радіолокації;
  - ТТХ класів/типів повітряних/наземних об'єктів та радіоелектронних засобів зв'язку і радіолокації, що розміщуються на об'єктах;
  - примірники повітряних/наземних об'єктів, що беруть участь у моделюванні сценарію змінення РЕОО;
  - режими роботи бортових радіолокаційних станцій (БРЛС) примірників повітряних/наземних об'єктів;
  - радіоелектронні засоби повітряних/наземних об'єктів, що використовуються у підсистемі зв'язку системи управління цими об'єктами;
  - сценарій змінення об'єктової обстановки;
  - протокол моделювання об'єктової обстановки;
  - протокол моделювання радіоелектронної обстановки в смузі частот засобів зв'язку;
  - протокол моделювання радіоелектронної обстановки у смузі частот засобів радіолокації повітряних/наземних об'єктів;
  - ТТХ засобів радіомоніторингу;
  - примірники засобів моніторингу, що розміщуються на місцевості в районі моделювання;
  - протокол моделювання результатів роботи засобів радіомоніторингу;
  - протокол моделювання результатів роботи алгоритмів обробки інформації в моделі системи радіомоніторингу.
- Алгоритм роботи системи моделювання РЕОО та оцінки якості системи її моніторингу надано на рис. 2. Моделювання складається з наведених нижче етапів.
1. Визначення складу і параметрів радіомереж системи управління об'єктами, що моделюються.
  2. Визначення примірників об'єктів заданих типів, що беруть участь у моделюванні.
  3. Призначення засобів зв'язку у складі кожного з примірників об'єктів для використання у радіомережах.
  4. Визначення параметрів кожного з режимів роботи БРЛС кожного з примірників об'єктів.
  5. Завдання сценарію дій кожного з примірників об'єктів.
  6. Визначення складу СМ РЕОО.
  7. Визначення примірників засобів моніторингу заданих типів, що входять до моделі СМ РЕОО.
  8. Завдання місцеположення та часу роботи кожного з примірників засобів радіомоніторингу.
  9. Моделювання функціонування кожного з примірників об'єктів.
  10. Моделювання функціонування кожного з примірників засобів моніторингу.

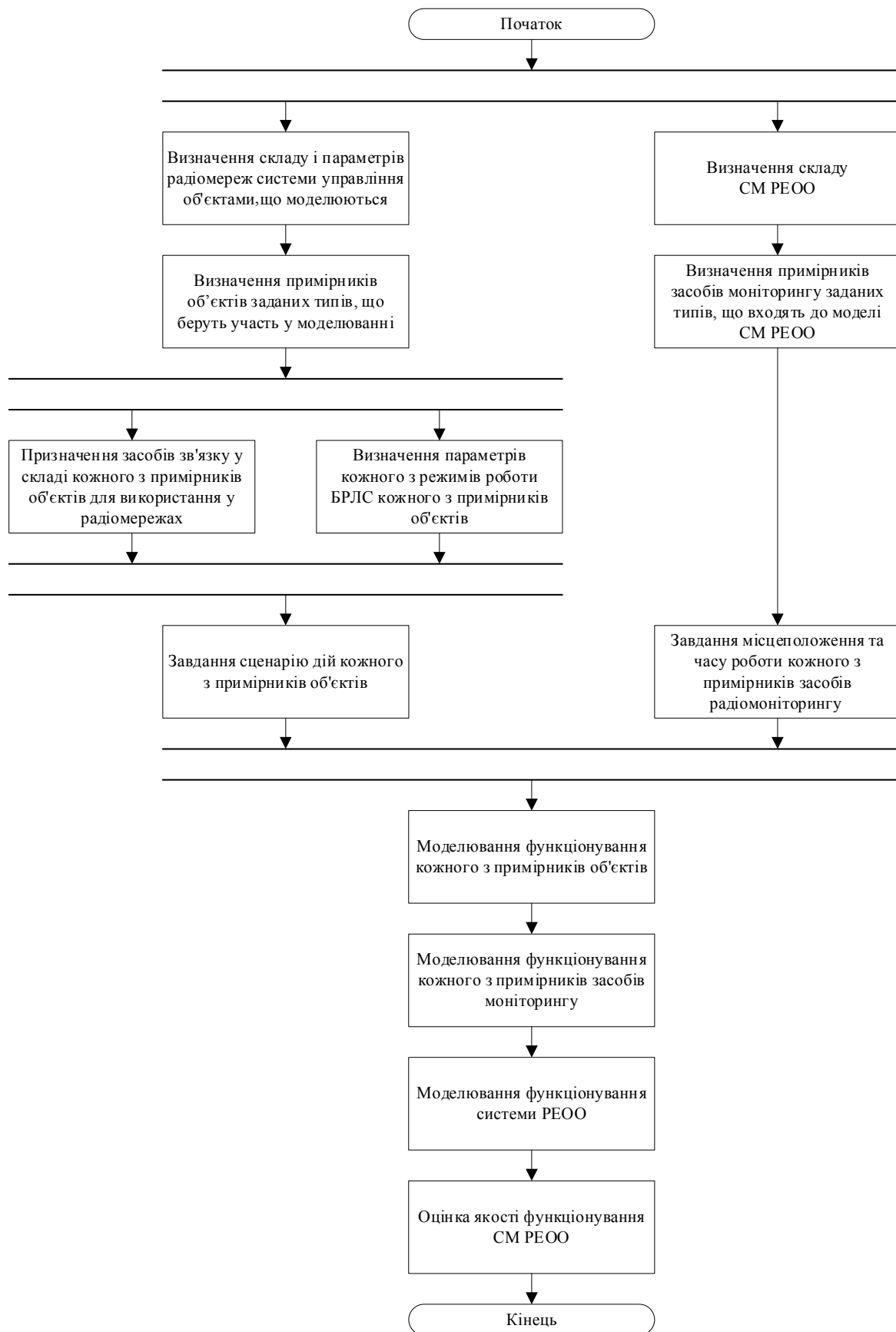


Рис. 2. Блок-схема алгоритму роботи системи моделювання РЕОО та оцінки якості системи її моніторингу

11. Моделювання функціонування системи РЕОО.
12. Оцінка якості функціонування СМ РЕОО.

Для розуміння роботи алгоритму вирішення завдань моделювання РЕОО та оцінки якості системи її моніторингу (блок-схема якого зображена на рис. 2) необхідно ознайомитися із вмістом декількох таблиць бази даних, які містять загальні вхідні дані для вирішення всіх задач моделювання.

Концептуальна схема бази даних “ТТХ типів повітряних/наземних об’єктів та радіоелектронних засобів, примірників об’єктів та сценарію змінення РЕОО” наведена на рис. 3.

Відомості про типи РЕЗ та їх діапазони робочих частот зберігаються в таблиці “Типи РЕЗ” (types\_of\_re\_facilities). Сучасні засоби зв’язку можуть мати декілька режимів роботи. Кожному з режимів роботи відповідає своя категорія сигналу. Категорії сигналів містяться в таблиці “Категорії сигналів ЗЗ (засобів зв’язку)” (cat\_of\_radio\_comm\_signals). Відповідність режиму роботи засобів зв’язку категорії сигналів знаходиться за допомогою таблиці “Режим роботи у засобі зв’язку” (work\_mode\_in\_fc). Діапазони можливих значень параметрів сигналів, що відносяться до кожної з категорій, зберігаються в таблиці “Опис категорій сигналів засобів зв’язку” (descr\_cat\_of\_r\_com\_signals). Перелік параметрів категорій сигналів радіозв’язку наданий в [5, 7, 10].

В таблиці “Типи РЕЗ” (types\_of\_re\_facilities) зберігаються загальні відомості про радіоелектронні засоби як радіозв’язку, так і радіолокації. Відомості, що описують режими роботи засобів радіолокації, зберігаються в таблиці “Опис режиму роботи БРЛС” (d\_m\_airborne\_radar). Склад параметрів, що описують режим роботи засобу радіолокації, наведено в [8, 10].

В таблиці “Тип ЛА” (type\_of\_aircraft) містяться ТТХ типів повітряних/наземних об’єктів. В таблиці “Типи РЕЗ на ЛА” (placing\_f\_t\_aircraft) зберігаються дані про те, які радіоелектронні засоби розміщено на об’єктах, що описані в таблиці “Тип ЛА” (type\_of\_aircraft).

ТТХ радіоелектронних засобів та повітряних/наземних об’єктів є вихідними даними для побудови всієї моделі РЕОО.

Тепер, визначивши вміст таблиць бази даних, що містять загальні вхідні дані для рішення всіх наступних задач, можна розглянути суть кожного з етапів моделювання РЕОО та оцінки якості системи її моніторингу, що зображені на рис. 2.

1. Визначення складу і параметрів радіомереж системи управління об’єктами, що моделюються

Складовою частиною РЕОО, що моделюється, є модель системи управління, яку створюють для управління об’єктами. Складовою частиною системи управління є підсистема радіозв’язку. Підсистема радіозв’язку – це сукупність радіомереж, які використовують повітряні/наземні об’єкти для взаємодії. Під терміном “радіомережа” слід розуміти спосіб організації радіозв’язку, який дозволяє радіостанції старшого начальника здійснювати зв’язок одночасно із групою радіостанцій по заздалегідь встановленим для них загальним радіоданим (циркуляроно) або із кожною по черзі [5].

Склад радіоданих, що визначають радіомережу, надає в роботах [7, 10]. Радіодані радіомереж зберігаються в таблиці “Радіомережі” (radio\_network). Для забезпечення роботи кожної радіомережі може призначатися одна або декілька робочих частот. Робочі частоти радіомереж зберігаються в таблиці “Робочі частоти радіомереж” (operating\_frequencies).

На етапі визначення складу та параметрів радіомереж підсистеми управління повітряними/наземними об’єктами, що беруть участь у формуванні РЕОО, користувач вносить дані в таблиці “Радіомережі” (radio\_network) і “Робочі частоти радіомереж” (operating\_frequencies). Для редагування указаних таблиць у програмному забезпеченні розроблені спеціальні інструменти, інтерфейс яких зрозумілий фахівцям радіомоніторингу та радіозв’язку.

2. Визначення примірників об’єктів заданих типів, що беруть участь у моделюванні.

Відомості про примірники повітряних/наземних об’єктів зберігаються в таблиці “Повітряні/наземні об’єкти” (air\_object) (рис. 3). Кожному об’єкту, наведеному в таблиці, присвоюються унікальне ім’я та номер.

Визначення примірників об’єктів заданих типів, що беруть участь у моделюванні, полягає у додаванні користувачем рядків у таблицю “air\_object”, які відповідають типам повітряних/наземних об’єктів. Користувач програмного забезпечення має змогу це робити за допомогою дружнього та зрозумілого для фахівців з управління повітряним рухом та радіомоніторингу інтерфейсу.

3. Призначення засобів зв’язку у складі кожного з об’єктів для використання у радіомережах

Відомості про типи РЕЗ зберігаються в таблиці “Типи РЕЗ” (types\_of\_re\_facilities). Відомості про типи та кількість РЕЗ, що знаходяться на повітряних/наземних об’єктах різних типів зберігаються в таблиці “Типи РЕЗ на ЛА.” (placing\_f\_t\_aircraft) (рис. 3).

Як в реальному житті, так і в моделі, на кожному з примірників повітряних/наземних об’єктів, відомості про які зберігаються в таблиці “Повітряні/наземні об’єкти” (air\_object), знаходяться радіоелектронні засоби. Відомості про те, які радіоелектронні засоби, у тому числі засоби радіозв’язку, знаходяться на повітряному/наземному об’єкті заданого типу, можуть бути отримані з таблиці “Типи РЕЗ на ЛА.” (placing\_f\_t\_aircraft). Відомості про те, які засоби зв’язку примірників повітряних/наземних об’єктів, які радіомережі можуть використовувати, задаються в таблиці “Використання РМ об’єктами” (use\_networks\_air\_objects). Призначення засобів зв’язку кожного з примірників повітряного/наземного об’єкта для використання в радіомережах здійснюється користувачем програмного забезпечення шляхом редагування даних цієї таблиці. У програмному забезпеченні користувачу для цього надається спеціальна екранна форма, яка зрозуміла для фахівців радіозв’язку та радіомоніторингу.

4. Визначення параметрів кожного з режимів роботи БРЛС кожного з примірників об’єктів

На кожному з примірників повітряних/наземних об’єктів знаходяться засоби радіолокації (БРЛС), БРЛС кожного типу може працювати в декількох режимах. Параметри кожного режиму роботи кожної БРЛС по-

вітряного/наземного об'єкта зберігаються в таблиці “Опис режиму роботи БРЛС” (`m_airborne_radar_in_air_obj`) (рис. 3). Для кожного з режимів роботи кожної РЛС кожного з примірників об'єктів може призначатися одна або декілька робочих частот. Номінали робочих частот зберігаються в таблиці “Робочі частоти БРЛС об'єктів” (`oper_freq_air_objects`).

На етапі визначення параметрів кожного з режимів роботи БРЛС кожного примірника повітряного/наземного об'єкта у таблиці “Опис режиму роботи БРЛС” (`m_airborne_radar_in_air_obj`) та “Робочі частоти БРЛС об'єктів” (`oper_freq_air_objects`) користувач вносить необхідні дані. Редагування указаних таблиць в програмному забезпеченні здійснюється за допомогою дружнього, зрозумілого фахівцю інтерфейсу.

#### 5. Завдання сценарію дій кожного з об'єктів

Сукупність всіх ТЗПР всіх примірників повітряних/наземних об'єктів зберігаються в таблиці “Обстановка” (`situation`) (рис. 3). Дані про включення /виключення/ зміну режиму роботи РЕЗ радіолокації об'єктів в ТЗПР та РР РЕЗ зберігаються в таблиці “Робота БРЛС на О” (`work_radar_on_air_objects`). Відомості про роботу РЕЗ зв'язку на об'єктах у визначених для них радіомережах зберігаються в таблиці “Робота ЗЗ на О” (`work_fc_on_air_object`). Задача опису функціонування примірника повітряного/наземного об'єкта міститься у внесених даних в таблицю “Обстановка” (`situation`), “Робота БРЛС на О” (`work_radar_on_air_objects`), “Робота ЗЗ на О” (`work_fc_on_air_object`). Редагування цих таблиць здійснюється користувачем ПЗ за допомогою зрозумілого фахівцем з радіомоніторингу інтерфейсу “ЕОМ – користувач”. Екранну форму цього інтерфейсу надано на рис. 4.

Концептуальну схему БД, протоколу моделювання роботи СМ РЕОО надано на рис. 5. На рис. 5 назви таблиць, які є загальними для рис. 3 та рис. 5, означені символом «\*», а їх заголовки не зафарбовані сірим тоном.

Відомості про СМ РЕОО в цілому містяться в таблиці “Засоби моніторингу” (`monitoring_station`). На етапах: 6. Визначення складу СМ РЕОО; 7. Визначення примірників засобів моніторингу заданих типів, що входять до моделі СМ РЕОО; 8. Завдання місцеположення та часу роботи кожного з примірників засобів радіомоніторингу користувач вносить відомості до таблиці “Засоби моніторингу” (`monitoring_station`) за допомогою екранної форми, що реалізує дружній до користувача інтерфейс.

9. Моделювання функціонування кожного примірника об'єкта.

Моделювання маршруту руху повітряного/наземного об'єкта і функціонування його РЕЗ міститься в розрахунку для кожного моменту дискретного модельного часу вектора географічних координат положення об'єкта –  $\{x, y, h\}^T$ . Програмне забезпечення виконує цей розрахунок автоматично. Результати розрахунку розміщуються в таблиці “Об'єктова обстановка” (`air_situation`). Дані про функціонування РЕЗ на об'єктах зберігаються в таблицях: “РЕО у смузі частот БРЛС” (`freq_band_air_radars`) – для смуги частот РЕЗ радіолокації та “РЕО в смузі частот Засобів зв'язку” (`freq_band_fas_com`) – в смузі частот засобів зв'язку.

10. Моделювання функціонування кожного примірника засобу моніторингу

Моделювання функціонування засобів моніторингу полягає у автоматичному визначенні векторів вимірних параметрів для кожного засобу радіозв'язку і радіолокації на кожний момент модельного часу кожним з засобів моніторингу та запису векторів вимірних параметрів в таблиці “Вектори параметрів сигналів засобів зв'язку, що виміряні засобом РМ” (`monitoring_station_fas_com`) та “Вектори параметрів сигналів БРЛС, що виміряні засобом РМ” (`monitoring_station_radars`).

11. Моделювання функціонування системи моніторингу РЕОО

Кожен з векторів параметрів, що виміряні засобами моніторингу, і які зберігаються в таблицях “Вектори параметрів сигналів засобів зв'язку, що виміряні засобом РМ” (`monitoring_station_fas_com`) та “Вектори параметрів сигналів БРЛС, що виміряні засобом РМ” (`monitoring_station_radars`), може бути використаний різнорізними алгоритмами розпізнавання радіовипромінювань РЕЗ (їх джерел), повітряних/наземних об'єктів. На даний момент в ПЗ використовуються: алгоритми розпізнавання режимів роботи и типів засобів радіолокації повітряних/наземних об'єктів, алгоритми розпізнавання класів випромінювання засобів зв'язку, алгоритми комплексного розпізнавання типів, класів повітряних/наземних об'єктів по бортовим випромінюванням їх РЕЗ [9]. Розпізнавання виконується автоматично в процесі моделювання. Результати розпізнавання автоматично розміщуються в таблицях: “Результати розпізнавання сигналів засобів зв'язку” (`decision_station_fas_com`); “Результати розпізнавання сигналів БРЛС” (`decision_station_radars`); “Результати комплексного розпізнавання ЛА по випромінюванням їх бортових РЕЗ” (`decision_complex`).

#### 12. Оцінка якості функціонування СМ РЕОО

В результаті вирішення послідовності завдань етапів моделювання 1–11 база даних програмного забезпечення, що розроблено/описується, містить наступні елементи:

- сценарій зміни РЕОО;
- місця розташування (довготу широту, висоту) і параметри руху кожного з примірників повітряних/наземних об'єктів для кожного дискретного моменту модельного часу;
- вектори дійсних значень параметрів випромінювань кожного з РЕЗ кожного повітряного/наземного об'єкта в кожній дискретній точці модельного часу;
- вектори вимірних параметрів випромінювань кожного РЕЗ кожним засобом моніторингу для кожної точки модельного часу;
- результати застосування алгоритмів розпізнавання, що досліджуються, для кожного вектора вимірних параметрів кожного РЕЗ кожним засобом радіомоніторингу;
- результати спільної обробки інформації від засобів радіомоніторингу єдиним алгоритмом.

Таким чином, в базі даних протоколів моделювання РЕОО та роботи СМ РЕОО знаходяться достатні статистичні дані, що дозволяють оцінити якість алгоритмів розпізнавання, якість функціонування кожного із засобів радіомоніторингу окремо, а також оцінити ефективність

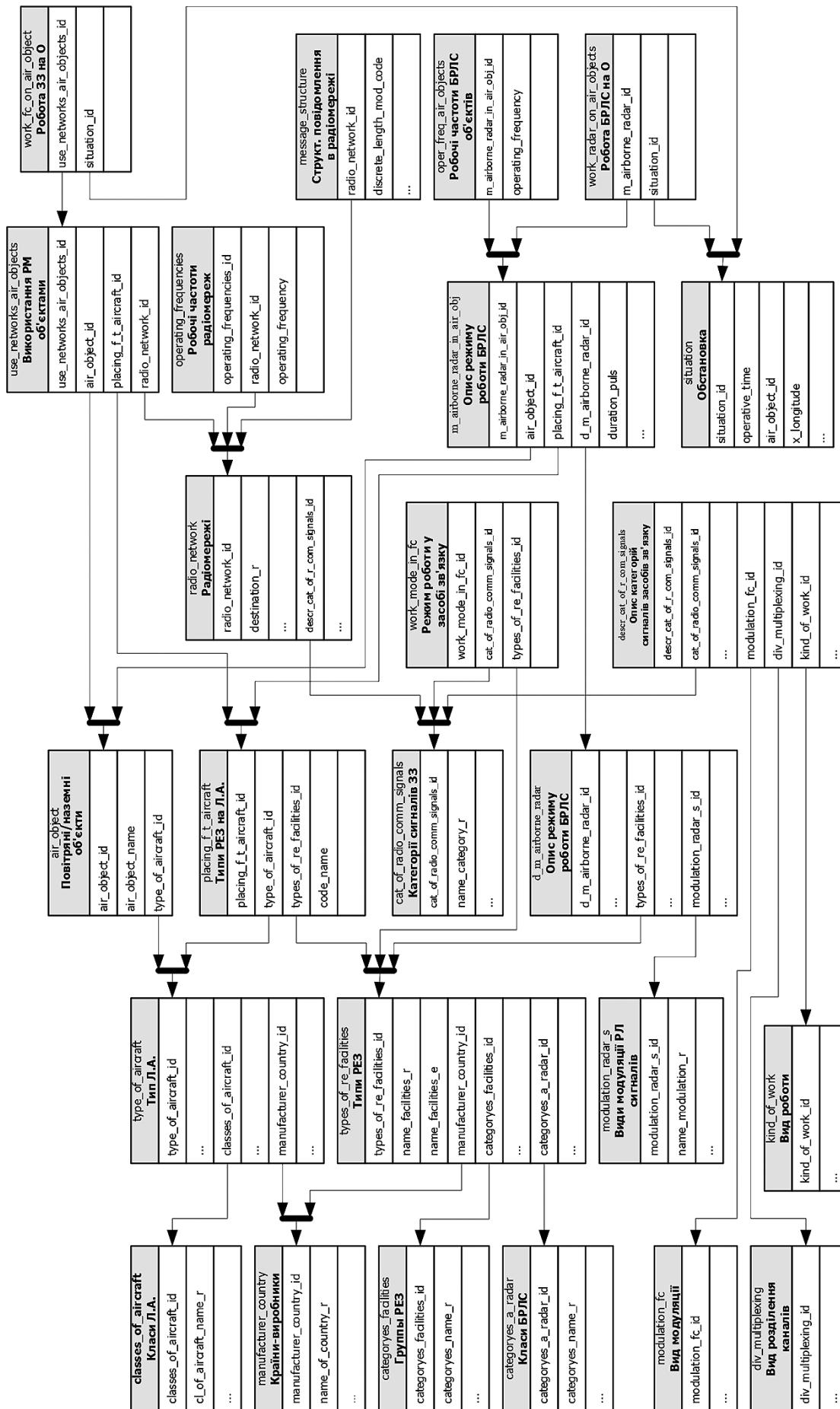


Рис. 3. Концептуальна схема бази даних "ГТХ типів повітряних/наземних об'єктів та радіоелектронних засобів, примірників об'єктів, сценарію зміння РЕО"



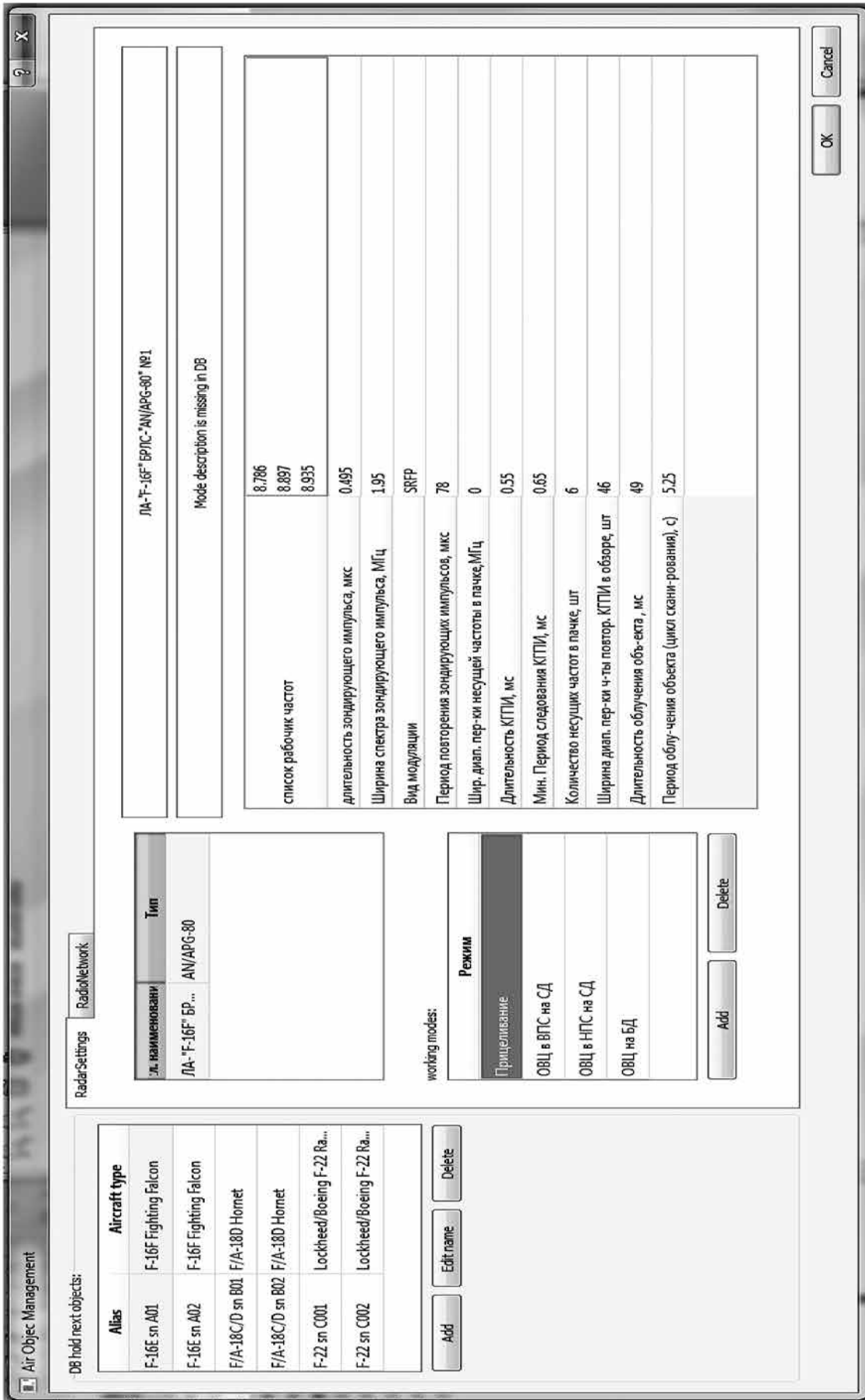


Рис. 4. Екранна форма редактору сценарію об'єктові обстановки

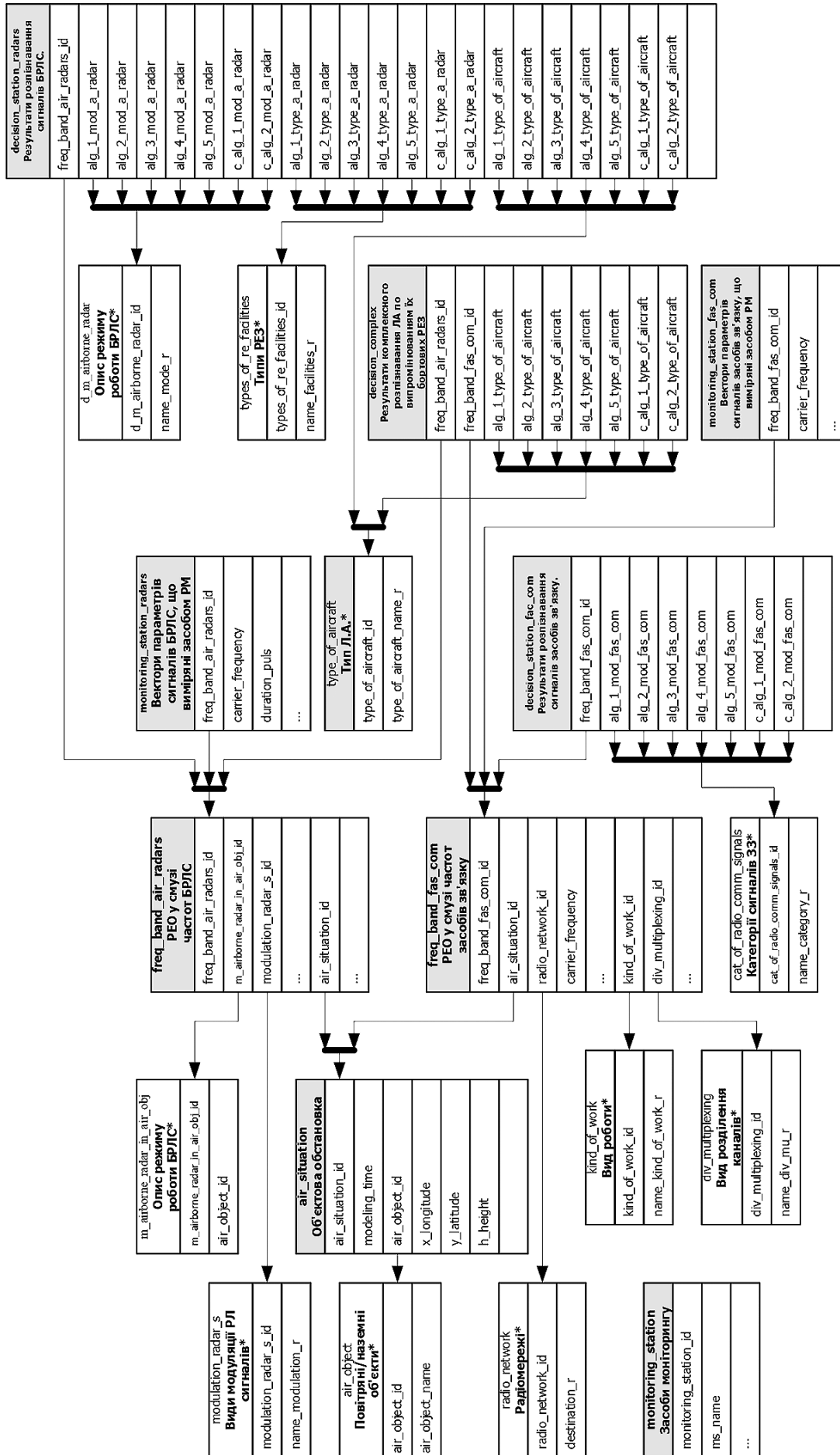


Рис. 5. Концептуальна схема БД, протоколу моделювання роботи CM PEOO

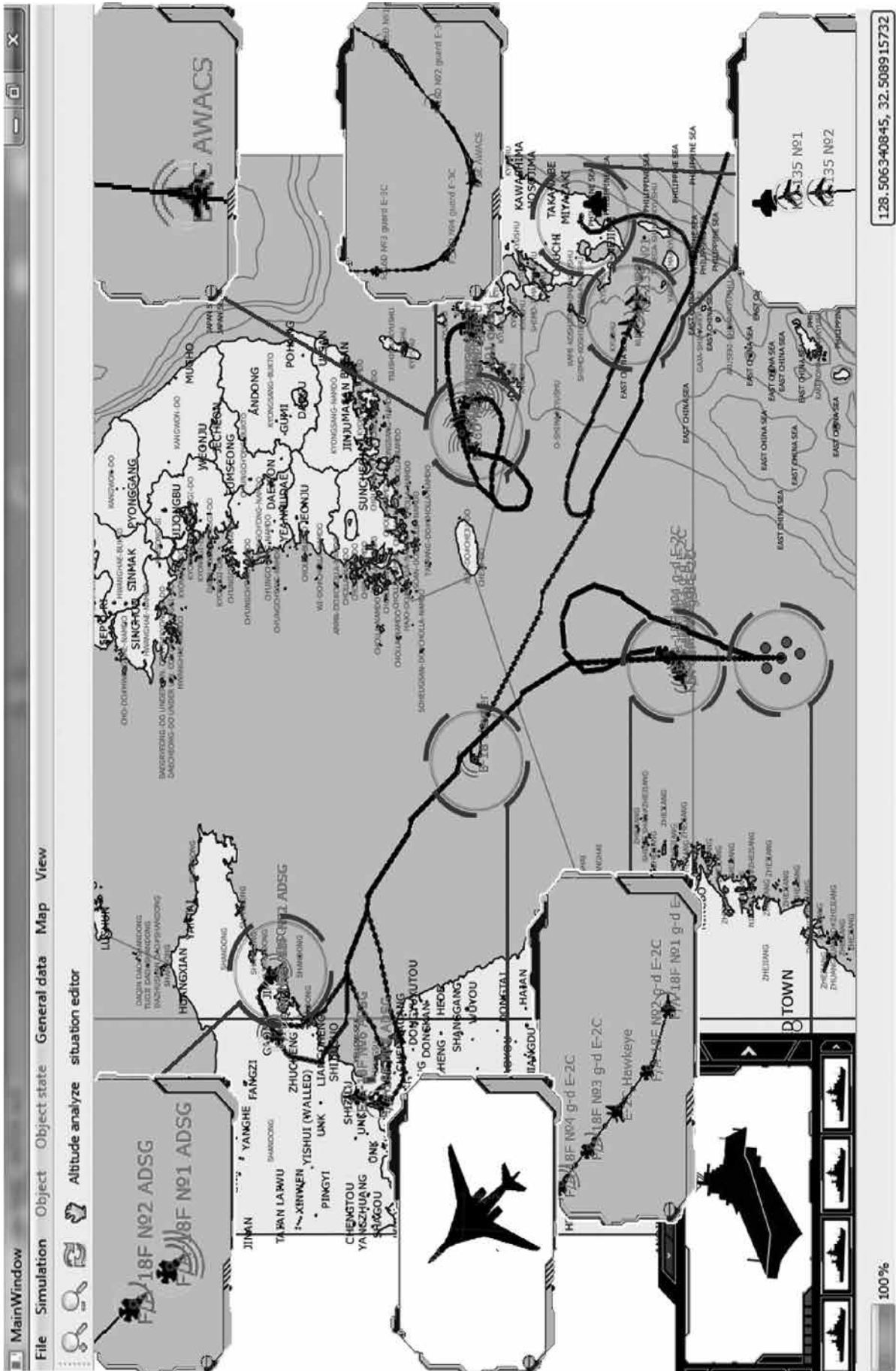


Рис. 6. Екранна форма візуалізації відображення сценарію змінення обстановки

роботи кожного із засобів радіомоніторингу в конкретному місці його розташування в умовах модельованого сценарію зміни РЕОО.

### ДЕМОНСТРАЦІЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО НАУКОВО-МЕТОДИЧНОГО ТА ПРОГРАМНО- АЛГОРИТМІЧНОГО АПАРАТУ

В реальних системах радіомоніторингу, для ефективного розпізнавання рухомих/нерухомих наземних/надводних/повітряних об'єктів, що випромінюють радіосигнали, необхідно мати повну та достовірну інформацію щодо типів, режимів роботи і параметрів сигналів РЕЗ, що на них встановлюються і підлягають радіомоніторингу. Тому інформаційне наповнення бази даних, яку розроблено в процесі досліджень, апріорними актуальними (незастарілими) даними про РЕЗ і об'єкти, що розпізнаються, є однією з найважливіших задач створення системи моніторингу РЕОО та її імітаційної математичної моделі.

Розроблене програмне забезпечення (рис. 1) містить:

– редактор сценаріїв, що дозволяє користувачеві сформувати маршрут руху об'єкта і призначити точки зміни РР РЕЗ (рис. 4);

– формувач протоколу моделювання, який автоматично робить всі необхідні розрахунки при моделюванні і заповнює описані таблиці протоколу моделювання;

– інтерфейс візуалізації сценарію зміни РЕОО на тлі електронної карти місцевості.

Інтерфейс візуалізації сценарію зміни РЕОО на тлі електронної карти місцевості дозволяє відтворювати сценарій зміни об'єктової обстановки як в процесі моделювання, так і за розрахованим протоколом, у масштабах часу від близького до реального, до масштабу часу, який є швидшим за реальний у вісім разів. Під час відпрацювання сценарію динамічної РЕОО в інтерфейсі користувача є можливість отримати повну статичну та динамічну інформацію про кожен з об'єктів, що приймає участь в формуванні загального сценарію.

Приклад роботи інтерфейсу візуалізації сценарію зміни РЕОО на тлі електронної карти місцевості на основі виконання завдання системою моніторингу щодо оцінювання РЕОО, яка створюється угрупованням повітряних об'єктів, надано на рис. 6. За сценарієм, який був створений в базі даних, угруповання виконує свої завдання в регіоні контролю СМ РЕОО, що досліджується. Окремі об'єкти, згідно сценарію, мають свої функції: бомбардувальник, штурмовик, літак ДРЛВ та управління, літак заправник, тощо.

Для кожного з повітряних об'єктів задано маршрут польоту, режими роботи бортових РЕЗ на маршруті і т. ін. Програмне забезпечення дозволяє дослідити варіант побудови СМ РЕОО та, за результатами моделювання сценарію розвитку подій, прийняти рішення щодо ефективності роботи кожного з елементів в системі окремо, та щодо варіанту побудови системи в цілому.

Сукупність результатів оцінювання ефективності СМ РЕОО за результатами моделювання множини сценаріїв розвитку подій дають змогу особам, що приймають рішення, визначити необхідні заходи щодо розгортання/удосконалення СМ РЕОО, яка досліджується.

### ВИСНОВКИ

Система імітаційного математичного моделювання РЕОО надає широкі можливості щодо створення різних (вхідних даних) варіантів РЕОО для підтримки прийняття рішень при плануванні систем моніторингу радіоелектронно-об'єктової обстановки і рішення задач процесу ведення моніторингу цією системою. Дозволяє істотно знизити інтелектуальні, фінансові та часові витрати на створення і оптимізацію таких систем.

Наявність середовища обміну даними, як окремого потоку багатопоточного застосування програмної системи імітаційного математичного моделювання РЕОО, надає можливості реалізовувати і налагоджувати алгоритми обробки інформації в системі та оцінювати ефективність функціонування як системи моніторингу РЕОО в цілому, так і окремих її елементів.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Shirman, Y.D. (2002). Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection and Tracking. Artech House. 307 p.
2. Adamy, D. (2001). EW 101: A First Course in Electronic Warfare. Artech House. 328 p.
3. Adamy, D. (2004). EW 102: A Second Course in Electronic Warfare. Artech House. 274 p.
4. Adamy, D. (2008). EW 103: Tactical Battlefield Communications Electronic Warfare. Artech House. 348 p.
5. Vakin, S.A., Shustov, L.N. & Dunwell, R.H. (2001). Fundamentals of Electronic Warfare. Artech House. 384 p.
6. Morris, G.V. & Harkness, L. (1996). Airborne Pulsed Doppler Radar. Artech House. 510 p.
7. Николаев И.М., Калюжный Н.М., Хряпкин А.В. Методика решения задачи распознавания радиоизлучающих летательных аппаратов на основе алгоритма вычисления оценок подобия. Озброєння та військова техніка. 2020. № 1(25). С. 72—79. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.1\(25\).72-79](https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.1(25).72-79).
8. Nikolayev, I., Kaliuzhnyi, M., Khriapkin, O. & Kolisnyk, V. (2020). The Computer Modeling of Aircraft Recognition by the Onboard Radiation Signal Features Based on the Similarity Indices Calculation Algorithm. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) Kharkiv, Ukraine, September 21 – 25. Vol. 2 on 2020 IEEE 6<sup>th</sup> Intern. Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS). Pp. 449—453.
9. Prokhorov, O.V., Nikolaev, I.M., Prokhorov, V.P. & Shatalov, O.V. (2020). Formal and Logic Models of Knowledge and the Procedure for Logical Inference in the Problems of Recognition of Radio-Emitting Objects and their States. Proc. 15<sup>th</sup> Intern. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020. Pp. 255—258. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235434>.
10. Galkyn, S., Ananiev, V., Zadonskiy, O. & Kovshar, V. (2020). Simulation Mathematical Modeling of the Electronic Environment for Evaluating of Radio Monitoring Systems Effectiveness. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Kharkiv, Ukraine. Pp. 1099—1102. <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252728>.

## REFERENCES

1. Shirman, Y.D. (2002). Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection and Tracking. Artech House. 307 p.
2. Adamy, D. (2001). EW 101: A First Course in Electronic Warfare. Artech House. 328 p.
3. Adamy, D. (2004). EW 102: A Second Course in Electronic Warfare. Artech House. 274 p.
4. Adamy, D. (2008). EW 103: Tactical Battlefield Communications Electronic Warfare. Artech House. 348 p.
5. Vakin, S.A., Shustov, L.N. & Dunwell, R.H. (2001). Fundamentals of Electronic Warfare. Artech House. 384 p.
6. Morris, G.V. & Harkness, L. (1996). Airborne Pulsed Doppler Radar. Artech House. 510 p.
7. Nikolaev, I., Kaliuzhnyi, M. & Khriapkin, O. (2020), "Metodyka resheniia zadachi raspoznavaniia radioizluchaiushchykh letatelnykh apparatov na osnove alhorytma vychysleniia otsenok podobii" [Methods for solving the problem of recognizing radio-emitting aircraft based on the algorithm for calculating similarity estimates], Weapons and Military Equipment. № 1(25). Pp. 72—79. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.1\(25\).72-79](https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.1(25).72-79).
8. Nikolayev, I., Kaliuzhnyi, M., Khriapkin, O. & Kulisnyk, V. (2020). The Computer Modeling of Aircraft Recognition by the Onboard Radiation Signal Features Based on the Similarity Indices Calculation Algorithm. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) Kharkiv, Ukraine, September 21 – 25. Vol. 2 on 2020 IEEE 6<sup>th</sup> Intern. Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS). Pp. 449—453.
9. Prokhorov, O.V., Nikolaev, I.M., Prokhorov, V.P. & Shatalov, O.V. (2020). Formal and Logic Models of Knowledge and the Procedure for Logical Inference in the Problems of Recognition of Radio-Emitting Objects and their States. Proc. 15<sup>th</sup> Intern. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020. Pp. 255—258. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235434>.
10. Galkyn, S., Ananiev, V., Zadonskiy, O. & Kovshar, V. (2020). Simulation Mathematical Modeling of the Electronic Environment for Evaluating of Radio Monitoring Systems Effectiveness. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Kharkiv, Ukraine. Pp. 1099—1102. <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252728>.

**Galkin S., Kaliuzhnyi M., Zadonskiy O., Kovshar V.**

**SIMULATION MATHEMATICAL MODELING OF RADIOELECTRONIC-OBJECT SITUATION FOR EVALUATION OF QUALITY OF SOLVING PROBLEMS BY MONITORING SYSTEMS**

*The article describes the main components of the process of imitational mathematical modeling of the radio-electronic and objects environment:*

- the scenario of changes in the radio-electronic and objects environment;

- principles of modeling of separate radiations of radio-electronic devices and functioning of objects as an aggregate of radio-electronic devices;

- principles of modeling of separate devices of radio monitoring and monitoring system, as a set of devices of radio monitoring, functioning for achievement of the uniform target and on uniform algorithm;

- data exchange environment between simulation mathematical models of these elements.

*Under the radio-electronic and objects environment (REOE) should be understood a set of stationary and mobile objects and radio electronic devices (RED) of air, ground and sea bases, which perform the tasks of controlling forces and means by emitting and processing radio signals. REOE is usually considered within the specified limits of space, frequency range and time.*

*To obtain information about the location, classes (types) of such objects, the state of their electronic devices, in a time scale close to the real one, it is necessary to create systems for monitoring the electronic object environment (SM REOE).*

*The following tasks are assigned to SM REOE [1-6]:*

- collection and processing of information about objects and RED located on them;

- determining the location of objects and RED, establishing correspondence between RED and objects on which they are installed, and maintaining the trajectories of their movement;

- recognition of types of RED, modes of their work, classes (types) of their carriers;

- display of the received information about objects and radio emissions from them;

- assessment of REOE in the region.

*Estimation of REOE consists in complex processing of the information on coordinates and parameters of movement of objects, and also signals which they emit various on structure, rates of receipt and parameters of accuracy.*

*The quality of functioning of CM REOE is generally determined [1, 4, 5]:*

- the composition of the forces at the disposal of the system and the tactical and technical characteristics of the means used to obtain information about the radiation and objects that are their sources;

- placement of forces and means of monitoring in space;

- algorithms for complex processing of information about coordinates, motion parameters of objects and radio signals emitted by them;

- algorithm of functioning of all monitoring system.

CM REOEs are complex systems. When building and improving such systems it is necessary:

- assess the quality of functioning of construction options, according to a certain system of indicators and criteria and make an informed decision on the best of the options;

- evaluate the quality and perform settings of algorithms for collecting and processing information, both in individual monitoring tools and in the system as a whole;

- train operators of monitoring tools and assess its quality, etc.

To solve such problems, a system of simulation mathematical modeling of REOE has been developed.

The purpose of the article is:

- presentation of the main results of the development of a simulation system close to real-time dynamic REOE and its monitoring systems;

- demonstration of possibilities of application of the developed scientific-methodical and program-algorithmic device for adjustment of process of work of system of radio monitoring, optimization of its structure, adjustment of algorithms of functioning of means of radio monitoring, estimation of efficiency of the decision of separate problems of radio monitoring and system as a whole.

The possibility of application of the developed scientific-algorithmic device for optimization of structure and adjustment of algorithms of work of system of radio monitoring and its separate components is shown.

**Keywords:** radio-electronic-object situation, radio-electronic means, monitoring systems, simulation mathematical modeling, algorithm.

#### **Відомості про авторів:**

##### **Галкин Сергій Олександрович**

кандидат технічних наук, доцент  
доцент Національного технічного університету  
“Харківський політехнічний інститут”  
<https://orcid.org/0000-0002-0693-1629>  
e-mail: [galkinserg1969@gmail.com](mailto:galkinserg1969@gmail.com)

##### **Калюжний Микола Михайлович**

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
начальник науково-дослідної лабораторії  
Харківського національного університету  
радіоелектроніки  
<https://orcid.org/0000-0003-0964-6062>  
e-mail: [mykola.kaliuzhnyi@nure.ua](mailto:mykola.kaliuzhnyi@nure.ua)

##### **Задонський Олександр Ілліч**

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
провідний науковий співробітник Харківського  
національного університету радіоелектроніки  
<https://orcid.org/0000-0002-9451-4509>  
e-mail: [alzy1954@gmail.com](mailto:alzy1954@gmail.com)

##### **Ковшар Валентин Олександрович**

кандидат технічних наук  
науковий співробітник Харківського національного  
університету радіоелектроніки  
<https://orcid.org/0000-0001-7285-5452>  
e-mail: [valentin160387160387@gmail.com](mailto:valentin160387160387@gmail.com)

#### **Information about the authors:**

##### **Gulkin Serhii**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Senior Lecturer of National Technical University “Kharkiv  
Polytechnic Institute”  
<https://orcid.org/0000-0002-0693-1629>  
e-mail: [galkinserg1969@gmail.com](mailto:galkinserg1969@gmail.com)

##### **Kaliuzhnyi Mykola**

Doctor of Technical Sciences, Senior Research  
Chief of Research Laboratory of  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
<https://orcid.org/0000-0003-0964-6062>  
e-mail: [mykola.kaliuzhnyi@nure.ua](mailto:mykola.kaliuzhnyi@nure.ua)

##### **Zadonskiy Oleksandr**

Doctor of Technical Sciences, Senior Research  
Lead Researcher of  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
<https://orcid.org/0000-0002-9451-4509>  
e-mail: [alzy1954@gmail.com](mailto:alzy1954@gmail.com)

##### **Kovshar Valentyn**

Candidate of Technical Sciences  
Research Associate of  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
<https://orcid.org/0000-0001-7285-5452>  
e-mail: [valentin160387160387@gmail.com](mailto:valentin160387160387@gmail.com)

Стаття надійшла до редколегії 12.10.2021.