

В.Р. ЛЮБЧИК, О.К. ЯНОВИЦЬКИЙ, О.С. ЯНОВИЦЬКИЙ
Хмельницький національний університет

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРОВОГО МЕТОДУ ПРИДУШЕННЯ СИГНАЛУ ЗАПИТУ БОКОВИМИ ПЕЛЮСТКАМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ

Розглядається покращення відомого методу придушення сигналу запиту від бічних пелюсток в літакових відповідачах, в якому використовується аналогова схема амплітудного порівняння на транзисторах з ємністю пам'яті в колі емітера, з допомогою чого формується двоступінчатий рівень придушення. Недоліком такого методу є нестабільність рівня порогу придушення сигналу, яка залежить від нестабільності величини ємності пам'яті і зміни опору напівпровідникових ключів при зміні температури зовнішнього середовища від -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$, що призводить до похибок при придушенні сигналу запиту. В статті розглядається цифровий метод придушення запиту боковими пелюстками, розроблена віртуальна модель (в підпрограмі MatLAB – Simulink) функціонування пристрою, за допомогою якої перевірено працездатність цифрової схеми в масштабах реального часу і доведено, що за допомогою цього методу виключається залежність величини порогу придушення від температури, а також це дає змогу збільшити на 20% зону впевненого прийому сигналу запиту літаковим відповідачем.

Ключові слова: триімпульсне придушення, аналого-цифрове перетворення, АЦП, віртуальна модель, Simulink, літаковий відповідач.

V.R. LUBCHIK, A.K. YANOVITSKYI, A.S. YANOVITSKYI
Khmelnitskyi National University

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE DIGITAL METHOD OF SUPPRESSING THE REQUEST SIGNAL BY LATERAL PETALS OF RADAR AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEMS

The improvement of the known method of suppressing the request signal from the side petals in the aircraft responders, which uses an analogue scheme of amplitude comparison on transistors with memory capacity in the circle of the emitter, thereby forming a two-stage suppression level by memorizing the voltage of the input signal on the capacitance and comparing it with voltage signal from all directional antenna. The disadvantage of this method is the instability of the signal threshold threshold, which depends on the instability of the memory capacity when the ambient temperature changes from -60°C to $+60^{\circ}\text{C}$ and the resistance of the semiconductor keys, which leads to errors in suppressing the request signals. The article deals with the digital method of suppressing the request by lateral petals, developed a virtual model (in the MatLAB - Simulink subroutine) the functioning of the device by which the operation of the digital circuit in real-time scales was checked and it was proved that with this method the dependence of the value of the threshold of suppression on temperature is excluded, and it also enables the air traffic control system to increase by 20% the zone of confident reception of the request signal by the aircraft respondent. In addition, the proposed digital method of suppressing query signals by side lobes allows you to create more reliable and easy to design such devices.

Key words: three-pulse suppression, analogue-to-digital conversion, ADC, virtual model, Simulink, aircraft responder.

Вступ. У зв'язку зі зростаючою щільністю руху повітряних суден, а також застосуванням автоматизованих систем керування повітряним рухом (КПР) набуває актуальності питання зниження вірогідності помилкового запиту літакових відповідачів (ЛВ).

В сучасних системах КПР придушення помилкового запиту здійснюється завдяки спільній роботі як наземних, так і бортових систем [1].

Відомо, що діаграма спрямованості антени РЛС в горизонтальній площині має бічні пелюстки [2]. Але не зважаючи на те, що вони мають меншу потужність випромінювання, ЛВ може приймати сигнал і від бічних пелюсток. Як результат – видавати сигнал-відповідь. Така поведінка систем створює складнощі в ідентифікації робочої ситуації на екрані РЛС.

Для придушення запиту від бічних пелюсток використовується відмінність енергетичних рівнів випромінювання головних і бічних пелюсток наземних РЛС.

До двох імпульсів коду запиту P1 і P3 (див. рис. 1) випромінюваних направленою антеною, додається третій імпульс P2 (імпульс придушення), що випромінюється окремою всебічно направленою антеною (антеною придушення). Таким чином, у просторі виникає наступна ситуація. Якщо літальний об'єкт спрямований на головну пелюстку, тоді третій імпульс P2 значно менший, що указує на нормальну умову. При отриманні сигналу від бічної пелюстки, рівні сигналів P1, P3 порівнянні з P2, а отже сигнал є помилковим і підлягає придушенню.

Слід зазначити, що зона дії системи КПР розділена енергетичним рівнем сигналу придушення на



Рис. 1. Принцип передачі триімпульсного сигналу

зону потенційної можливості помилкового запиту, тобто зону в якій можливий помилковий запит, і зону відсутності помилкового запиту – зону упевненого запиту. Оскільки енергетичний рівень сигналу придушення підбирається свідомо вище рівня сигналів випромінюваних бічними пелюстками, важливо здійснити правильний його вибір, що неможливо без аналізу точнісних характеристик пристрою придушення відповідачів.

У пристроях придушення сучасних ЛВ використовується схема двоступінчастого рівня придушення [3].

Імпульс придушення за часом відстає на $2\pm 0,15$ мкс від первинного імпульсу коду запиту. У ЛВ проводиться порівняння амплітуд імпульсів коду P1, P3 і імпульсу придушення P2. Відповідь відбувається тільки тоді, коли рівень P1, P3 більше P2 (рівня придушення).

Відомий метод придушення, який використовує двоступінчастий рівень запиту від бічних пелюсток [4], схема реалізації якого приведена на рис. 2 в якому використовується схема амплітудного порівняння на транзисторах з накопичувальною ємністю пам'яті в колі емітера.

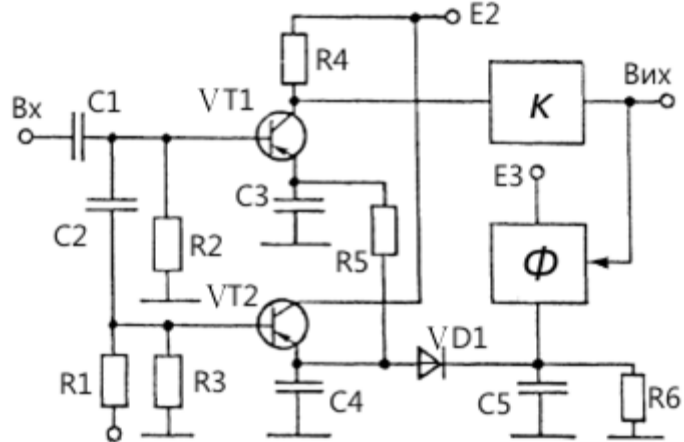


Рис. 2. Схема аналогового двоступінчастого рівня придушення

Електрична схема, що пояснює принцип роботи пристрою триімпульсного придушення, використовуючи двоступінчастий рівень, наведена на рис. 2.

Схема містить вхідне коло з дільником на R1, R3; елемент порівняння на VT1; елемент аналогової пам'яті на VT2, C4; формувач імпульсів Ф; ключ К з накопичувальною ємністю C5 і ланцюг розряду VD1.

Схема працює таким чином. З приходом імпульсу P1 ємність C3 елемента порівняння заряджає до його амплітудного значення, ємність C5 елемента аналогової пам'яті – до рівня придушення. Накопичувальна ємність C5 заряджає до напруги джерела E3 через ключ К, який замкнутий під час дії вихідного імпульсу формувача Ф.

Після проходження імпульсу P1 коду запиту напруга на ємності C3 знижується до рівня придушення на ємності C5 і залишається незмінною до приходу імпульсу придушення P2.

Після амплітудного порівняння імпульсу придушення P2 напруга на накопичувальній ємності C5 знижується до рівня придушення, відкривається діод VD1 і напруга на ємностях C3, C4, C5 знижується по експоненті до нуля.

Недоліком такого пристрою є залежність зміни величин конденсаторів які виконують роль запам'ятовуючих рівнів порогу придушення від зміни температури навколишнього середовища (-60С - +60С), а також зміни опору ключів, які виконані на транзисторах приводить до значної похибки подавлення і погіршення зони упевненого прийому запитів на 20% [4].

Основна частина. В основу поставлена задача покращити точність подавлення запиту боковими пелюстками, зменшити зміни величин рівня порогу придушення від впливу зовнішньої температури, підвищити надійність шляхом заміни аналогового принципу будови пристрою на цифровий [5].

На рис. 3 зображена функціональна схема цифрового пристрою придушення запиту боковими пелюстками антени системи КІР.

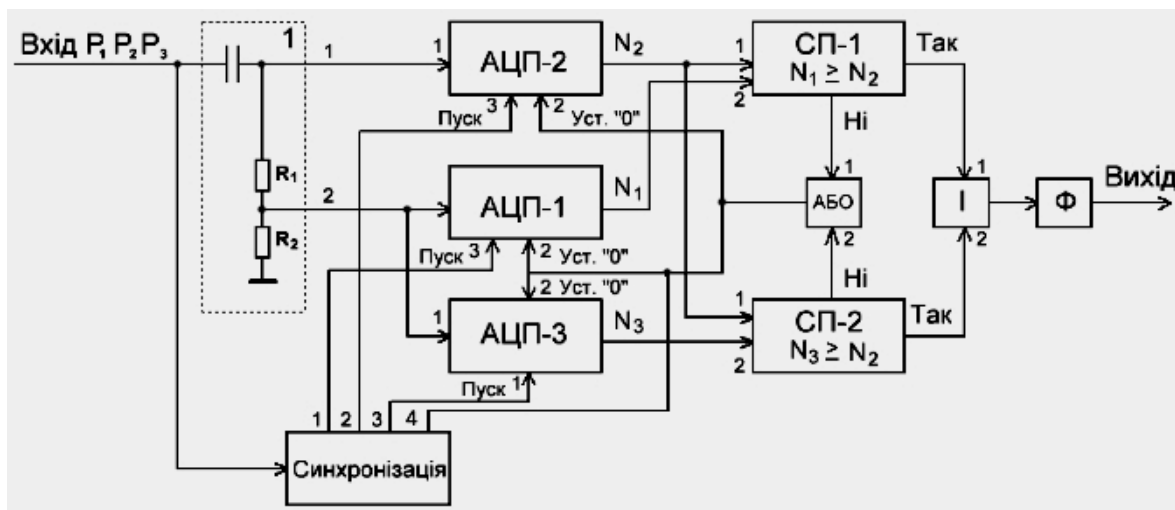


Рис. 3. Функціональна схема цифрового пристрою придушення запиту боковими пелюстками антени системи КІР

Цифровий пристрій придушення запиту боковими пелюстками антени системи КПП містить шину входу – Вхід; резистивний подільник – 1; другий АЦП – АЦП-2; перший АЦП – АЦП-1; третій АЦП – АЦП-3; першу схему порівняння – СП-1; другу схему порівняння – СП-2; схему співпадіння – І; формувач вихідного сигналу – Ф; вихідну шину – Вихід; схему логічного порівняння – АБО; синхронізатор – Синхронізація.

Пристрій працює наступним чином. По шині входу „Вхід” поступають з підсилювача логаритмічною амплітудною характеристикою імпульси P_1, P_2, P_3 , які випромінюються наземною радіолокаційною станцією. До двох імпульсів коду запиту P_1 і P_2 (рис. 3) випромінюваних направленою антеною додається третій імпульс P_3 (імпульс придушення), що випромінюється окремою всенаправленою антеною (антеною придушення).

Якщо повітряне судно спрямовано на головну пелюстку, тоді імпульс P_2 значно менший від P_1 і P_3 на 9 Дб, що указує на нормальну умову.

При отриманні сигналу від бічної пелюстки, рівні сигнали P_1 та P_3 в порівнянні з P_2 , різниця становить менше 9 Дб, ці сигнали є помилковими і придушуються.

При появі на вході резистивного подільника імпульсу P_1 він поступає на вхід синхронізатора „Синхронізація” з виходу 1 з якого подається сигнал «Пуск» на вхід 3 першого АЦП-1, на вхід якого поступає сигнал P_1 , з 2 виходу резистивного подільника 1, при чому амплітуда сигналу P_1 зменшена резистивним подільником на 9 Дб, перший АЦП-1 фіксує цифрове значення амплітуди вхідного сигналу N_1 .

При появі на шині входу „Вхід” імпульс P_2 який поступає через резистивний подільник 1 з виходу 1 на 1 вхід другого АЦП-2, з синхронізатора „Синхронізація” в момент появи на його вході імпульсу P_2 з 2 виходу поступає сигнал «Пуск» на 3 вхід другого АЦП-2, який фіксує цифрове значення амплітуди вхідного сигналу N_2 . При появі на шині входу „Вхід” імпульсу P_3 він поступає на вхід синхронізатора „Синхронізація” з виходу 3 подається сигнал «Пуск» на 3 вхід третього АЦП-3 на вхід якого поступає сигнал P_3 з 2 виходу резистивного подільника 1, амплітуда якого зменшена на 9 Дб, третій АЦП-3 фіксує цифрове значення амплітуди вхідного сигналу N_3 .

З виходу АЦП-2 поступає цифрове значення N_2 на вхід 1 першої і другої схем порівняння СП-1, СП-2. З виходу АЦП-1 поступає цифрове значення N_1 на другий вхід першої схеми порівняння СП-1. В першій схемі порівняння СП-1 фіксується виконання умови $N_1 \geq N_2$, видається сигнал «Так» на 1 вхід схеми співпадіння „І”, це відповідає умові, що амплітуда імпульсу P_1 більша рівня +9 Дб від амплітуди імпульсу подавлення P_2 .

Аналогічно проходить аналіз виконання умови порівняння величини амплітуди сигналу P_2 і сигналу P_3 з допомогою другої схеми порівняння СП-2.

При виконанні умови $N_3 \geq N_2$ з виходу «Так» другої схеми порівняння СП-2 поступає сигнал на 2 вхід схеми співпадіння „І”.

При наявності на 1 і 2 входах схеми співпадіння „І” сигналу «Так», схема співпадіння „І” видає сигнал на формувач „Ф”, який формує вихідний сигнал на шину виходу „Вихід” пристрою для формування відповіді літакового відповідача.

В разі не виконання умови $N_1 \geq N_2$ або $N_3 \geq N_2$ схеми порівняння СП-1 і СП-2 видають сигнал «Ні», який через схему логічного порівняння «АБО» призупиняють роботу АЦП-2, 1, 3 які переходять в «0» стан і вихідний сигнал не подається.

При завершенні циклу виміру з 4 виходу синхронізатора „Синхронізація” подається сигнал «Уст. 0» на вхід 2 АЦП-2, 1, 3, що приводить пристрій в стан готовності до наступного циклу визначення сигналу запиту. Такий чином метод реалізує наступну логічну функцію:

$$\left. \begin{array}{l} N_1 \geq N_2 \longrightarrow X_1 \\ N_2 \leq N_3 \longrightarrow X_2 \end{array} \right\} \Longrightarrow X_1 \geq X_2 \longrightarrow Y \begin{array}{l} 1 - \text{вірно} \\ 0 - \text{не вірно} \end{array}$$

Віртуальна модель. Було створено віртуальну модель пристрою для дослідження точнісних та імовірних характеристик за допомогою підпрограми MatLab – Simulink [6].

На рис. 5 зображено блок схему алгоритму роботи віртуальної моделі пристрою.

На рис. 6 зображено віртуальну модель, а на рис. 7 зображено імпульси на осцилографі Scope.

Створена віртуальна модель працює наступним чином.

Перший, другий і третій імпульси генеруються генераторами імпульсу (Pulse Generator, Pulse Generator1, Pulse Generator2) з довільними параметрами для кожного відповідно (рис. 4 п. 1, рис. 6, 7).

Перший імпульс поступає на вхід синхронізатора (Switch Case), з виходу 1 (Case 1) подається на (Triggered Subsystem) (рис. 4 п. 2, рис. 6, 7).

Другий імпульс поступає на вхід синхронізатора (Switch Case), з виходу 2 (Case 2) подається на вхід другого АЦП (Idealized ADC quantizer1), після чого значення запам'ятовує другий тригерний пристрій (Triggered Subsystem1) (рис. 4 п.3, рис. 6, 7).

Третій імпульс поступає на вхід синхронізатора (Switch Case), з виходу 3 (Case 3) подається на вхід третього АЦП (Idealized ADC quantizer2), після чого значення запам'ятовує третій тригерний пристрій (Triggered Subsystem2) (рис. 4 п. 4, рис. 6, 7).

Цифрове значення першого імпульсу, яке запам'ятав перший тригерний пристрій (Triggered Subsystem) зменшується на 9дб шляхом ділення на константу 2.82 (прораховано у разях) першим

оператором ділення (Divide) і порівнюється шляхом віднімання першим оператором віднімання (Subtract) з цифровим значенням третього імпульсу, яке запам'ятовує третій тригерний пристрій (Triggered Subsystem2) (рис. 4 п. 5, рис. 6, 7).

Цифрове значення третього імпульсу, яке запам'ятовує третій тригерний пристрій (Triggered Subsystem2) зменшується на 9 Дб шляхом ділення на константу 2.82 (прораховано у разях) другим оператором ділення (Divide1) і порівнюється шляхом віднімання другим оператором віднімання (Subtract1) з цифровим значенням другого імпульсу, яке запам'ятовує другий тригерний пристрій (Triggered Subsystem1) (рис. 4 п. 6, рис. 6, 7).

Цифрове значення у результаті порівняння першого і третього імпульсів першим оператором віднімання (Subtract) перевіряється на рівність нулю (≥ 0) першим оператором порівняння з нулем (Compare to Zero), після чого перевірене значення оброблюється першим логічним оператором (XOR Logical Operator), якщо значення більше або рівне нулю, то перший логічний оператор (XOR Logical Operator) пропускає сигнал на вихід, якщо ні — робота схеми блокується (рис. 4 п. 7, рис. 6, 7).

Цифрове значення у результаті порівняння другого і третього імпульсів другим оператором віднімання (Subtract1) перевіряється на рівність нулю (≥ 0) другим оператором порівняння з нулем (Compare to Zero1), після чого перевірене значення оброблюється другим логічним оператором (XOR Logical Operator1), якщо значення більше або рівне нулю, то другий логічний оператор (XOR Logical Operator1) пропускає сигнал на вихід, якщо ні — робота схеми блокується (рис. 4 п. 7, рис. 6, 7).

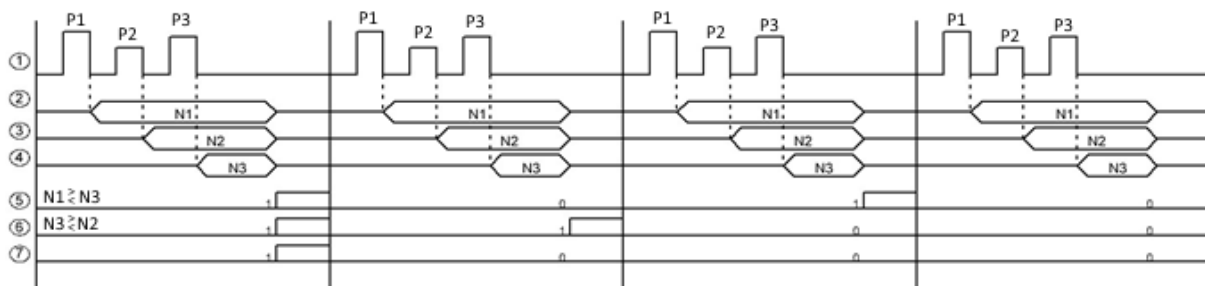


Рис. 4. Синхронізація імпульсів

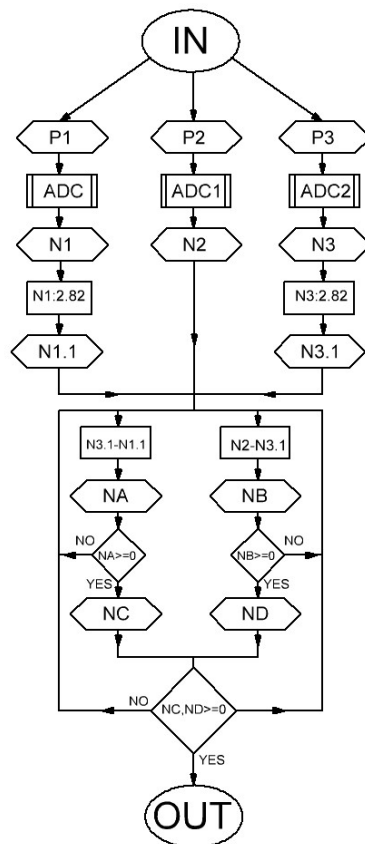


Рис. 5. Блок схема алгоритму роботи віртуальної моделі пристрою

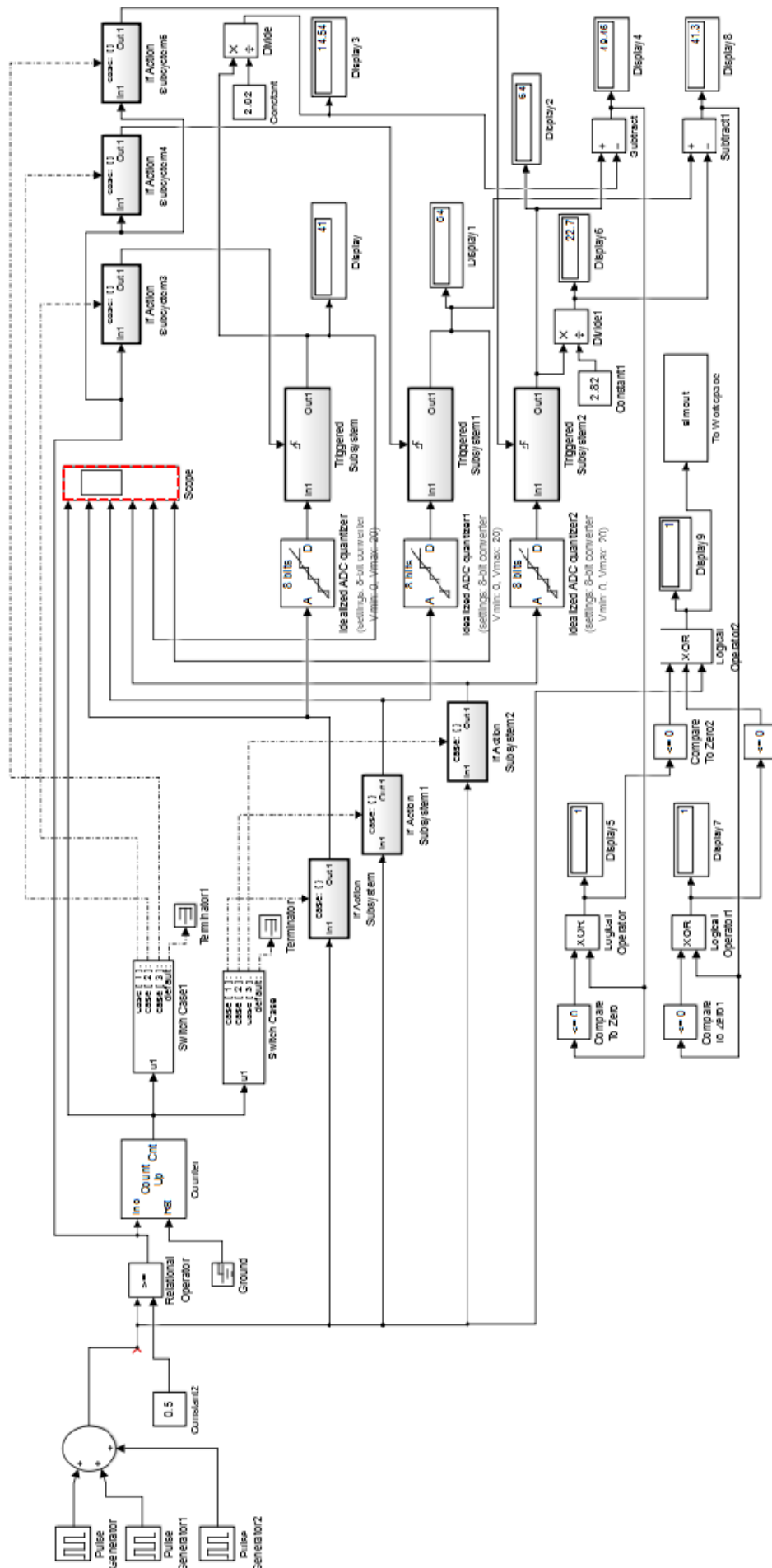


Рис. 6. Віртуальна модель пристрою

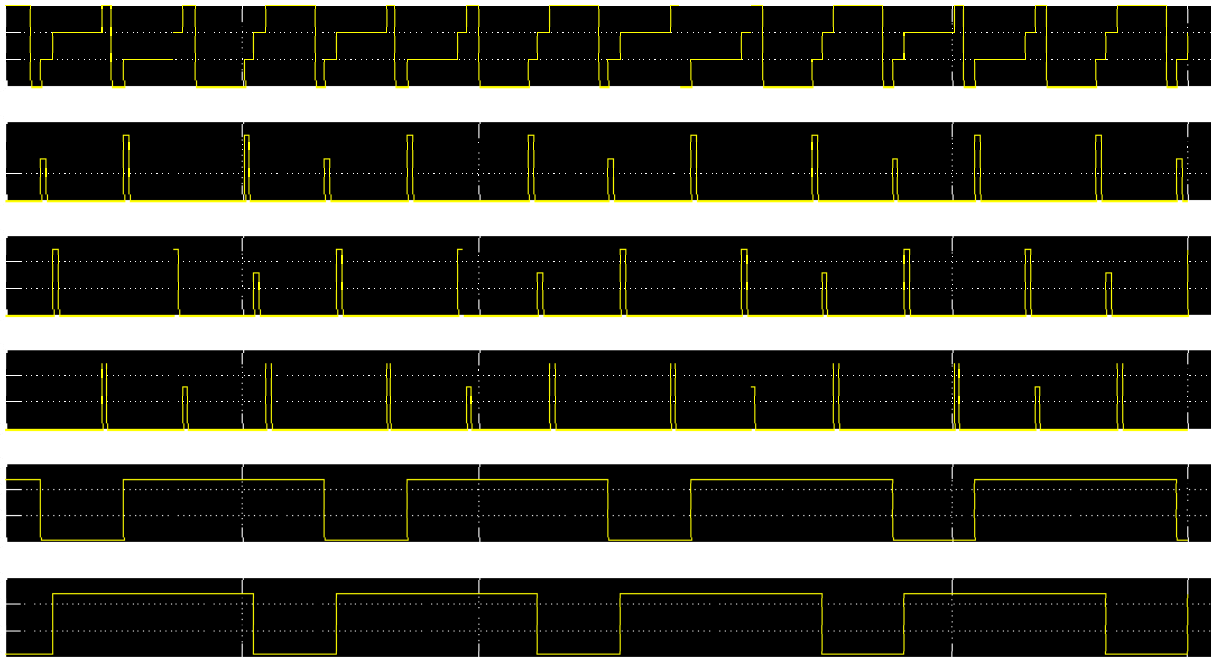


Рис. 7. Зображення імпульсів на осцилографі Scope

Використовуючи основне рівняння активної радіолокації [7], при активній відповіді дальність D до відповідача визначається виразом:

$$D = \sqrt{\frac{P_{\text{вип}} \cdot G_{\text{вип}} \cdot G_{\text{пр}} \cdot \lambda_3^2}{(4\pi)^2 \cdot P_{\text{пр}}}} \quad (1)$$

де $P_{\text{вип}}$ – потужність передавача опитування; $G_{\text{вип}}$, $G_{\text{пр}}$ – коефіцієнти спрямованості антен передавача приймача каналу запиту; чутливості відповідача; λ_3 – довжина хвилі. Тоді відносна зміна зони упевненого запиту рівна:

$$\frac{D_{\text{м}}}{D_{\text{н}}} = \frac{\sqrt{\frac{P_{\text{вип.м}} \cdot G_{\text{вип}} \cdot G_{\text{пр}} \cdot \lambda_3^2}{(4\pi)^2 \cdot P_{\text{пр}}}}}{\sqrt{\frac{P_{\text{вип.н}} \cdot G_{\text{вип}} \cdot G_{\text{пр}} \cdot \lambda_3^2}{(4\pi)^2 \cdot P_{\text{пр}}}}} = \frac{\sqrt{P_{\text{вип.м}}}}{\sqrt{P_{\text{вип.н}}}} \quad (2)$$

де $D_{\text{н}}$, $P_{\text{вип.н}}$ – номінальне значення потужності передавача опитування і дальності прийому сигналу придушення; $D_{\text{м}}$, $P_{\text{вип.м}}$ – максимальне значення потужності передавача опитування і дальності прийому сигналу придушення (з урахуванням збільшення рівня придушення відповідача).

$$10 \lg \frac{P_{\text{вип.м}}}{P_{\text{вип.н}}} = \Delta L = 1,58 \text{ дБ, та } P_{\text{вип.м}} = 1,44 \cdot P_{\text{вип.н}} \quad (3)$$

де ΔL – величина відхилення порогу придушення від впливу зовнішніх факторів, складає 1,58 дБ.

Отже зменшення зони певного запиту згідно з урахуванням виразів (2,3) складає:

$$\Delta D = D_{\text{м}} - D_{\text{н}} = D_{\text{н}} \cdot \frac{\sqrt{P_{\text{вип.м}}} - \sqrt{P_{\text{вип.н}}}}{\sqrt{P_{\text{вип.н}}}} = 0,2 \cdot D_{\text{н}} \quad (4)$$

Так як, враховуючи те, що в цифровому методі відхилення порогового значення придушення буде визначатись величиною молодшого розряду АЦП, що практично буде відповідати значенню на 2 порядки менше ніж в аналогових методах, то збільшення зони впевненого прийому запиту буде максимальним і на 20% збільшиться.

Висновки. В результаті застосування цифрового методу придушення сигналу запиту боковими пелюстками радіолокаційних систем керування повітряним рухом досягнута задача збільшення зони впевненого прийому сигналів запиту на 20% при впливі зміни температури від -60 °C до $+60$ °C, а також досягнуто підвищення надійності і спрощення конструкції.

В подальшому розроблена модель цифрового пристрою дасть змогу досліджувати характеристики ЛВ сумісно з логарифмічним підсилювачем вхідних сигналів, а також досліджувати характеристики цифрового пристрою при зміні вхідних сигналів в залежності від діаграми направленості антени РЛС в реальному масштабі часу.

Література

1. Яновський Ф.Й. Радіолокаційні системи повітряних суден : підруч. / Ф. Й. Яновський. — К. : НАУ, 2012. — 688 с.
2. Лавров А. С. Антенно-фидерные устройства / А. С. Лавров, Г. Б. Резников. — М. : Советское радио, 1974. — 368 с.
3. Авторское свидетельство № 682015. Устройство для подавления запросов боковыми лепестками систем УВД / Жиган Н.И., А.К. Яновичкий, Н.А. Харкевич. — БИ, СССР, 1979.
4. Яновицький С.О. Підвищення ефективності бортової радіолокаційної системи керування повітряним рухом / С.О. Яновицький, В.М. Кичак, К.Л. Горященко // Наукові праці ВНТУ. — 2011. — № 1.
5. Позитивне рішення патента на корисну модель (форма В8 від 06.05.19). Заявка № u 2019 01027 від 31.01.19. Пристрій придушення запиту боковими пелюстками антени системи керування повітряним рухом / Любчик В.Р., Яновицький О.К., Яновицький О.С.
6. Коржик М.В. Моделювання об'єктів та систем керування засобами MatLab : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М. В. Коржик. — Київ : НТУУ "КПІ", 2016. — 174 с. : іл.
7. Коростелев А. А. Теоретические основы радиолокации : учебное пособие для вузов / А.А. Коростелев и др. ; под ред. Дулевича. — М. : Советское радио, 1978. — 608 с.

References

1. Yanovskyi F.I. Radiolokatsiini systemy povitrianykh suden : pidruch. / F. Y. Yanovskyi. — K. : NAU, 2012. — 688 s.
2. Lavrov A. S. Antenna-fidernye ustrojstva / A. S. Lavrov, G. B. Reznikov. — M. : Sovetskoe radio, 1974. — 368 s.
3. Avtorskoe svidetelstvo № 682015. Ustrojstvo dlya podavleniya zaprosov bokovymi lepestkami sistem UVD / Zhigan N.I., A.K. Yanovickij, N.A. Harkevich. — BI, SSSR, 1979.
4. Yanovytskyi S.O. Pidvyshchennia efektyvnosti bortovoi radiolokatsiinoi systemy keruvannia povitrianyim rukhom / S.O. Yanovytskyi, V.M. Kychak, K.L. Horiashchenko // Naukovi pratsi VNTU. — 2011. — № 1.
5. Pozytyvne rishennia patenta na korysnu model (forma V8 vid 06.05.19). Zaiavka № u 2019 01027 vid 31.01.19. Prystrii prydushennia zapytu bokovymy peliustkamy anteny systemy keruvannia povitrianyim rukhom / Liubchyk V.R., Yanovytskyi O.K., Yanovytskyi O.S.
6. Korzhyk M.V. Modeliuvannia ob'ektiv ta system keruvannia zasobamy MatLab : navch. posib. dlia stud. vyshch. navch. zakl. / M. V. Korzhyk. — Kyiv : NTUU "KPI", 2016. — 174 s. : il.
7. Korostelev A. A. Teoreticheskie osnovy radiolokatsii : uchebnoe posobie dlya vuzov / A.A. Korostelev i dr. ; pod red. Dulevicha. — M. : Sovetskoe radio, 1978. — 608 s.

Рецензія/Peer review : 2.6.2019 р. Надрукована/Printed : 18.7.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією