



УДК 621.391:621.372

## CHOICE OF UNIFIED PARAMETERS FOR THE TRAJECTIVE METER OF ARMOR-BREAKING SHELS

### ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРА ПЕТЛІ УНІФІКОВАНОГО ВИМІРЮВАЧА ПАРАМЕТРІВ РУХУ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СНАРЯДІВ

**Bondariev A.P./Бондарєв А.П.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0001 8495-524X

*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Stepana Bandera, 12, 79013**Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Степана Бандери, 12, 79013***Budaretskyi Yu.I./Бударецкий Ю.І.***k.t.s., s.r. / к.т.н., с.н.с.*

ORCID: 000000-0002-8882-0374

*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Stepana Bandera, 12, 79013**Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Степана Бандери, 12, 79013***Dzuba A.O./Дзюба А.О.**

ORSID:0009-0001-1050-2501

*National Academy of Land Forces named after Hetman Petro Sahaidachny,**Heroes of Maidan Street, Lviv, 79026**Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного,**вул. Героїв Майдану, 32, Львів, 79026*

**Анотація.** Стаття присвячена проблемі вимірювання початкової швидкості артилерійського снаряду із використанням радіолокаційного вимірювача параметрів руху. Основна увага приділена забезпеченню працездатності вимірювача із фіксованими параметрами петлевого фільтра для випадку використання із озброєнням різних типів. Проведена параметрична оптимізація показала можливість використання радіолокаційних вимірювачів міліметрового діапазону хвиль для визначення початкових швидкостей снарядів без додаткового налаштування їх установок. Моделювання сеансу вимірювання було здійснено із використанням спеціально розробленої оболонки у об'єктно орієнтованому середовищі. Особливо розглянуто захоплення сигналу після закінчення плазмового сліду та стеження впродовж траєкторії. Предметною областю дослідження є радіолокаційні відгуки від снарядів гаубиць 2С1, 2С3, М777 та гармати 2С5. Калібр вказаних снарядів становить від 122 мм до 155 мм. Шляхом багатоваріантного параметричного синтезу були визначені оптимальні набори параметрів для кожного із типів снарядів. А відтак був вибраний уніфікований набір параметрів. Результати проведеного дослідження показали, що вимірювач із уніфікованими параметрами дає більшу похибку вимірювання, але є абсолютно працездатним. Уніфіковані установки наборів параметрів доцільно розподілити на дві групи – окремо для діапазону 24 ГГц та для діапазону 87 ГГц. Зростання середньо квадратичного відхилення похибки вимірювання в умовах переходу від індивідуально оптимальних значень параметрів до уніфікованих є досить значним – від п'яти до десяти разів. Але ці відхилення є симетричними відносно середнього значення похибки вимірювання і можуть бути усунуті шляхом усереднення під час вторинної обробки відбитого сигналу. Середнє значення похибки є зневажливо малим у продовж усього сеансу стеження. Дослідження показали також неможливість уніфікації параметрів класичного вимірювача у діапазоні 87 ГГц, де треба використовувати тільки модифікований вимірювач.

**Ключові слова:** ФАПЧ, супровід частоти, частотна похибка, уніфіковані параметри.

### Вступ.

Важливим елементом живучості артилерійського підрозділу у сучасному бою є оперативна та якісна підготовка установок для стрільби, швидке відкриття



вогню і зміна вогневої позиції [1, 2]. Найбільш ефективними для рішення цієї задачі є методи ведення вогню без пристрілювання та вимірювання початкової швидкості снаряду із використанням радіолокаційного вимірювача параметрів руху (РВПР) та відповідним розрахунком поправок в приціл на наступний постріл.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

В основу побудови РВПР покладено слідкуючи вимірювачі швидкості снарядів на основі систем фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Особливості побудови систем ФАПЧ широко розглянуті в літературі [3-10].

Одним з ускладнень застосування РВПР є те, що озброєння та вимірювачі швидкості снарядів виготовляють на підприємствах абсолютно різного профіля, що вимагає окремої операції встановлення його на відстані 6 м від гармати по осі її цапф або на стволах гармат [11]. Ці особливості встановлення можуть привести до непрацездатності РВПР під час використання із невідповідним озброєнням. Крім того, необхідність налаштування установок слідкуючого вимірювача (зміни параметрів його фільтру петлі ФАПЧ) під очікувану швидкість вильоту снаряду значно знижує оперативність його застосування.

У цій роботі розглянуті особливості використання РВПР, що працюють у міліметровому діапазоні хвиль, призначених для стеження за початковою швидкістю артилерійських снарядів найбільш типових буксованих та самохідних гаубиць, що стоять на озброєнні артилерійських підрозділів Збройних Сил України.

**Метою цієї роботи** є вибір параметрів радіолокаційного вимірювача початкової швидкості снарядів, що працює у міліметровому діапазоні хвиль на частотах 24 ГГц та 87 ГГц і однаково придатного до використання із самохідними гаубицями 2С1 (калібр 122 мм), 2С3 (калібр 152 мм), буксованою гаубицею М777 (калібр 155 мм) та самохідною гарматою 2С5 (калібр 152 мм) а також перевірка працездатності такого уніфікованого вимірювача шляхом імітаційного моделювання.



## Виклад основного матеріалу

### Особливості вхідного сигналу та структури радіолокаційного вимірювача

На вхід ФАПЧ РВПР поступає суміш  $S(t)$  відбитого від цілі (снаряду) радіолокаційного сигналу і шуму, яку можна описати виразом (1).

$$S(t) = A \cdot \cos(2\pi(f_0 + f_D)t + \varphi_S(t)) + Nn(t), \quad (1)$$

$$S(t) = A \cdot \cos(2\pi(f_0 + f_D)t + \varphi_S(t)) + Nn(t),$$

де  $A$  – амплітуда вхідного сигналу,  $f_0$  та  $f_D$  – несуча частота та доплерівський зсув,  $\varphi_S(t)$  – фаза відбитого сигналу, яка змінюється внаслідок модуляції, вібрації та обертання снаряду,  $n(t)$  – дельта-корельований випадковий процес з одиничною потужністю,  $N_n$  – рівень шуму.

Слід відмітити, що через можливі зміни коефіцієнту підсилення вхідних кіл важливими є не абсолютні значення амплітуди  $A$  та інтенсивності шуму  $N$ , а їх співвідношення, яке характеризує значення енергетичного потенціалу сигналу  $\Pi$ , тобто смуга частот (Гц), в якій потужності сигналу і шуму однакові. Енергетичний потенціал  $\Pi$  обчислюють за формулою

$$\Pi = \frac{P_T G_T G_R S_{\text{ц}} \lambda^2}{4kT_N (4\pi)^3 D_{\text{ц}}^4} = K_{\text{NOISE}} [\text{Гц} \cdot \text{м}^4] / D_{\text{ц}}^4, \quad (2)$$

де  $P_T$  – потужність передавача (Вт),  $G_T$ ,  $G_R$  – коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен,  $S_{\text{ц}}$  – ефективна площа розсіювання цілі ( $\text{м}^2$ ),  $\lambda$  – довжина хвилі (м),  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  (Дж/К) – стала Больцмана,  $T_N$  – шумова температура приймача,  $D_{\text{ц}}$  – дальність до цілі (м). Коефіцієнт  $K_{\text{NOISE}}$  розраховують перед початком моделювання. Збільшення значення  $K_{\text{NOISE}}$  означає зменшення рівня шуму.

Для подальших розрахунків прийнято  $P_T = 10$  мВт,  $G_T = G_R = 8000$  (що відповідає ширині діаграми спрямованості антен по азимуту та по куту місця  $2^\circ$ ),  $T_N = 1000$  К.

Прийнято, що рух цілі (снаряду) є рівносповільненим із початковою швидкістю  $V_0$  та сповільненням (від'ємним прискоренням)  $a$ . Конкретні значення  $V_0$ ,  $a$ ,  $D_0$  і ефективної площі розсіювання  $S_{\text{ц}}$  для снарядів гаубиць 2С1,



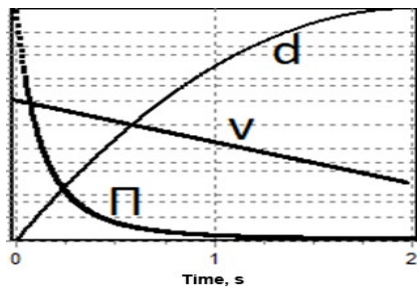
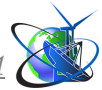
2С3 та М777, а також самохідної гармати 2С5 наведені у таблиці 1. Крім того прийнятий час спостереження за початковою швидкістю 3 с. За цей час снаряд віддаляється від позиції з початкової дальності стеження  $D_0$  (для уникнення впливів завад від плазмового сліду) до 1,5..2,5 км для 2С1 та 2С5 відповідно. Розглянута робота вимірювача на довжинах хвилі сигналу підсвітки  $\lambda = 12,5$  мм (частота 24 ГГц) та  $\lambda = 3,45$  мм (87 ГГц).

**Таблиця 1 - Тактико-технічні характеристики снарядів озброєння різних типів.**

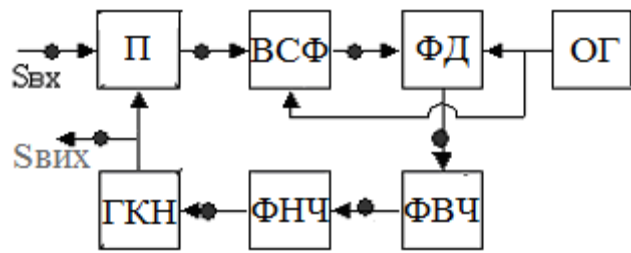
	Гаубиця 2С1, калібр 122 мм	Гаубиця 2С3, калібр 152 мм	Гаубиця М777, калібр 155 мм	Гармата 2С5, калібр 152 мм
$V_0, \text{м/с}$	630	640	877	923
$a, \text{м/с}^2$	-50	-37	-53	-55
$D_0, \text{м}$	60	200	150	200
$S_{\text{ц}}, \text{м}^2$	0,012	0,018	0,016	0,018

Характер зміни дальності і модуля швидкості снаряду та енергетичного потенціалу вхідного сигналу впродовж сеансу стеження ескізно подано на рисунку 1.

Структурна схема модифікованої системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), на базі якої пропонується будувати РВПР, зображена на рисунку 2. Склад, робота та основні характеристики такої схеми детально описані у працях [3, 4, 5]. Характерною особливістю схеми є наявність вузькосмугового фільтра (ВСФ) перед фазовим детектором (ФД) для зменшення викидів різниці фаз на входах ФД і відповідного підвищення шумового порогу зриву синхронізму та активного фільтра верхніх частот (ФВЧ) для відновлення динамічних властивостей кола, придушених ВСФ. За відсутності ВСФ і ФВЧ схема на рисунку 2 перетворюється на класичну схему ФАПЧ із пропорційно-інтегруючим фільтром петлі (ФНЧ). Центральну частоту ВСФ задає опорний генератор (ОГ), а частотна характеристика ФВЧ узгоджена із характеристикою ВСФ.



**Рисунок 1.** Ескізні часові залежності віддалі (d) снаряду від стартової позиції, модуля швидкості (V) снаряду та енергетичного потенціалу (П) сигналу радіолокаційного відбиття від снаряду.



**Рисунок 2.** Структурна схема радіолокаційного вимірювача: **ВСФ** — вузькосмуговий фільтр; **ФНЧ** — фільтр нижніх частот (петлі); **ФВЧ** — активний фільтр верхніх частот; **ФД** — фазовий детектор; **ОГ** — опорний генератор; **ГКН** — генератор керований напругою.

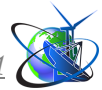
Фактично енергетичний потенціал зменшується у декілька мільйонів разів приблизно від 150 МГц до 1 кГц для  $f_0 = 24$  ГГц та від 40 МГц до 300 Гц для  $f_0 = 87$  ГГц. Конкретні значення максимального та мінімального доплерівського зсуву, а також необхідного інтервалу стеження, перераховані із швидкості, наведені у таблиці 2, а аналогічні значення для уніфікованого траєкторного вимірювача, який би охоплював усю лінійку бронебійних снарядів – у таблиці 3.

**Таблиця 2 - Граничні доплерівські зсуви, діапазон стеження та частота цілевказання для снарядів різних типів.**

Несівна	$\lambda=12,5$ мм ( $f_0 = 24$ ГГц)				$\lambda=3,45$ мм ( $f_0 = 87$ ГГц)			
	2С1	2С3	М777	2С5	2С1	2С3	М777	2С5
$F_{D\text{MAX}}$ , кГц	101	102	140	148	365	371	509	535
$F_{D\text{MIN}}$ , кГц	77	84	115	121	278	307	416	440
$\Delta F_D$ , кГц	24	18	25	27	87	64	93	95
$F_T$ , кГц	89	93	127,5	134,5	321,5	339	462,5	487,5

**Таблиця 3 - Частотний діапазон доплерівського зсуву та частота прицілювання для лінійки снарядів.**

Несівна	$F_{D\text{MAX}}$ , кГц	$F_{D\text{MIN}}$ , кГц	$\Delta F_D$ , кГц	$F_T$ , кГц
$\lambda=12,5$ мм	148	77	71	112,5
$\lambda=3,45$ мм	535	278	257	406,5



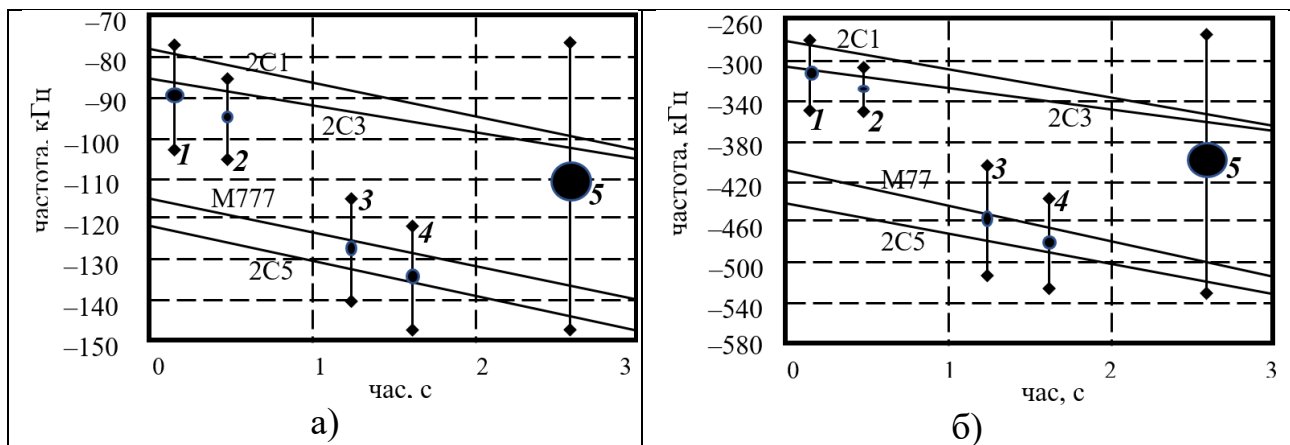
Частотні характеристики ФНЧ  $K(f)$ , ВСФ  $K_0(f)$  та ФВЧ  $K_{ФВЧ}(f)$  наведено нижче.

$$K(f) = \frac{F_{\Pi} + jmf}{F_{\Pi} + jf}; K_0(f - F_{OG}) = \frac{F_0 + jm_0(f - F_{OG})}{F_0 + j(f - F_{OG})}; K_{ФВЧ}(f) = \frac{F_0 + jf}{F_0 + jm_0f}. \quad (3)$$

У виразі (3) позначено:  $F_{\Pi}$  і  $m$  – частота зрізу і коефіцієнт пропорційності ФНЧ,  $F_0$  і  $m_0$  – частота зрізу і коефіцієнт пропорційності ВСФ та ФВЧ.

У структурній схемі на рисунку 2 вихідний сигнал знімають з виходу генератора керованою напругою (ГКН), що є очищеною від завад та зсунутою на частоту опорного генератора ОГ копією вхідного сигналу. Сигнал на вході ГКН є напругою, пропорційною доплерівському зсуву частоти, що є більш важливим для радіолокаційного вимірювача.

За наявності апріорних даних щодо швидкості об'єкта окреме вказання частоти ОГ (ФОГ), власної частоти ГКН та смуги утримання ФУА дає можливість цілевказання за частотою (частотного прицілювання). Частота прицілювання ФТ обрана як середина діапазону очікуваного доплерівського зсуву, її значення наведені у таблицях 2, 3 та позначені точками на рисунку 3.



**Рисунок 3. Зміна доплерівських зсувів радіолокаційного відгуку від снарядів озброєння різних типів, необхідні частотні інтервали стеження за снарядами з 2С1, 2С3, М777, 2С5 (цифри 1, 2, 3, 4 відповідно), частотний інтервал для перекриття усього діапазону швидкостей снарядів (5) та точки цілевказання за частотою для частоти сигналу зондування 24 ГГц (а) та 87 ГГц(б).**



## Багатоваріантний параметричний синтез слідуючого радіолокаційного вимірювача

Побудований на основі ФАПЧ РВПР, структурна схема якого зображена на рисунку 2, характеризують п'ять параметрів. Це коефіцієнт підсилення петлі  $F_{УА}$ , фізичним змістом якого є смуга утримання автономного ФАПЧ за умови відсутності завад, частота зрізу  $F_{П}$ , коефіцієнт пропорційності петлі ФНЧ  $m$ , смуга пропускання  $F_0$  та коефіцієнт передавання на віддалених від резонансної частотах  $m_0$  ВСФ, розташованого перед фазовим детектором. Параметри коригуючого ФВЧ повністю узгоджені із параметрами ВСФ.

При практичній реалізації структурної схеми радіолокаційного вимірювача за структурною схемою, що наведена на рисунку 2 слід враховувати, що досконало розвинута теорія оптимальної нелінійної фільтрації дає чіткі математично обґрунтовані рекомендації щодо вибору параметрів ФАПЧ, оптимальних за критерієм мінімуму фазової похибки стеження [6, 7, 8]. Однак практичне застосування наявних рекомендацій щодо проектування радіолокаційних вимірювачів ускладнюється рядом особливостей.

Основною обмежувальною особливістю є необхідність апріорно задавати відношення сигнал-шум у вхідній суміші. Рекомендована оптимальна смуга утримання  $F_{УА}$  за великих значень енергетичного потенціалу сигналу є надлишково широкою, а за низьких потенціалів набуває непридатних до практичного використання значень, менших від інтервалу доплерівського зсуву частоти. Крім того, відомі методи нелінійної оптимальної фільтрації є нечутливими до проковзування фази, явищ захоплення частоти та зриву синхронізму, які визначають границі працездатності пристрою.

Очевидно, що такі особливості роблять відомі рекомендації непридатними для проектування радіолокаційних вимірювачів, у яких енергетичний потенціал вхідного сигналу змінюється у десятки мільйонів разів впродовж сеансу стеження. Внаслідок цього для параметричного синтезу були застосовані евристичні методи.

Один з параметрів ФАПЧ (смуга утримання  $F_{УА}$ ) був заданий примусово з



огляду на очікувану зміну доплерівського зсуву частоти вхідного сигналу відповідно до таблиць 2, 3 та рисунку 3. Середина цього частотного інтервалу була прийнята як початкова частота прицілювання ГКН. Згідно рекомендацій [8] частота зрізу ФНЧ петлі була узгоджена із шириною розмиття спектру відбитого сигналу внаслідок вібрації та обертання снаряду, тобто прийнято  $F_{\Pi}=10$  Гц. Смуга пропускання ВСФ, частота зрізу ФВЧ  $F_0$  та його коефіцієнт пропорційності  $m_0$  обрані за методикою, описаної авторами у [4, 5], згідно якої  $F_0 \ll F_{\Pi}$ .

Єдиний залежний параметр – коефіцієнт пропорційності фільтра петлі  $m$  – було оптимізовано методом лінеаризації за критерієм мінімуму шумової смуги  $F_{\text{Ш}}$ .

За умови дії однакового білого шуму на входи ідеального фільтра з прямокутною характеристикою та шириною смуги пропускання  $F_{\text{Ш}}$  та пристрою ФАПЧ з шумовою смугою  $F_{\text{Ш}}$ , потужність вихідного сигналу фільтра точно дорівнює дисперсії фазової похибки пристрою ФАПЧ. В роботах [6, 7, 9] отриманий аналітичний вираз для шумової смуги ФАПЧ з пропорційно-інтегруючим фільтром

$$F_{\text{Ш}} = \frac{F_{\text{VA}} \beta + m^2}{4 \beta + m},$$

де  $\beta = F_{\Pi}/F_{\text{VA}}$ .

**Таблиця 4 - Оптимальні значення параметрів для траєкторних вимірювачів снарядів озброєння різних типів.**

Несівна	$\lambda=12,5$ мм ( $f_0=24$ ГГц)				$\lambda=3,45$ мм ( $f_0=87$ ГГц)			
	2С1	2С3	М777	2С5	2С1	2С3	М777	2С5
$F_{\text{VA}}$ , кГц	14	10	14	15	45	34	50	50
$m_{\text{опт}}$	0,026	0,031	0,026	0,025	0,015	0,017	0,014	0,014
$F_{\text{Ш}}$ , Гц	182	153	182	188	330	287	349	349
$K_{\text{NOISE}}$ , Гц·м <sup>4</sup>	$1,08 \cdot 10^{16}$	$1,62 \cdot 10^{16}$	$1,44 \cdot 10^{16}$	$1,62 \cdot 10^{16}$	$8,23 \cdot 10^{14}$	$1,23 \cdot 10^{15}$	$1,10 \cdot 10^{15}$	$1,23 \cdot 10^{15}$

Значення цього виразу досягає мінімуму за умови  $m = \sqrt{\beta} - \beta$  [8, 10], що використано для параметричного синтезу. Критерій мінімуму  $F_{\text{Ш}}$  не вимагає



апріорних відомостей щодо рівня завади і спирається виключно на попередньо задані значення параметрів ФАПЧ.

Розраховані оптимальні за критерієм мінімуму шумової смуги набори значень параметрів для стеження за частотою радіовідгуку від бронебійних снарядів озброєння різних типів на частотах 24 ГГц та 87 ГГц наведені у таблиці 4 та для уніфікованого до всієї лінійки снарядів вимірювача у таблиці 5. У таблиці 4 також наведені мінімальні досяжні значення шумової смуги та коефіцієнту  $K_{NOISE}$ , необхідного для розрахунку енергетичного потенціалу сигналу за виразом (2).

**Таблиця 5 - Оптимальні уніфіковані значення параметрів для траєкторних вимірювачів різних діапазонів.**

	$F_{yA}$ , кГц	$m_{OPT}$	$F_{ш}$ , Гц
$\lambda=12,5$ мм	38	0,016	303
$\lambda=3,45$ мм	130	0,0087	565

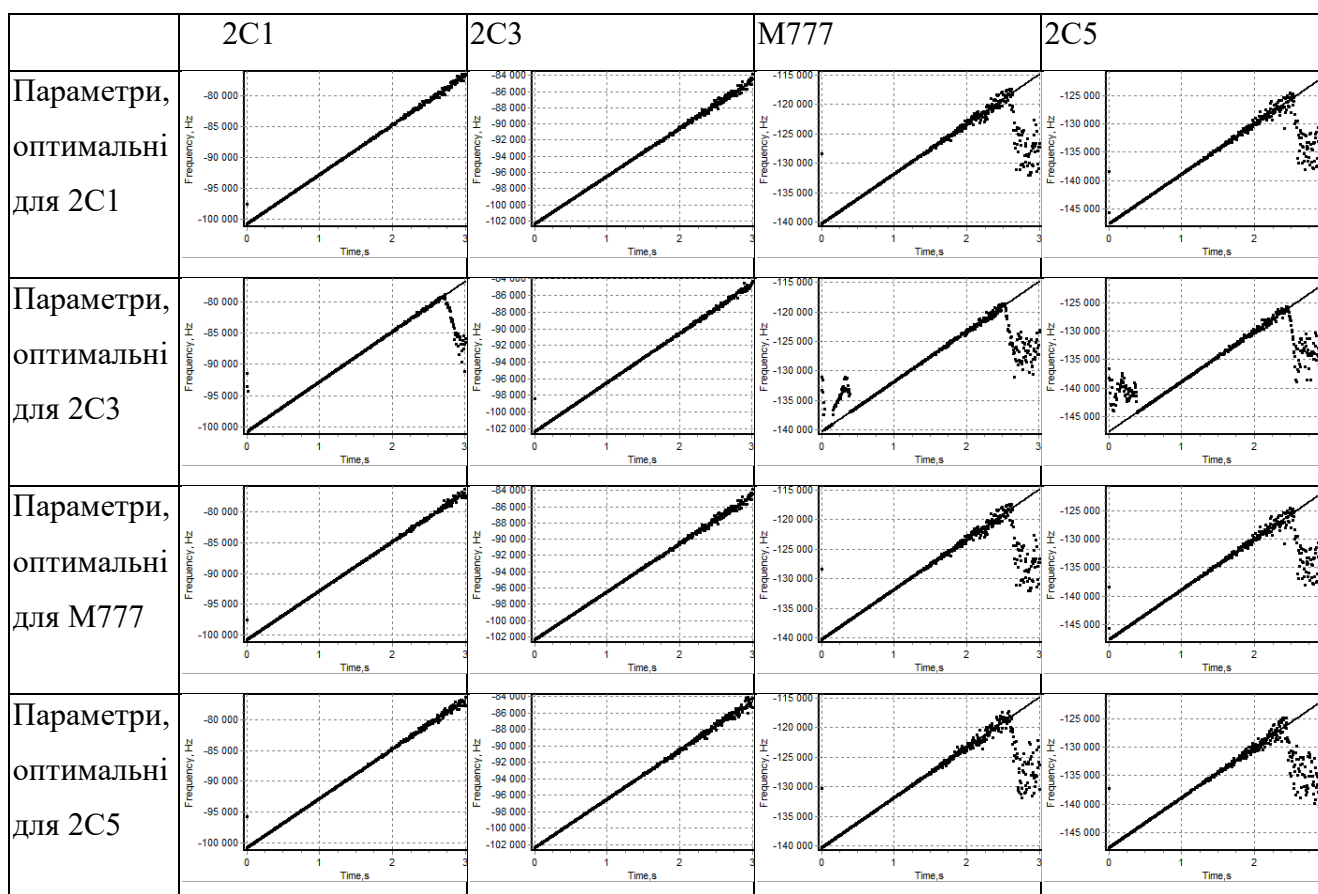
### **Результати моделювання сеансу стеження у діапазоні 24 ГГц**

Розраховані оптимальні за критерієм мінімуму шумової смуги та прийняті значення параметрів траєкторного вимірювача були використані для моделювання сеансу стеження за початковою швидкістю снарядів різних типів вимірювачами із різними установками параметрів. Результати моделювання у графічному вигляді наведені у таблиці 6. Стовпці таблиці відповідають снарядам різних гаубиць і гармати з характеристиками, вказаними у таблиці 1, а рядки – параметрам вимірювачів, налаштованих на роботу із різними типами озброєння згідно таблиці 4. Слід підкреслити, що частота цілевказання (частотного прицілювання)  $F_T$  має відповідати характеристикам снаряду, а не характеристикам вимірювача, і її необхідно змінювати зі зміною снаряду. Абсциса графіків у таблиці 6 відповідає часу спостереження, а ордината – фактичній (суцільні прямі) та вимірній (крапки із розкидом) частоті доплерівського зсуву.

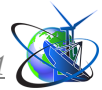


Графіки з таблиці 6 демонструють збільшення розкиду оцінки частоти із часом, тобто із віддаленням цілі і зменшенням енергетичного потенціалу вхідного сигналу. Цей випадковий розкид можна усунути вторинною обробкою (усередненням) відліків вихідного сигналу. Катастрофічним для вимірювання є зрив стеження, після якого керований генератор ГКН переходить на свою власну частоту (частоту прицілювання  $F_T$ ) незалежно від фактичної частоти відбитого сигналу. Особливо це характерно для високошвидкісних снарядів гаубиці М777 та гармати 2С5, які за час сеансу значно віддаляються від вогневої позиції і відбитий від них сигнал є занадто слабким.

**Таблиця 6 - Сеанси вимірювання швидкості снарядів озброєння різних типів за різних параметрів.**



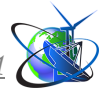
Схоплення відбитого сигналу майже в усіх змодельованих сеансах відбувається з самого початку стеження (після загасання плазмового сліду) що є наслідком розширеної смуги захоплення модифікованого ФАПЧ.



Масштаб графіків у таблиці 6 не дає можливості оцінити значення похибки вимірювання частоти, які є суттєво меншими від відстежуваної доплерівської зміни частоти. Для такої числової оцінки у кожному змодельованому сеансі був виокремлений інтервал без зривів (друга секунда стеження) та виведені графіки довірчих інтервалів різниці вимірної і фактичної частоти на рівні середньоквадратичного відхилення  $\sigma_f$ . Ці графіки зведені у таблиці 7. Форма графіків практично однакова, але масштаби показують збільшення розкиду із збільшенням швидкості снаряду і, відповідно, його віддаленості від вогневої позиції, а також під час застосування вимірювачів, налаштованих на інший тип снаряду.

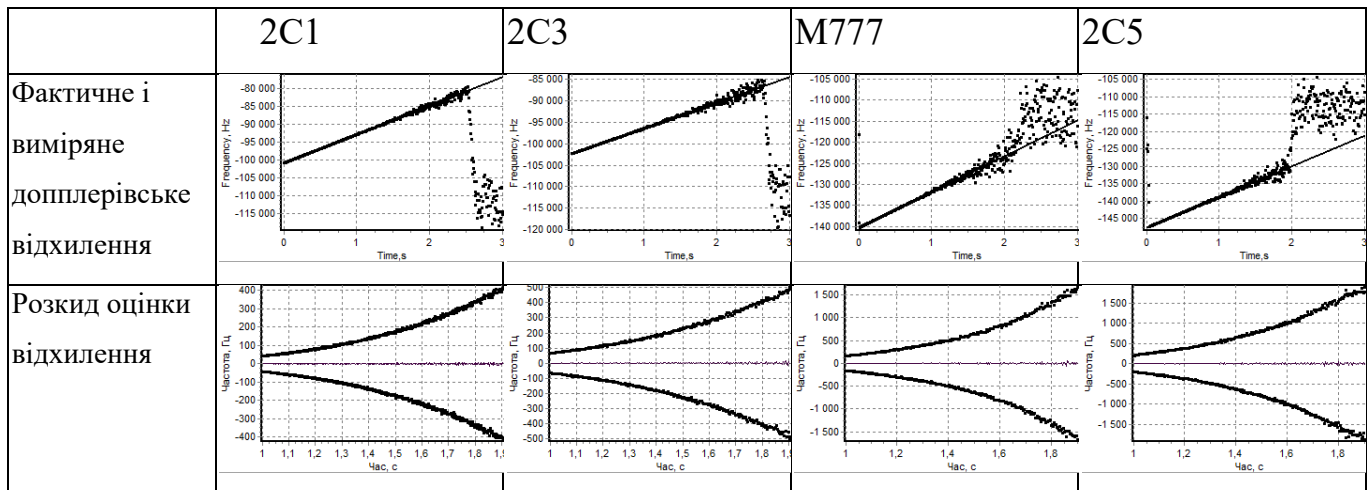
**Таблиця 7 - Зміна похибки вимірювання доплерівського зсуву сигналу від різних снарядів за різних параметрів.**

	2С1	2С3	М777	2С5
Параметри, оптимальні для 2С1				
Параметри, оптимальні для 2С3				
Параметри, оптимальні для М777				
Параметри, оптимальні для 2С5				



Аналогічні результати моделювання були отримані для вимірювача з уніфікованими параметрами з таблиці 5 та наведені у таблиці 8. У повній відповідності до рисунка 3а після зриву стеження частота ГКН вертається до частоти прицілювання  $F_T = 112,5$  кГц, тобто для повільних снарядів нижче вимірюваної частоти, а для високошвидкісних – вище неї. Слід відзначити, що жодних змін установок вимірювача при переході від одного типу снаряду до іншого не потрібно. Тому такий вимірювач і названо уніфікованим.

**Таблиця 8 - Моделювання сеансів вимірювання швидкості снарядів різних типів за уніфікованих параметрів.**

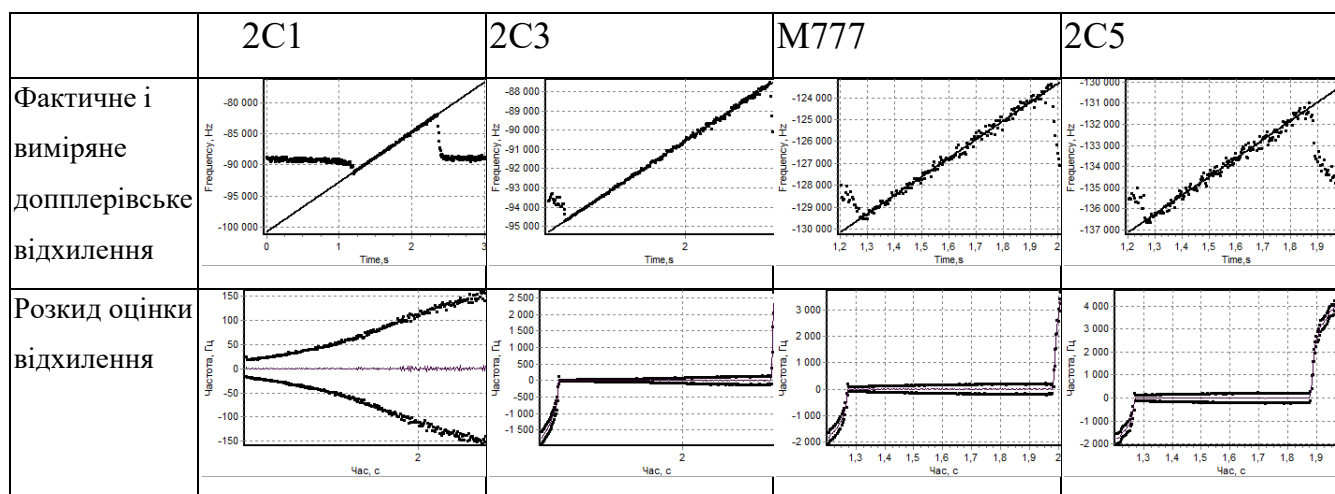


Для порівняння такі самі результати були отримані для класичного ФАПЧ (без ВСФ та ФВЧ у структурній схемі) і подані у таблиці 9. Параметри вимірювача обрані уніфікованими, але частота прицілювання обрана для кожного снаряду індивідуально згідно таблицею 2. Застосування єдиного цілевказання частоти (точка 5 на рисунку 3а) зробило би сеанс стеження неможливим через обмеженість смуги захоплення класичного ФАПЧ.

Для наочності масштаби графіків у таблиці 9 обрані різними, а отримані результати показують, що вимірювач на основі класичного ФАПЧ є працездатним лише в обмеженому інтервалі часу, коли фактична частота відбитого сигналу знаходиться поблизу частоти прицілювання.



**Таблиця 9 - Моделювання сеансів вимірювання класичним ФАПЧ з уніфікованими параметрами.**



### Результати моделювання сеансу стеження у діапазоні 87 ГГц

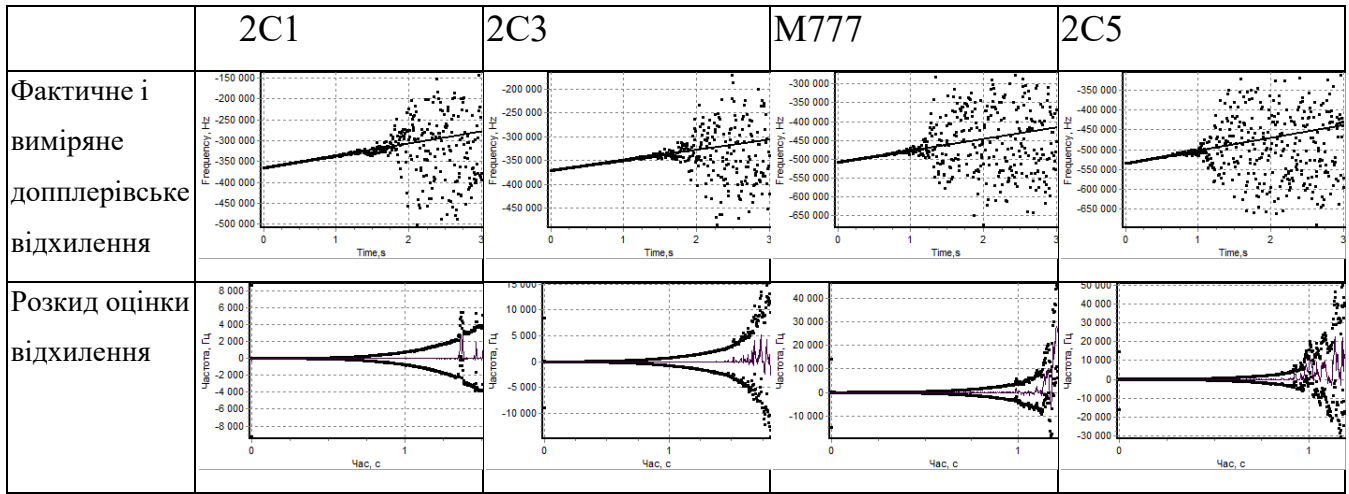
Моделювання сеансів стеження вимірниками із частотою несучої 87 ГГц було проведене із використанням характеристик снарядів з таблиць 1, 2 та оптимальних параметрів з таблиці 4. Порівняно із використанням частоти 24 ГГц робота вимірника ускладнена значним (більш як у 10 разів) зменшенням енергетичного потенціалу вхідного сигналу у відповідності до виразу (2). Результати моделювання наведені у таблиці 10.

Графіки з таблиці 10 показують, що на частоті 87 ГГц через збільшену інтенсивність шуму стеження можливе тільки до часу біля 1,5 с для повільних снарядів та біля 1 с для високошвидкісних навіть за умови індивідуального підбору значень параметрів та частотного цілевказання.

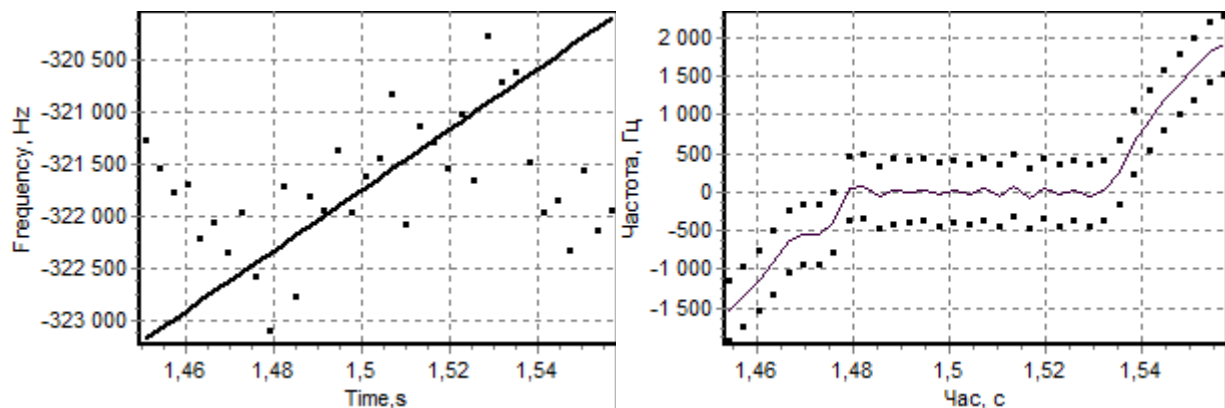
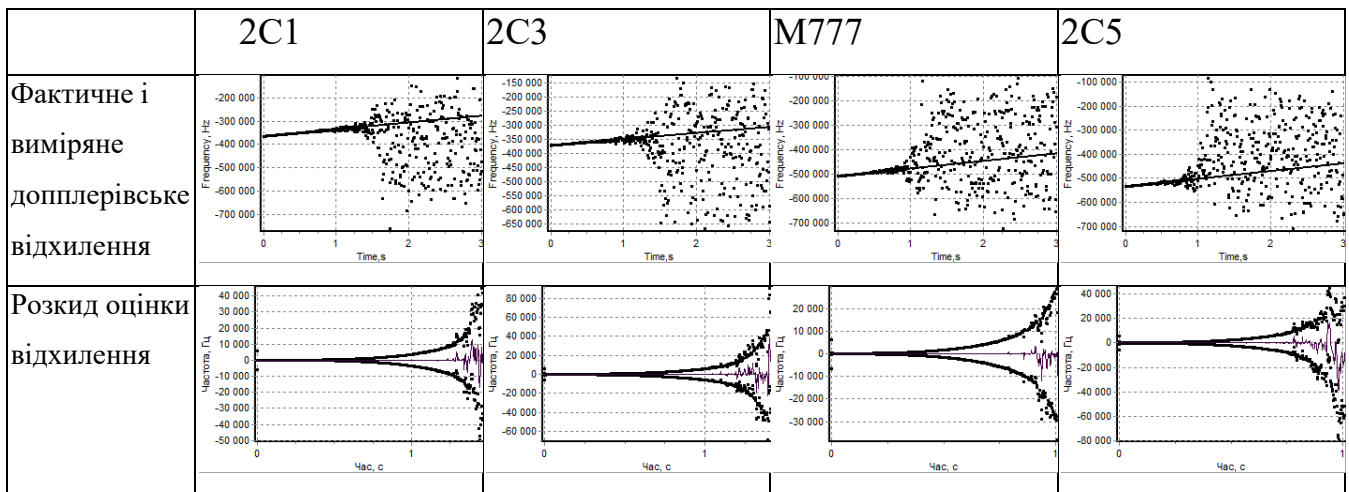
Аналогічні результати моделювання були отримані для вимірника із уніфікованим набором параметрів з таблиці 5 і подані у таблиці 11. У цьому випадку час стеження зменшується і становить трішки більше 1 с для повільних та трішки менше 1 с для високошвидкісних снарядів. Навіть цього зменшеного часу достатньо для вимірювання початкової швидкості і, головне, застосування уніфікованого вимірника не вимагає індивідуальних установок значень параметрів і частотного прицілювання.



**Таблиця 10 - Результати моделювання вимірювачів з індивідуальними параметрами на частоті 87 ГГц.**



**Таблиця 11 - Результати моделювання вимірювача з уніфікованими параметрами на частоті 87 ГГц.**



**Рисунок 4 - Абсолютні значення (а) та відхилення (б) фактичної і вимірної класичним ФАПЧ частоти.**



Результати моделювання вимірювача, побудованого на основі класичного ФАПЧ, наведені на рисунку 4 і показують що стеження можливо впродовж дуже короткотривалого часу коли фактична частота прийнятого сигналу наближується до частоти цілевказання.

Абсолютно точно цілевказання початкової частоти відбитого сигналу не покращує ситуацію – після дуже короткотривалого (не більше 60 мс) супроводу частоти відбувається зрив стеження. Отже класичний пристрій ФАПЧ абсолютно непридатний для побудови траєкторних вимірювачів на частоті 87 ГГц.

Отримані у роботі результати моделювання сеансів стеження за сигналом, відбитих від снарядів гаубиць 2С1, 2С3, М777 та гармати 2С5, за умов використання радіолокаційних вимірювачів із індивідуальними установками значень параметрів і частотного цілевказання, а також за умов використання універсального набору параметрів, зведені у таблиці 12 у вигляді числових показників – середньоквадратичного відхилення похибки вимірювання та часу зриву стеження.

**Таблиця 12 - Числові показники результатів моделювання сеансів стеження.**

Несівна	Показник	2С1	2С3	М777	2С5	Універсальні
$\lambda=12,5$ мм ( $f_0 = 24$ ГГц)	$\sigma_f$ , Гц	85	64	350	420	400..1600
	час зриву, с	3(-)	3(-)	2,6	2,4	2,0..2,6
$\lambda=3,45$ мм ( $f_0 = 87$ ГГц)	$\sigma_f$ , кГц	4	5	10	20	20..40
	час зриву, с	1,4	1,5	1,2	1,0	0,8..1,2

## Висновки

Наведені в таблиці 12 числові значення показників демонструють, що використання траєкторного вимірювача із універсальним набором значень параметрів збільшує середньоквадратичне відхилення похибки частоти та зменшує час стеження впродовж сеансу вимірювання.



Показане збільшення випадкових викидів похибки вимірювання можна компенсувати вторинною обробкою (усередненням), а реалізований час стеження до зриву є цілком достатнім для визначення початкової швидкості снаряду.

Отже, траєкторний вимірювач швидкості снарядів із уніфікованим набором параметрів, який не вимагає додаткових установок параметрів і цілевказання за частотою, можна вважати доцільним для використання спільно із довільним озброєнням із розглянутого у роботі переліку.

### Список використаних джерел

1. Керівництво з бойової роботи вогневих підрозділів артилерії / [М. В. Бахмат, М. Я. Олійник, С. М. Свідерок та ін.]. – Львів: НАСВ, 2019. – 148 с.
2. Кривошеєв А. М. Основи артилерійської розвідки: навч. посіб. / А. М. Кривошеєв, А. І. Приходько, В. М. Петренко. – Суми : Сумський державний університет, 2014. – 393 с.
3. Бондарев А.П., Мартинів М.С. Пристрій фазової автопідстройки частоти. Патент України на вина-хід № 66435, бюл. № 5, 2004.
4. Бобало Ю. Я. Порівняльний аналіз траєкторних вимірювачів сантиметрового та міліметрового діапазонів / Ю. Я. Бобало, А. П. Бондарев, Ю. І. Будерецький, Б. М. Стрихалюк, М. Я. Олійник // Журнал “Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія” Національного університету “Львівська політехніка”. 2023. №3(2). 2023. С. 150-157. DOI: <https://doi.org/10.23939/istee2023.02.150>.
5. Bondariev A., Altunin S., Horbatyi I., Maksymiv I. Firmware implementation and experimental research of the phase-locked loop with improved noise immunity. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2018, № 5/9 (95), p. 17–25. DOI: [10.15587/1729-4061.2018.143178](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143178)
6. Davis, M.H.A., Marcus, S. I. (1981). An Introduction to Nonlinear Filtering. In :Hazewinkel, M., Willems, J. C.(eds) Stochastic Systems: The Mathematics of Filtering and Identification and Applications. NATO Advanced Study Institutes Series,



vol 78.. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-8546-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-009-8546-9_4).

7. J.H. Van Schuppen, Stochastic Control Theory and Stochastic Differential Systems, M. Kohlmann and W. Vogel, eds New York: Springer-Verlag, 1979.

8. Colin Fox, Malcolm E. K. Morrison, Richard A. Norton, and Timothy C. A. Molteno. Optimal nonlinear filtering using the finite-volume method. Phys. Rev. E 97, 010201(R) (2018) - Published 3 January, 2018.

9. Egan W. F. Phase-lock basics. –New York: John Wiley & Sons Inc., 1998. – 480 pp.

10. Lindsey W.C. Synchronization systems in communication and control. Prentice-Hall, 1972. -598 pp.

11. Dzyuba A.O., Budaretskyi Yu.I. The method and means of installing radar measuring devices on artillery systems for the parameters of ammunition motion. Military Technical Collection. Vol. 33 No. 2, 2025. P. 109-116.

**Abstract.** (Extended abstract, i.e. briefly all sections of the article in English. If the main text is in English - in Ukrainian).

The article is devoted to the problem of measuring the initial velocity of an artillery shell using a ballistic station (trajectory meter) at the firing position. The main attention is paid to ensuring the performance of the meter with fixed parameters for the case of use with different types of weapons. The parametric optimization carried out showed the possibility of using meters of the millimeter range to determine the initial velocities of a line of armor-breaking shell without additional setting of installations. The carried out parametric optimization showed the possibility of using radar meters of the millimeter wave range to determine the initial velocities of projectiles without additional adjustment of their settings. The simulation of the measurement session was carried out using a specially designed software application in an object-oriented environment. Capture of the signal after the end of the plasma trail and tracking along the trajectory are considered separately. The subject area of research is radar feedback from 2S1, 2S3, M777 howitzer shells and 2S5 cannon. The caliber of these projectiles ranges from 122 mm to 155 mm. By means of multivariate para synthesis, optimal sets of parameters were determined for each of the projectile types. And so a unified set of parameters was selected. The results of the conducted research showed that the meter with unified parameters gives a greater measurement error, but is completely operational. It is advisable to divide the unified settings of parameter sets into two groups - separately for the 24 GHz band and for the 87 GHz band. The growth of the root mean square deviation of the measurement error in the conditions of the transition from individually optimal parameter values to unified values is quite significant - from five to ten times. But these deviations are symmetrical about the average value of the measurement error and can be eliminated by averaging during secondary processing of the radio response signal. The average error value is negligibly small throughout the tracking session. Studies have also shown the impossibility of unifying the parameters of a classical meter in the 87 GHz range, where a modified meter must be used.

**Key words:** PLL, frequency tracking, frequency error, unified parameters.



*Науковий керівник: к.т.н., с.н.с. Бударецький Ю.І.*

*Стаття підготовлена в рамках Програми підготовки дисертації  
на здобуття наукового звання доктора філософії Дзюба А.О.*

Статтю надіслано: 24.12.2025 р.

© Бондарев А.П.

Бударецький Ю.І.

Дзюба А.О.