



ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СТЕЖНИХ ТРАЄКТОРНИХ ВИМІРЮВАЧІВ

А. Бондарєв¹, Ю. Бударецький², М. Олійник²

¹ Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

² Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного,
вул. Героїв Майдану, 32, Львів, 79000, Україна

Відповідальний за рукопис: Михайло Олійник (e-mail: kombat26abr@gmail.com).

(Подано 1 квітня 2021)

Розглянуто проблему траєкторних вимірювань повітряних цілей. У статті виконано імітаційне моделювання вимірювачів двох типів – класичного та модифікованого, наведено та описано їх структурні схеми та аналітичні математичні моделі. Числові випробування моделей проведено для двох тестових траєкторій, які імітують рівноприскорений рух повітряної цілі. За результатами моделювання визначено діапазон захоплення і супроводу частоти вхідного сигналу та похибки її вимірювання у широкому діапазоні зміни енергетичного потенціалу, показано можливість істотного зменшення часу захоплення частоти та розширення діапазону стеження.

Ключові слова: *стежний вимірювач; захоплення та супровід частоти; похибки вимірювання частоти.*

УДК: 621.391:621.372

1. Вступ

Забезпечення приймання радіолокаційних сигналів, відбитих від маневреної повітряної цілі, є важливим завданням як для господарського, так і для спеціального застосування. Приймання таких сигналів ускладнено за умов маневрування цілі та високого рівня завад (малого енергетичного потенціалу сигналу). Завдання виявлення і супроводу високодинамічних цілей зумовлює використання стежних вимірювачів на базі пристроїв фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Основним критерієм оптимізації таких пристроїв є мінімізація фазової похибки стеження, якої стосуються роботи [1, 2]. Головною суперечністю у проектуванні стежних вимірювачів є вибір еквівалентної шумової смуги для широкого діапазону супроводу та короткого часу захоплення. Збільшення цієї смуги зменшує динамічну похибку, але збільшує її флуктуаційну складову. Крім того, класичний метод оптимізації передбачає апріорне визначення енергетичного потенціалу. Але у реальних ситуаціях цей показник динамічно змінюється. Технологічну суперечність автори [3] розв'язали, виконавши структурну оптимізацію стежного вимірювача. У модифікованому варіанті в класичну схему стежного вимірювача перед фазовим детектором було встановлено вузькосмуговий фільтр, а після фазового детектора – активний фільтр верхніх частот [4, 5].

Метою цієї роботи є дослідження модифікованого стежного пристрою траєкторних вимірювань за допомогою імітаційного моделювання на ЕОМ.

2. Модель та характеристики тестових траєкторій

Для визначеності багатоваріантної та багатофакторної задач моделювання траєкторних вимірювань тестовою траєкторією прийняли рівноприскорений рух великого реактивного літака із розмахом крил 40 м. Це може бути маневр із наближенням або віддаленням до спостережного пункту, або рух по колу з постійною лінійною швидкістю (рис. 1).

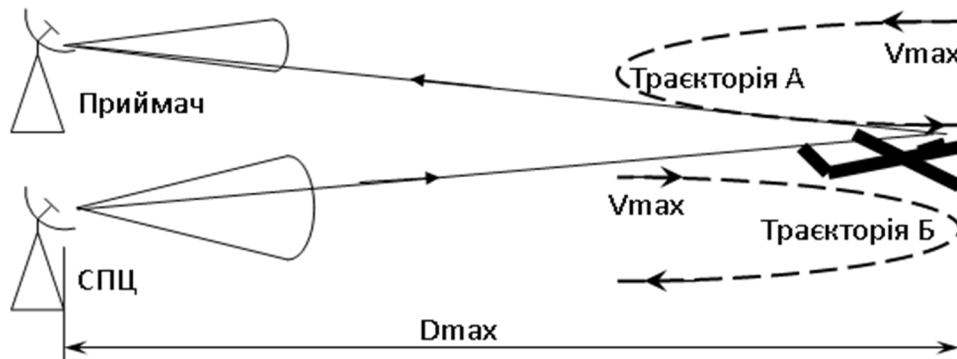


Рис. 1. Тестові траєкторії для імітаційного моделювання стежного вимірювача

Основні параметри відбитого сигналу прийнято відповідно до відкритих джерел [6, 7]. Крім того, ми задали максимальну віддасть ($D_{MAX} = 80$ км), максимальну швидкість ($V_{MAX} = 640$ м/с) та прискорення ($a = 19,6$ м/с²) цілі. При цьому на тестовій траєкторії віддасть до цілі змінюється від 80 км до 70 км. За прийнятих параметрів цілі та височастотних пристроїв РЛС (довжина хвилі $\lambda = 3,2$ см) сигнал на вході приймача має енергетичний потенціал від 7,2 кГц до 12,5 кГц і ширину спектра частотних флуктуацій 100 Гц. Допплерівський зсув частоти на тестових траєкторіях становить від плюс 40 кГц до мінус 40 кГц за час маневру 60 с.

Часові залежності віддалі цілі та енергетичного потенціалу на тестових траєкторіях А (спочатку наближення, а відтак віддалення) та Б (спочатку віддалення) наведено на рис. 2.

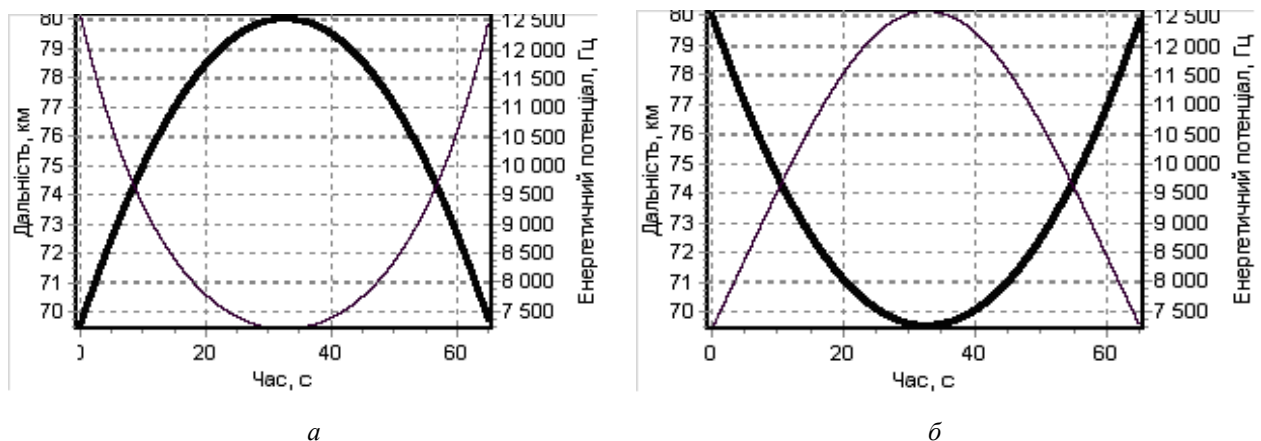


Рис. 2. Часові залежності дальності цілі (тонкі лінії) та енергетичного потенціалу сигналу (потовчені) для тестових траєкторій А (а) та Б (б)

Задані умови визначають дуже складну цільову та фонову обстановку, яка формує вхідний процес S_{ex} стежного вимірювача.

3. Схемна та математична моделі модифікованого стежного фазового детектора

Згідно із основними принципами нелінійної фільтрації [8–10] оптимальним є кореляційний приймач, який містить керований генератор копії очікуваного сигналу, детектор розузгодження із оригіналом та петлю керування. У стежних детекторах на основі ФАПЧ сигнал керування пропорційний до різниці фаз керованого генератора та прийнятого сигналу. Внаслідок принципової періодичності фази характеристика фазового детектора (ФД), який є детектором розузгодження, є періодичною та обмеженою.

Обмеженість робочої ділянки детекторної характеристики ФД є основним джерелом порогового обмеження завадостійкості. Зрив синхронізму відбувається, коли сумарна похибка синхронізації (статична, динамічна і шумова) виходить за межі цієї робочої ділянки ($\pm \pi/2$). На етапі проєктування це зумовлює необхідність пошуку компромісу між завадостійкістю (статистична складова похибки) та динамічними властивостями пристрою (динамічна складова).

Ідея підвищення завадостійкості зі збереженням динамічних властивостей полягає у зменшенні викидів різниці фаз перед ФД (щоби фазова похибка не виходила за межі робочої ділянки) і подальшому підсиленні вихідного сигналу ФД (щоб відновити динамічні властивості демодулятора). Структурна схема пристрою, який реалізує цю ідею, наведена на рис. 3 і відрізняється від схеми класичного ФАПЧ наявністю, крім ФНЧ петлі, вузькосмугового фільтра (ВСФ) перед ФД та активного фільтра верхніх частот (ФВЧ) після нього. ВСФ реалізовано як синхронно-фазовий фільтр, у квадратурних каналах якого використані однакові пропорційно-інтегруючі фільтри (ПІФ). Операторні коефіцієнти передавання ФНЧ петлі та ПІФ у квадратурних каналах ВСФ описують вирази

$$K(p) = \frac{a + mp}{a + p}; \quad K_0(p) = \frac{a_0 + m_0 p}{a_0 + p}; \quad (1)$$

де a, a_0, m, m_0 – частоти зрізу та коефіцієнти пропорційності (коефіцієнти прередавання на верхніх частотах) петльового фільтра та фільтрів у квадратурних плечах вузькосмугового фільтра відповідно. Операторна функція ФВЧ обернена до функції ПІФ квадратурних каналів.

У структурній схемі на рис. 3 залежно від особливостей застосування вихідний сигнал знімають або з виходу керованого генератора (очищена від завад та зсунута на частоту опорного генератора копія вхідного сигналу), або із його входу (напряга, пропорційна до доплерівського зсуву частоти).

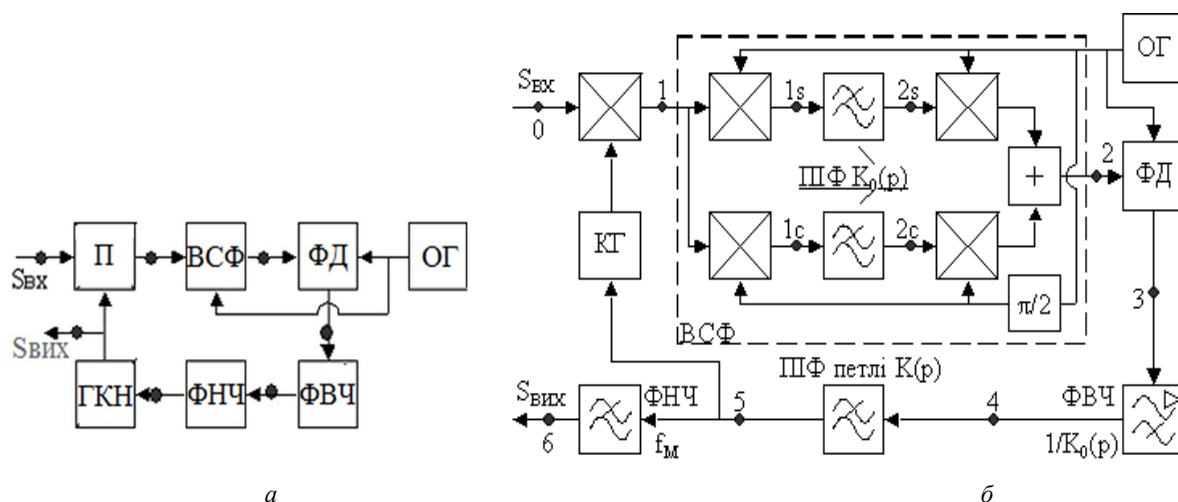


Рис. 3. Спрощена (а) та деталізована (б) структурні схеми модифікованого стежного вимірника:
 П – перемножувач; ФНЧ – фільтр нижніх частот; ФВЧ – активний фільтр верхніх частот;
 ВСФ – вузькосмуговий фільтр; ФД – фазовий детектор; ОГ – опорний генератор;
 ГКН – генератор, що керується напругою

Для аналізу нелінійних явищ у модифікованому вимірювачі розроблена його математична модель у вигляді такої системи алгебраїчних та диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}
 u_{1S} &= \sin(j_0(t) + j_n(t)); \\
 dy_{2S} / dt &= a_0 [(1 - m_0)u_{1S} - y_{2S}]; \\
 dy_{2C} / dt &= a_0 [(1 - m_0)u_{1C} - y_{2C}]; \\
 j_2 &= \arctg(u_{2S} / u_{2C}); \\
 dy_4 / dt &= -a_0 [y_4 + (1 - m_0)u_3] / m_0; \\
 dy_5 / dt &= a [(1 - m)u_4 - y_5]; \\
 dj / dt &= \Omega_{\Pi} - \Omega_{YA} u_5. \\
 u_{1C} &= \cos(j_0(t) + j_n(t)); \\
 u_{2S} &= y_{2S} + m_0 u_{1S}; \\
 u_{2C} &= y_{2C} + m_0 u_{1C}; \\
 u_3 &= F(j_2); \\
 u_4 &= (y_4 + u_3) / m_0; \\
 u_5 &= y_5 + m \chi_4,
 \end{aligned} \tag{2}$$

де $\varphi(t)$, $\Omega_{YA} u_5$ – фазова та частотна похибки вимірювання; Ω_{YA} – смуга утримання автономного стежного вимірювача (без впливу завад); u з індексами – напруги у точках структурної схеми пристрою; y з індексами – визначальні змінні фільтрів, які описують стан реактивних елементів цих фільтрів; Ω_{Π} – змінна доплерівська частота; φ_n – перерахований на фазовий шум змінний енергетичний потенціал, $F(\varphi_2)$ – детекторна характеристика ФД. Якщо прийняти у (2) $m_0=1$, отримаємо модель класичного ФАПЧ, а якщо $m = 1$ – модель безфільтрового ФАПЧ.

Для багатоваріантного аналізу моделі (2) розроблена (у середовищі Delphi) прикладна оболонка, яка реалізує зміну параметрів системи рівнянь та числове інтегрування.

4. Порівняння результатів моделювання траєкторних вимірювань

Серед різноманіття можливих наборів значень параметрів для порівняльного аналізу вибрані оптимальні за значенням похибки стеження параметри класичного вимірювача та оптимальні за діапазоном стеження параметри модифікованого. Результати моделювання наведено на рис. 4. Наведені на рис. 4 (а, б) дані показують, що класична система ФАПЧ схоплює сигнал на 26 с і супроводжує його до 50 с за доплерівського зсуву від плюс 8 кГц до мінус 22 кГц для траєкторії А та схоплює сигнал на 29 с і супроводжує його до 48 с за доплерівського зсуву від мінус 6 кГц до плюс 19 кГц для траєкторії Б.

Натомість із результатів моделювання, наведених на рис. 4, в, з, видно, що модифікований пристрій схоплює сигнал вже на 3 с і має смугу захоплення від плюс 38 кГц та смугу утримання від плюс 38 кГц до мінус 39,9 кГц для траєкторії А та схоплює сигнал на 1 с і має смугу захоплення від мінус 40 кГц та смугу утримання до плюс 40 кГц для траєкторії Б.

Деяка різниця у часі та діапазоні захоплення й утримання зумовлена тим, що на траєкторії Б початок та закінчення вимірювань відбуваються на меншій дальності цілі, а відтак за більшого енергетичного потенціалу сигналу.

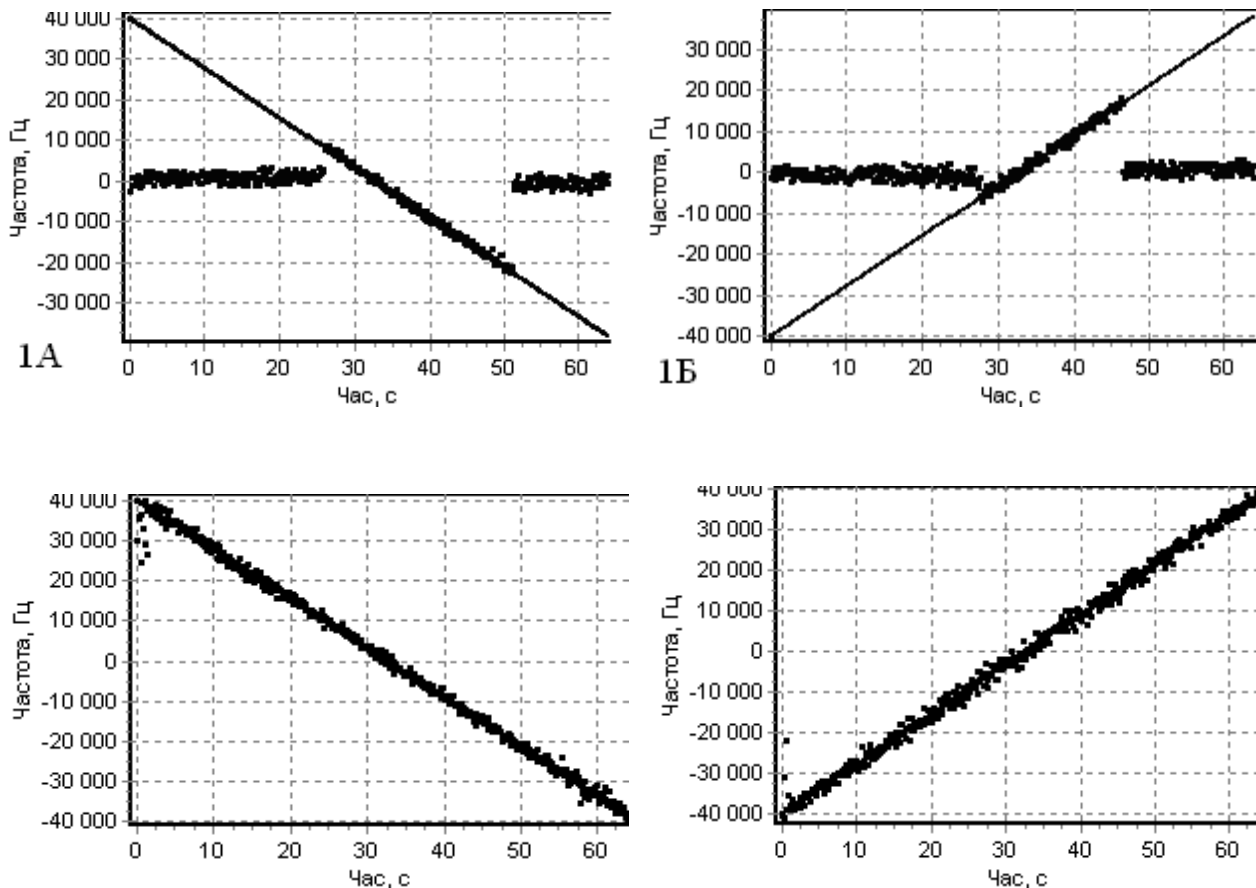


Рис. 4. Результати імітаційного моделювання класичного (а, б) та модифікованого (в, г) вимірювачів на тестових траєкторіях “А” (а, в) і “Б” (б, г). Точки – частота КГ, суцільні – частота сигналу

На рис. 5 зображено процеси захоплення цілі у модифікованому вимірювачі. Для траєкторії А час захоплення становить близько 6 мс, а для траєкторії Б – близько 2 мс. Різниця зумовлена більшим енергетичним потенціалом сигналу на початку траєкторії Б.

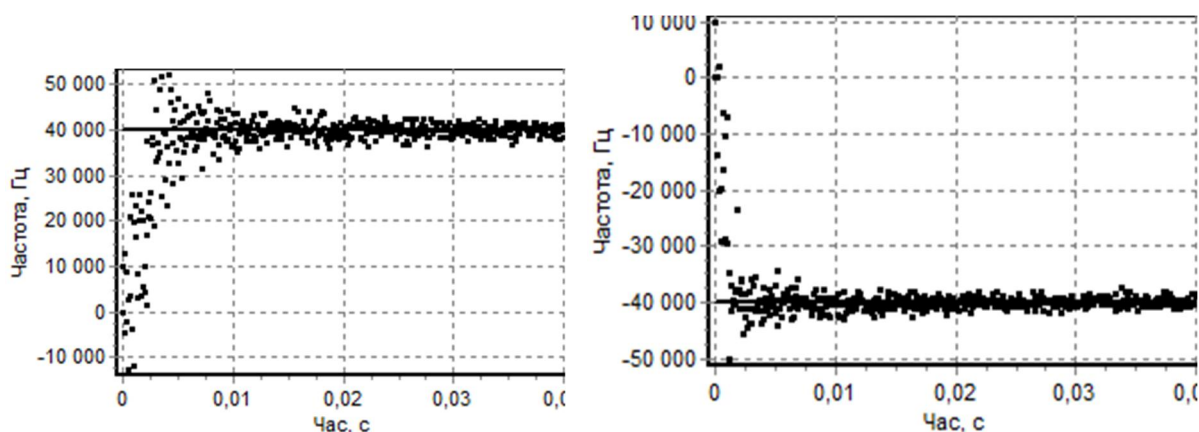


Рис. 5. Перехідні процеси (схоплення) у модифікованому вимірювачі на тестових траєкторіях “А” (а) і “Б” (б)

На рис. 6 у збільшеному масштабі наведено похибки вимірювання зсуву доплерівської частоти сигналу, що відбивається від цілі.

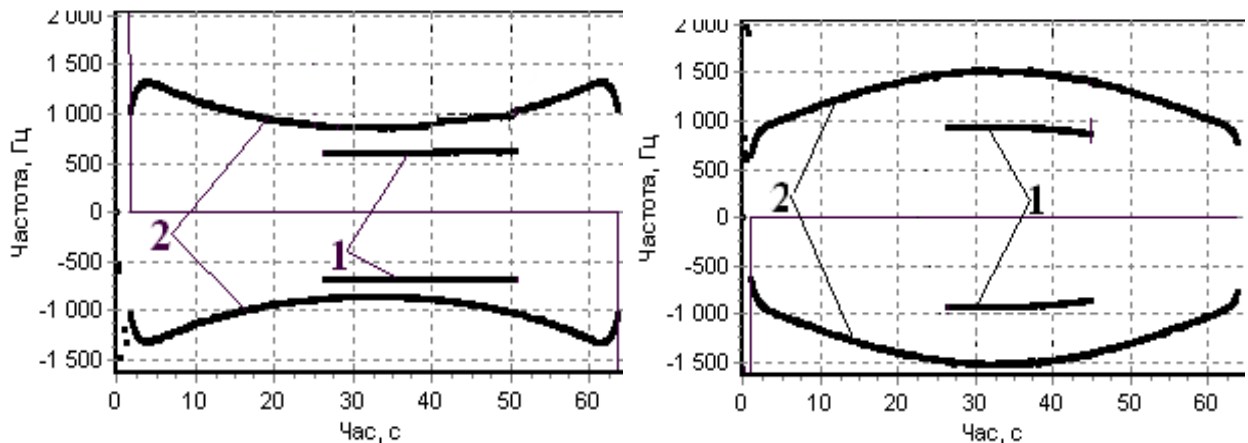


Рис. 6. Довірчі інтервали частотної похибки вимірювачів

Висновки

Результати моделювання показують, що класичний пристрій дає меншу похибку вимірювання доплерівської частоти цілі, але в істотно звуженому діапазоні стеження. Натомість модифікований пристрій із дещо збільшеною частотною похибкою забезпечує стеження практично у всьому заданому діапазоні доплерівських частот. Порівняльний аналіз класичного та модифікованого стежних вимірювальних пристроїв показав збільшення смуги захоплення та утримання модифікованого пристрою у 2,5 разу відносно класичного за одночасного збільшення похибки стеження на 20–30 %.

Список використаних джерел

- [1] Шахгильдян В. В., Ляховкин А. А. Системы фазовой автоподстройки частоты. М.: Связь, 1972.
- [2] Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские процессы. М.: Сов. радио, 1977. 488 с.
- [3] Бондарев А. П., Мартинів М. С. Пристрій фазової автопідстройки частоти. Патент України на винахід, № 66435, бюл. № 5, 2004.
- [4] Bondariev A., Altunin S., Horbatiy I., Maksymiv I. Firmware implementation and experimental research of the phase-locked loop with improved noise immunity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, No. 5/9 (95), P. 17–25.
- [5] Бондарев А. П., Мартинів М. С. Порівняльне імітаційне моделювання пристроїв слідування за несучою радіолокаційного сигналу. *Моделювання та інформаційні технології*, 2006, вип. 35, С. 85–90.
- [6] Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника. Т. 1. Основы радиолокации / пер. с англ. М.: Сов. радио, 1976. 456 с.
- [7] Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника. Т. 3. Радиолокационные устройства и системы / пер. с англ. М.: Сов. радио, 1976. 528 с.
- [8] Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том 2. Теория нелинейной модуляции / пер. с англ. под ред. проф. В. Т. Горяинова. М.: Сов. радио, 1975. 344 с.
- [9] Пестряков В. Б. Фазовые радиотехнические системы (основы статистической теории). М.: Сов. радио, 1968. 468 с.
- [10] Ярлыков М. С. Применение марковской теории нелинейной фильтрации в радиотехнике. М.: Сов. радио, 1980. 360 с.

RESEARCH OF SIMULATION RESULTS OF TRACKING TRAJECTOR METERS

A. Bondariev¹, Y. Budaretskyi², M. Oliinyk²

¹ Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine

² Hetman Petro Sahaidachny National Army Academy, 32, Heroiv Maidanu Str., Lviv, 79000, Ukraine

The article is devoted to the problem of trajectory measurements of air targets. The article performs simulation modeling of two types of meters – classical and modified, their structural schemes and analytical mathematical models are given and described. Numerical tests of the models were performed for two test trajectories that simulate uniformly accelerated motion of an air target. According to the simulation results, the range of capture and tracking of the frequency of the input signal and the error of its measurement in a wide range of energy potential changes, the possibility of significantly reducing the time of frequency capture and expanding the tracking range.

Key words: *tracking meter; frequency capture and lock-in; frequency measurement errors.*