

В. О. Мартовицький, О. А. Янковський, А. А. Коваленко, О. М. Севостьянова

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНО-АПАРATНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ АВТОМАТИЧНОГО РАДІОПЕЛЕНГАТОРА

**Анотація.** Стаття присвячена детальному розгляду архітектури програмно-апаратної моделі системи вимірювання кутів автоматичного радіопеленгатора. В статті розкривається функціональність антен, приймально-передавальних блоків, блоків обробки сигналу та визначення кутів. Особлива увага приділяється взаємодії програмного та апаратного забезпечення для забезпечення оптимальної продуктивності системи. Архітектура програмно-апаратної моделі системи вимірювання кутів автоматичного радіопеленгатора є ключовим аспектом у розробці та ефективному функціонуванні радіотехнічної системи ближньої навігації. Ця модель визначає структуру та взаємодію програмного та апаратного забезпечення, які використовуються для точного вимірювання кутів при отриманні радіопеленгації. В статті представлено реалізацію для моделювання приймача ADF, який є частиною з аналізом з точки зору навчальних цілей. Модель охоплює: функції системи, основні етапи обробки та необхідні контрольні точки. Змодельовані системи поєднуються з персональним комп'ютером для керування різними режимами роботи і виконують необхідні обчислення для процесу навігації. Модель може бути розширена, щоб охопити нові модулі для інших навігаційних систем авіоники.

**Ключові слова:** РСБН, радіопеленгатор, авіоніка, навігація, вимірювання кутів.

### Вступ

Авіація та авіаперевезення відіграють ключову роль у сучасній світовій економіці та соціальній сфері, а саме:

– авіаперевезення забезпечують швидкий та ефективний глобальний зв'язок між країнами та континентами, дають змогу людям переміщуватися на великі відстані за короткий час і забезпечують необхідний зв'язок для бізнесу, туризму та культурного обміну;

– авіація відіграє важливу роль у стимулюванні економічного зростання та підтримує світову торгівлю, забезпечує глобальну логістику і зв'язок між бізнес-партнерами, створює робочі місця і сприяє розвитку інфраструктури;

– авіаперевезення вантажів мають стратегічне значення для світової торгівлі: багато товарів, особливо високотехнологічних і таких, що переживають швидке застарівання, доставляють у різні країни та регіони саме авіацією через її швидкість;

– авіація відіграє ключову роль у розвитку туризму: мільйони людей щороку використовують авіаперевезення для подорожей у різні країни, що сприяє культурному обміну, розвитку місцевої індустрії та зміцненню економічних зв'язків.

Для забезпечення надійного та ефективного використання літаків та послуг авіації взагалі, дедалі більшого значення набуває матеріально-технічне забезпечення [1–3]. Невід'ємним компонентом такого матеріально-технічного забезпечення є радіотехнічні системи ближньої навігації (РСБН).

Так як життєвий цикл наявної наземної та бортової радіонавігаційної апаратури РСБН підходить до кінця і потребує заміни, необхідно закласти фундамент для подальшої інтеграції державної авіації у міжнародне авіаційне співтовариство. Тому **актуальною задачею** є дослідження принципів роботи обладнання РСБН.

Для тестування принципів роботи бортового обладнання РСБН, необхідно імітувати сигнал, що

генерується з наземного маяка, який повинен бути змодельований як стимуляція до бортового радіолокаційного обладнання, що дозволило б виявити і вивчити робочий стан бортового обладнання.

Враховуючи особливості роботи РСБН, генератор сигналів довільної форми не може коректно реалізувати функцію комунікації між бортовим обладнанням та наземною станцією, оскільки потрібен аналізатор сигналів для додаткової демодуляції та декодування. Спеціалізована контрольно-вимірвальна апаратура, у свою чергу, має низку недоліків: унітарна функція, великі габарити, значне енергоспоживання, складність у системній інтеграції та незручність побудови автоматичної тестової системи.

**Метою статті** є розробка архітектури програмно-апаратної моделі системи вимірювання кутів автоматичного радіопеленгатора для розв'язання проблеми ознайомлення з навігаційними засобами в авіації.

### Програмно-апаратна модель наземного обладнання РСБН

Швидкий розвиток сучасної мікроелектроніки дає змогу використовувати мікроконтролери у різних сферах. Серія мікроконтролерів для змішаних сигналів містить на кристалі багатий набір компараторів, операційних підсилювачів, дельта-сигма аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), АЦП послідовного наближення. Крім того, в сучасних конструкціях широко використовуються цифро-аналогові перетворювачі з діапазоном оновлення понад 1 ГГц, що дає змогу налаштувати функцію генерації сигналів. Тому сучасні технології в сфері мікроелектроніки були закладені в основу програмно-апаратної моделі.

Запропонована програмно-апаратна модель наземного обладнання РСБН включає в себе наступні компоненти:

1) персональний комп'ютер, який призначений для початкового налаштування та керування симулятором навігаційних модулів, який реалізова-

но на базі сімейства 32-бітних мікроконтролерів виробництва STMicroelectronics;

2) модуль системи вимірювання кутів автоматичний радіопеленгатор (ADF);

3) модуль синтезатора частоти, що забезпечує необхідні частоти для різних підсистем симуляції та забезпечує повну синхронізацію програмно-апаратної моделі.

При розробці моделі були використані цифрові компоненти мікроелектроніки. Тому при дослідженнях були використані моделі цифрових сигналів. Також аналогові моделі є більш складнішими порівняно з цифровими і вимагають використання спеціальних і дорогих мікросхем, таких як аналогові помножувачі та змішувачі, з великою ретельністю у виборі та реалізації компонентів [4].

Основна ідея цього недорогого та ефективного рішення полягає в застосуванні універсальної генерації функцій з використанням збережених цифрових даних і цифро-аналогового перетворення. Проблема

моделювання процесу амплітудної модуляції (AM) розв'язується за допомогою цифрових мікросхем замість діодних або транзисторних модуляторів.

### Функціональна схема системи ADF програмно-апаратної моделі наземного обладнання РСБН

Принцип вимірювання напрямку за відносним пеленгом на станцію [5] наведено на рис. 1, схему відповідного приймача – на рис. 2.

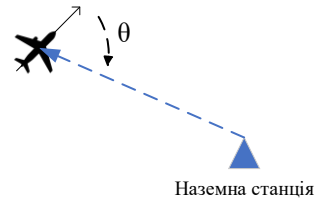


Рис. 1. Схема принципу вимірювання напрямку за відносним пеленгом на станцію

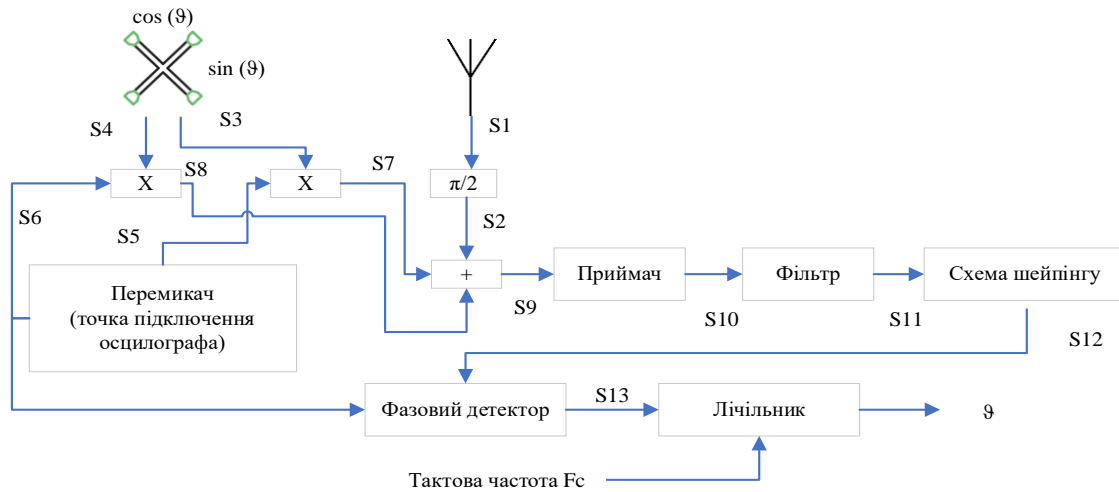


Рис. 2. Функціональна схема приймача ADF

Опис та технічні характеристики програмно-апаратної моделі комплексу є наступними:

– навігаційна система середнього діапазону: (100 - 2000) кГц;

– працює з наземними засобами як радіомаяк самонаведення, а також як передавач радіонавігаційної точки (RNP);

– його бортова частина складається з: петльової антени, діаграми спрямованості якої є або однією вісімкую, або двома перехрещеними петлями та всенаправленої антени;

– приймача, який використовується для підсилення та детектування сигналу від комбінованої антени, а потім для отримання керуючого сигналу для орієнтації петлі-мінімуму на напрямок сигналу в системі рухомого типу або для обробки квадратурних сигналів в системі вказівного типу (2, 3);

– підсистеми відображення.

З функціональної схеми приймача ADF обираємо наступні кроки моделювання сигналів:

**Крок 1.** Обробка сигналу стрижневої антени (зсув фаз  $\pi/2$  використовується для компенсації  $\pi/2$  фази двопетльових антен):

$$S_1(t) = A \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$S_2(t) = A \sin(\omega t) \quad (2)$$

де  $\omega$  – частота середнього діапазону;  $f = 100 - 2000$  кГц.

**Крок 2.** Обробка сигналу рамкової антени:

$$S_3(t) = a A \sin(\omega t) \sin(\theta) \quad (3)$$

$$S_4(t) = a A \sin(\omega t) \cos(\theta) \quad (4)$$

**Крок 3.** Моделювання модулю перемикачання сигналів для внутрішньої модуляції:

$$S_5(t) = P(t) \quad (5)$$

$$S_6(t) = P(t - T/4) \quad (6)$$

де  $P(t)$  – прямокутний сигнал з періодом  $T$ , з низькою частотою  $F$  в діапазоні 30-100 Гц.

**Крок 4.** Моделювання модулю перемикачання сигналів:

$$S_7(t) = S_3(t) \times S_5(t) = a A P(t) \sin(\omega t) \sin(\theta); \quad (7)$$

$$S_8(t) = S_4(t) \times S_6(t) = a A P(t - T/4) \sin(\omega t) \cos(\vartheta). \quad (8)$$

**Крок 5.** Обчислення суми входів приймача:

$$S_9(t) = S_2(t) + S_7(t) + S_6(t) = \sin(\omega t) \times A(1 + P(t) \sin(\vartheta) + P(t - T/4) \cos(\vartheta)). \quad (9)$$

**Крок 6.** Демодуляція вихідного сигналу приймача:

$$S_{10}(t) = A[1 + P(t) \sin(\vartheta) + P(t - T/4) \cos(\vartheta)]. \quad (10)$$

**Крок 7.** Фільтрація виходу у вигляді першої гармонічної складової  $S_{10}(t)$  наступним чином:

$$S_{11}(t) = B \sin(\Omega t - \vartheta). \quad (11)$$

**Крок 8.** Формування вихідного сигналу схеми, який затриманою версією  $P(t)$  із затримкою  $\tau = \vartheta / \Omega$  обраховується наступним виразом:

$$S_{12}(t) = P(t - \tau). \quad (12)$$

**Крок 9.** Вихід фазового детектора - прямокутний імпульс тривалістю  $\tau$  як:

$$S_{13}(t) = Pa(t).$$

Пряме аналогове моделювання вимагає гене-

рації та обробки наступних форм сигналів:

1) несучий сигнал з квадратурними фазами, який імітує фази прийнятих сигналів від всенаправленої та рамкової антен;

2) сигнал  $\vartheta$  з різними вагами у вигляді синуса і косинуса напрямку, що моделює сигнали, які приймаються від петльової антени;

3) комутація двох сигналів від схрещених петлевих антенних з внутрішнім комутованим квадратно-хвильовим сигналом;

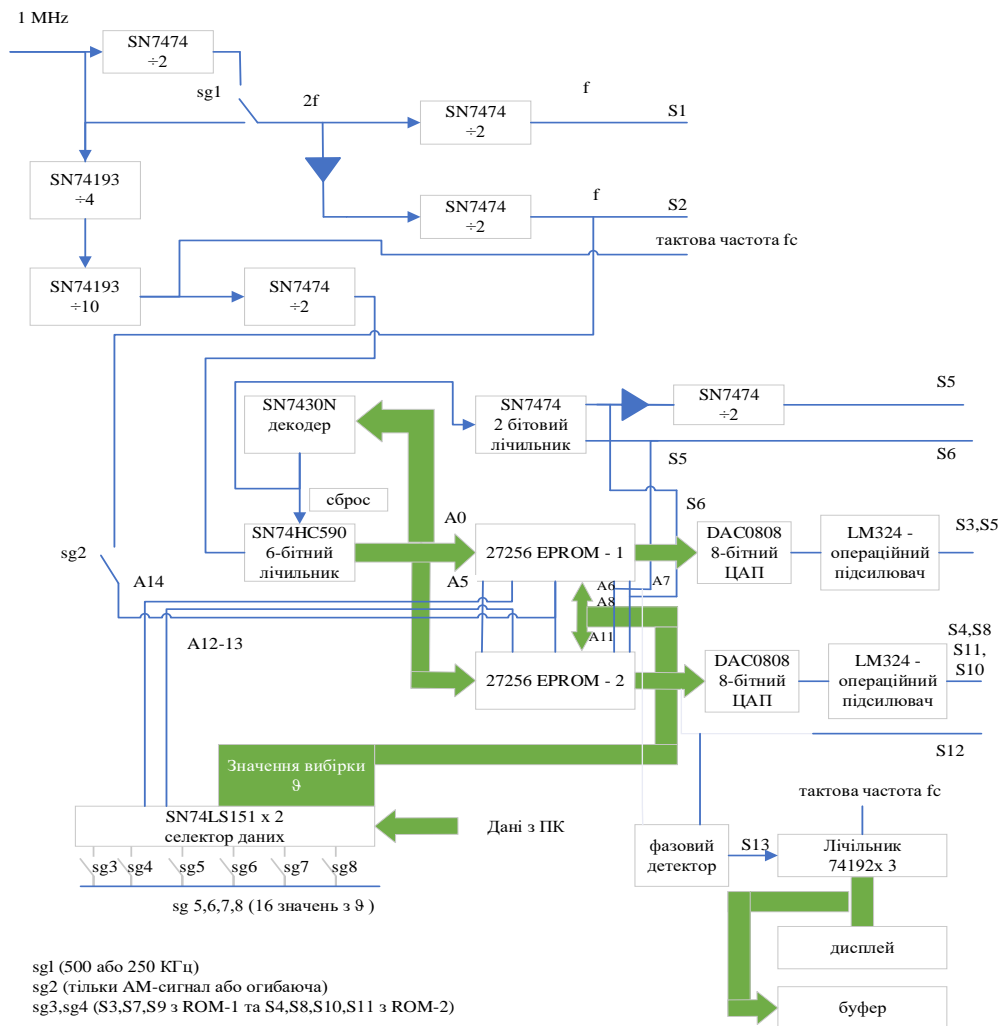
4) складання трьох антенних сигналів для отримання нормального АМ-сигналу;

5) виявлення та фільтрація виходу приймача;

6) цифрове фазове детектування та вимірювання вихідного сигналу приймача;

7) різні зміни напрямку  $\vartheta$  за допомогою комп'ютерного керування.

Аналогове моделювання буде дуже дорогим і вимагатиме складної схеми, тому простіший спосіб реалізації архітектури програмно-апаратної моделі наземного обладнання РСБН – це використання заздалегідь відсканованих сигналів від реального приймача з імітацією сигналу наземної станції, адаптованої до різних напрямів сигналу. Було розроблено архітектуру програмно-апаратної моделі наземного обладнання РСБН, яка представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Архітектура програмно-апаратної моделі наземного обладнання РСБН типу TACAN

Налаштування частоти здійснюється таким чином. Якщо лічильник фази видає 3 цифри для напрямку з кроком 10, йому потрібен тактовий сигнал частоти  $f_c = 360 F$ . Отже, маємо три значення частот:  $F$  перемикання, тактова  $f_c = 360 F$  та несуча  $f \gg F$ . Оскільки несучу частоту  $f$  вибрано як опорну частоту, бо вона є найвищою, інші частоти отримуються відповідним поділом, саму несучу можна вибрати поетапно для покриття діапазону.

Частотний поділ виконується за допомогою модулів частотного синтезатора, три частоти вибираються таким чином: несуча частота  $f$ ; несуча частота в діапазоні 200 – 2000 кГц може бути вибрана з двох значень 500 кГц і 250 кГц шляхом ділення 1 МГц на 2 і 4 відповідно; частота перемикання  $F$ , яку можна отримати, поділивши  $f_c$  на 360 наступним чином:  $10 \times 6 \times 6$ . Двоквадратурні несучі та двоквадратурні сигнали перемикання можуть бути отримані за допомогою двох інвертованих прямокутних сигналів подвоєної необхідної частоти, ділення обох сигналів на два дає два квадратурні сигнали [3]. Сума вхідного сигналу приймача  $S_0(t)$  дає чотири різні сигнали в 4 квадранті періоду перемикання наступним чином:

$$\begin{aligned} &1 + \alpha \sin(\vartheta) + \alpha \cos(\vartheta); \quad 1 + \alpha \sin(\vartheta) - \alpha \cos(\vartheta); \\ &1 - \alpha \sin(\vartheta) - \alpha \cos(\vartheta); \quad 1 - \alpha \sin(\vartheta) + \alpha \cos(\vartheta). \end{aligned}$$

Вибір аналогових сигналів здійснюється наступним чином. Якщо сигнал дискретизується для кутів з кроком  $2^\circ$ , тоді загальна кількість точок вибірки становитиме 180, це ділиться на 4 квадранти, як 45 точок вибірки в кожному квадранті. Для 180 точок вибірки потрібна 8-бітна адреса.

Сорок п'ять точок кожного квадранта вибираються 6-бітним лічильником, дешифруються і передаються далі по схемі. Лічильник адресує адресу першого молодшого біта EPROM (від  $A_0$  до  $A_5$ ). Різні квадранти вибираються двоквадратурними сигналами перемикання як адресні біти  $A_6$  і  $A_7$ . Зміна фазового зсуву  $\vartheta$  вибирається як 16 значень на 4 біта як  $A_8 - A_{11}$ .

Сигнали  $A_{12}$  і  $A_{13}$  вибирають 4 різні режими як:

- (00,01) задає  $\sin(\Omega t - \vartheta)$  з ROM1 та  $\cos(\Omega t - \vartheta)$  з ROM2;
- (10) задає  $\sin(\vartheta)$  з ROM1 і  $\cos(\vartheta)$  з ROM2;
- (11) задає  $\alpha A P(t) \sin(\vartheta)$  з ROM1 і  $\alpha A P(t - T/4) \cos(\vartheta)$  з ROM2.

АМ-модульований сигнал отримується шляхом перемикання позитивної та негативної огибаючої сигналом несучої, це робиться за адресою старшого біта  $A_{14}$ .

### Висновки

В статті представлено реалізацію для моделювання приймача ADF, який є частиною з аналізом з точки зору навчальних цілей. Модель охоплює: функції системи, основні етапи обробки та необхідні контрольні точки. Змодельовані системи поєднуються з ПК для керування різними режимами роботи і виконують необхідні обчислення для процесу навігації. У подальшому модель може бути розширена, щоб охопити нові модулі для інших навігаційних систем авіоніки. Необхідні спрощення та мінімізація системних функцій і контрольних точок зроблено для усунення надмірності у генерації сигналу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Skrypnik, Oleg Nicolaevich, and Oleg Nicolaevich Skrypnik. "Elements of the General Radio Navigation Theory." Radio Navigation Systems for Airports and Airways (2019): 1-52.
2. P. Skryja, P. Barcik, Z. Kolka and O. Wilfert. Autoaligning System for Short-Range Free Space Optics Links, &quot; 2022 32nd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), Kosice, Slovakia, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/RADIOELEKTRONIKA54537.2022.9764918.
3. P. Schoeder, B. Schweizer, A. Grathwohl and C. Waldschmidt, &quot;Multitarget Simulator for Automotive Radar Sensors With Unknown Chirp-Sequence Modulation,&quot; in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 31, no. 9, pp. 1086-1089, Sept. 2021, doi: 10.1109/LMWC.2021.3088882.
4. R. Sabatini et al., "Avionics Systems Panel Research and Innovation Perspectives," in IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 35, no. 12, pp. 58-72, 1 Dec. 2020, doi: 10.1109/MAES.2020.3033475.
5. Wendong, G., Bo, N., Feiyue, M., & Guobin, F. (2021, October). Optimization of Antenna Array for Partial Discharge Positioning in Substation Based on Cramér-Rao Lower Bound. In 2021 10th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE) (pp. 8-11). IEEE.

Received (Надійшла) 21.10.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

### Architecture of the software and hardware model of angle measurement system in the automatic radio direction finder

V. Martovytskyi, O. Yankovskyi, A. Kovalenko, O. Sevostianova

**Abstract.** The article is devoted to a detailed consideration of the architecture of the software and hardware model of angle measurement system in the automatic radio direction finder. The article reveals the functionality of antennas, transceiver units, signal processing units and angle determination. Special attention is paid to the interaction of software and hardware to ensure optimal system performance. The architecture of the software and hardware model of angle measurement system in the automatic radio direction finder is a key aspect in the development and effective functioning of the short-range radio engineering systems. This model defines the structure and interaction of the software and hardware used to accurately measure angles when obtaining radio bearing. The article presents an implementation for modeling the ADF receiver, which is part with analysis from the point of view of educational goals. The model covers: system functions, main processing steps and necessary control points. The simulated systems are combined with a personal computer to control various operating modes and perform the necessary calculations for the navigation process. The model can be extended to include new modules for other avionics navigation systems.

**Keywords:** RSNB, radio direction finder, avionics, navigation, angle measurement.