

Г. Д. Братченко, д.т.н., Д. В. Григор'єв, Г. Г. Смаглюк

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса

**ОЦІНКА ВПЛИВУ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ФАКТОРІВ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ РІЗНИЦІ ФАЗ ВІДПОВІДНИХ ГАРМОНІК У ДВОХ СИГНАЛАХ**

Методом імітаційного моделювання оцінюється вплив дестабілізуючих факторів на точність вимірювання різниці фаз гармонік у спектрах двох сигналів, які є адитивною сумішшю кількох гармонічних сигналів та гаусівських шумів, з використанням методу дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Як дестабілізуючі фактори розглядаються власні шуми в приймальному каналі та вплив зближення гармонік за частотою. Оцінювання впливу цих факторів виконується для випадків застосування прямокутного вікна та вікон Хеммінга або Ханна.

**Ключові слова:** імітаційне моделювання, вимірювання різниці фаз, дискретне перетворення Фур'є (ДПФ), дестабілізуючі фактори.

**Вступ.** Необхідність вимірювання різниці фаз гармонік має місце при вирішенні багатьох задач в радіотехніці та електротехніці. Наприклад, останнім часом значна увага приділяється дослідженню можливості застосування фазового (інтерферометричного) методу вимірювання при оцінюванні просторового розподілу відбивачів в радіолокаційних станціях (РЛС) з інверсним синтезуванням апертури (ІСА) [1 – 4]. За наявності двох рознесених за висотою антен інформація про різницю фаз відповідних елементів радіозображень, отриманих шляхом ІСА в двох приймальних каналах може бути використана для вимірювання висоти блискучої точки. Відомі результати моделювання [2, 3] та натурального експерименту [5] свідчать про принципову можливість проведення вимірювань висоти блискучих точок, які були попередньо розділені за рахунок відмінностей доплерівських частот при ІСА. Однак залишається не достатньо дослідженим вплив різного роду дестабілізуючих факторів на точність вимірювання різниці фаз. Серед таких факторів найбільш вагомими є вплив шумів і завад та вплив методичної похибки процедури спектрального аналізу при ІСА в залежності від відносного розташування гармонік в спектрі. При ІСА найбільш поширеним методом спектрального аналізу є дискретне перетворення Фур'є (ДПФ), яке має обчислювальні переваги особливо при застосуванні швидких алгоритмів його реалізації.

Серед методів спектрального аналізу, які принципово можуть бути застосовані для вимірювання фаз гармонік, можна відзначити також метод Проні [6, 7]. В той же час він вимагає відношення сигнал / шум більше 60 дБ, що значно гірше його потенційної точності [7], хоча у разі збільшення кількості ітерацій до чотирьох (і відповідно зростання обчислювальних витрат) при

оцінюванні параметрів однієї гармоніки відносна похибка вимірювань параметрів зменшується на 30-40 дБ.

М. Крумфольцом та М. Седлацеком досліджені методи синусоїдальної підгонки (sine-wave-fit techniques), засновані на методі найменших квадратів. При вимірюванні різниці фаз порівнюються цифрові сигнали з однаковою частотою дискретизації: гармонічний (синусоїдальний) у суміші з шумовим та ідеальний опорний синусоїдальний сигнал. Сигнали характеризуються трьома параметрами (амплітуда, частота і початкова фаза, при цьому частоти і нульові компоненти постійного струму цих сигналів вважаються рівними), чотирма (додається ненульова постійна складова) або сімома (для двох синусоїд з однаковими частотами, з двома різними амплітудами, початковими фазами та постійними складовими). Ці методи дозволяють, крім вимірювання фази, також вимірювати амплітуду сигналу, частоту і, в разі 4-параметричних методів, також компоненту постійного струму [8, 9, 10]. Однак можливість застосування цих методів у випадку вимірювання різниць фаз сигналів, які складаються з адитивної суміші кількох гармонік та шумів, не розглядалася.

Також в [9, 10] досліджуються методи вимірювання різниці фаз двох гармонічних сигналів, засновані на ДПФ. Різниця фаз між гармоніками двох сигналів при в цьому випадку вимірюється як різниця фаз значень фазового спектру гармонік ДПФ цих сигналів. Для зменшення впливу ефекту просочування спектру некогерентної вибірки до сигналу застосовуються віконні функції. При використанні цього методу точне значення частоти сигналу знаходиться між значеннями двох найбільших спектральних компонент амплітудно-частотного спектру. Відоме значення

спектру використовуваного вікна дозволяє знайти значення зміщення частоти, наприклад десяткове значення частоти, яке було додано до частоти перших двох найбільших значень амплітудно-частотного спектру для отримання частоти сигналу. Після знаходження значення частоти можливо отримати середньоквадратичне значення амплітуди та фазу сигналу. В [9, 10] застосовується вікно Ханна. При цьому ДПФ із додатковим застосуванням вікна є більш чутливим до шумів, ніж метод ДПФ з прямокутним вікном.

Відомі результати щодо застосування ДПФ для вимірювання різниці фаз гармонік не дають повної уяви щодо впливу гармонік при їх зближенні за частотою на точність вимірювання різниці фаз.

**Метою роботи** є оцінювання впливу дестабілізуючих факторів (власні шуми в приймальному каналі та вплив зближення гармонік за частотою) на точність вимірювання різниці фаз гармонік методом ДПФ.

**Виклад основного матеріалу**

Для отримання оцінок впливу дестабілізуючих факторів на точність вимірювання різниці фаз гармонік застосовується метод імітаційного моделювання.

При моделюванні процесу вимірювання різниці фаз імітувались два сигнали. Кожний з них є адитивною сумішню кількох гармонічних сигналів та гаусівського шуму. Математичні моделі таких сигналів мають вигляд:

$$\dot{S}_1(t) = \sum_{k=1}^K A_k e^{j(\omega_k t + \varphi_{1k})} + \dot{N}_{n1}(t); \quad (1)$$

$$\dot{S}_2(t) = \sum_{k=1}^K A_k e^{j(\omega_k t + \varphi_{2k})} + \dot{N}_{n2}(t), \quad (2)$$

де  $K$  – кількість комплексних гармонік в сигналі;

$A_k$ ,  $\omega_k$  – амплітуди і кругові частоти гармонік, які вважаються однаковими в обох сигналах;

$\varphi_{1k}$ ,  $\varphi_{2k}$  – початкові фази гармонік першого та другого сигналів;

$\dot{N}_n(t)$  – гаусівський шум, дійсна та уявна частини якого розподілені за нормальним законом  $N(0, \sigma)$ .

Частоти гармонічних сигналів задавались у відносних одиницях, як частка частоти дискретизації  $Fd$ . За час спостереження отримувались по 64 відліки сигналів.

Дискретне перетворення Фур'є виконувалось із застосуванням трьох типів віконних фун-

кцій: прямокутної; Хеммінга та Ханна. Дискретність відліків частоти в спектрах сигналів підвищувалась до 256 за рахунок доповнення вхідних послідовностей нулями.

Для отримання залежності середньоквадратичного відхилення (СКВ) результатів вимірювань різниці фаз двох синусоїд від відношення сигнал-шум (С/Ш) застосовувались прямокутне вікно та вікно Хеммінга. Відношення сигнал-шум визначалось як відношення амплітуди гармонічного сигналу до значення СКВ відліків шуму  $\sigma$ . З урахуванням того, що  $\sigma \in$  СКВ дійсної або уявної частини гаусівського шуму в сигналах (1) і (2), дисперсія шумів складатиме  $2\sigma^2$ . При частоті синусоїди  $0,2Fd$  за час спостереження спостерігається 12,6 її періодів. Оцінки СКВ результатів вимірювань представлені на рис. 1. Як видно з графіків, порівняно з обробкою сигналів з прямокутним вікном (рис. 1, а) при застосуванні вікна Хеммінга вплив власних шумів вимірювального каналу веде до зростання похибок вимірювання в середньому приблизно на 50 %. (рис. 1, б), що дещо менше, ніж в [9] для випадку дискретизації 10,5 періодів синусоїди.

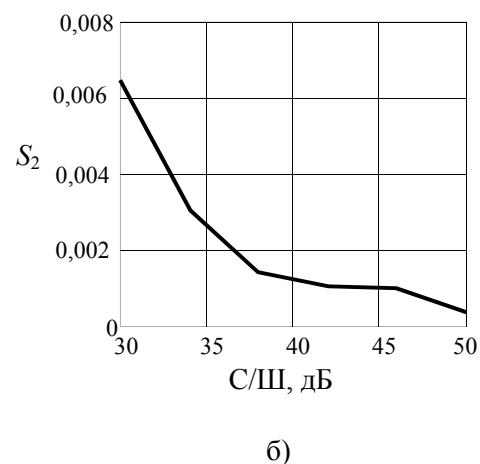
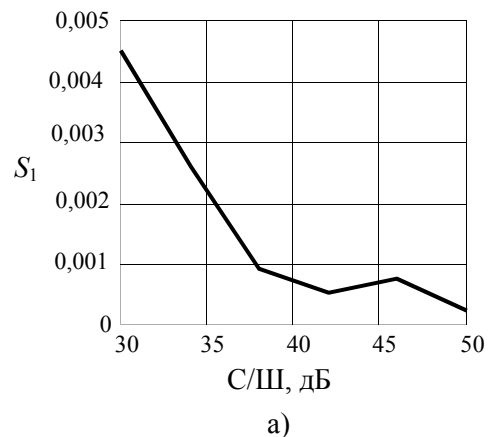


Рисунок 1 – Залежність СКВ різниці фаз двох гармонік від відношення сигнал-шум: а) прямокутне вікно; б) вікно Хеммінга

Для оцінки можливого впливу ефекту просочування при ДПФ на результат вимірювання різниці фаз було проведено моделювання процесу вимірювання різниці фаз для суми двох гармонік, тобто  $K=2$  в (1) і в (2). Амплітуди гармонік задавались однаковими. Частота першої гармоніки складала  $0,2Fd$ , а другої змінювалась з кроком  $0,0025$  від  $0,24Fd$  до  $0,2125$ , коли гармоніки вже не розділялись в спектрі. Початкові фази задавались для першої гармоніки відповідно  $0$  та  $\pi/7$  та для другої  $0$  та  $2\pi/7$  відповідно. Імітаційне моделювання десяти послідовних вимірювань виконувалось при відношенні сигнал-шум  $48$  дБ з використанням прямокутного вікна, при застосуванні вікна Хеммінга, з використанням вікна Ханна. Математичні сподівання отриманих результатів вимірювань наведено на рис. 2.

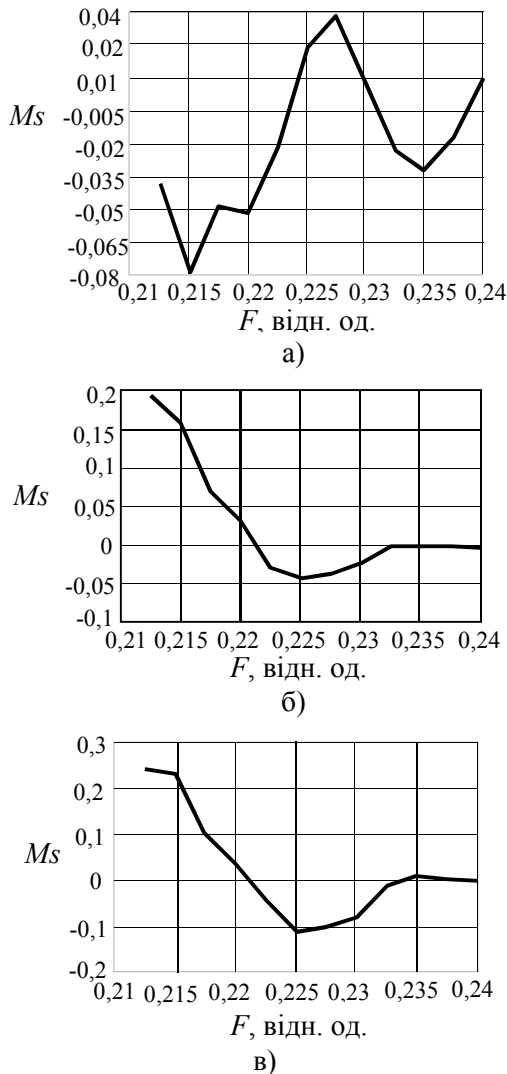


Рисунок 2 – Математичне сподівання  $M_s$  відхилення різниці фаз гармонік на частоті  $0,2$  від зсуву по частоті відносно неї другої гармоніки в двох спектрах ( $M_s=0$  при заданому зсуві фаз гармонік  $\pi/7$ ): а) прямокутне вікно; б) вікно Хеммінга; в) вікно Ханна

При зближенні частот гармонік спостерігається відхилення вимірної різниці фаз від очікуваного її значення  $\pi/7$  (на графіку йому відповідає рівень 0). Виходячи з отриманих результатів моделювання, при різниці частот меншій за  $0,02 Fd$  мають місце суттєві систематичні похибки вимірювань різниці фаз. Це може привести до незадовільного рішення вимірювальної задачі.

Для більш детальної оцінки очікуваних похибок вимірювань різниці фаз були обчислені СКВ вимірювань різниці фаз двох гармонік у порівнянні з її відомим значенням та при її обчисленні для трьох розглянутих вище випадків. Результати імітаційного моделювання на рис. 3, 4, 5 для трьох видів вікон ілюструють СКВ результатів вимірювань, які подані на рис. 2, а-в. На рисунках 3, 4, 5 (а) представлені графіки, які показують СКВ результатів вимірювань по відношенню до відомого значення різниці фаз  $\pi/7$ . Графіки на рис. 3, 4, 5 (б) ілюструють відхилення результатів вимірювань відносно їх математичних сподівань (рис. 2, а-в).

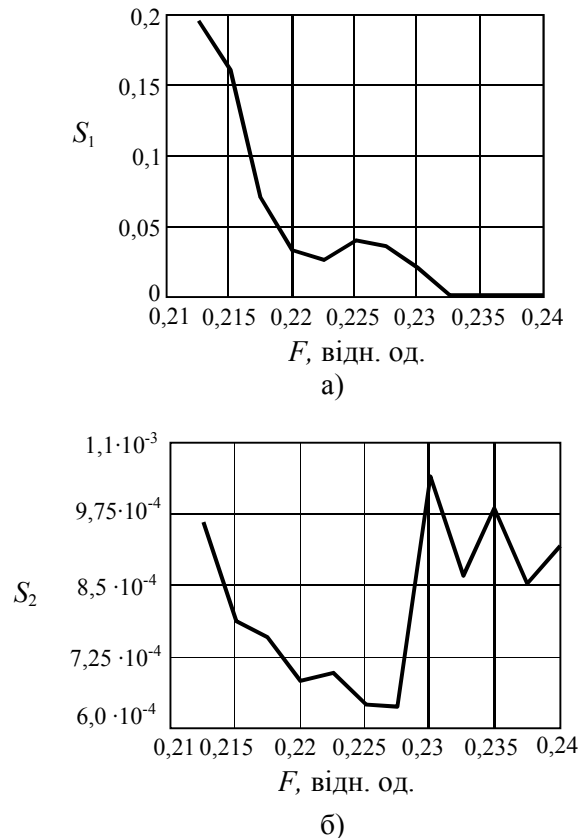


Рисунок 3 – Середньоквадратичне відхилення різниці фаз гармонік на частоті  $0,2$  від зсуву по частоті відносно неї другої гармоніки в двох спектрах з використанням вікна Хеммінга: а) відносно відомої різниці фаз  $\pi/7$ ; б) відносно незміщеної статистичної оцінки математичного сподівання різниці фаз по 10 вимірюванням

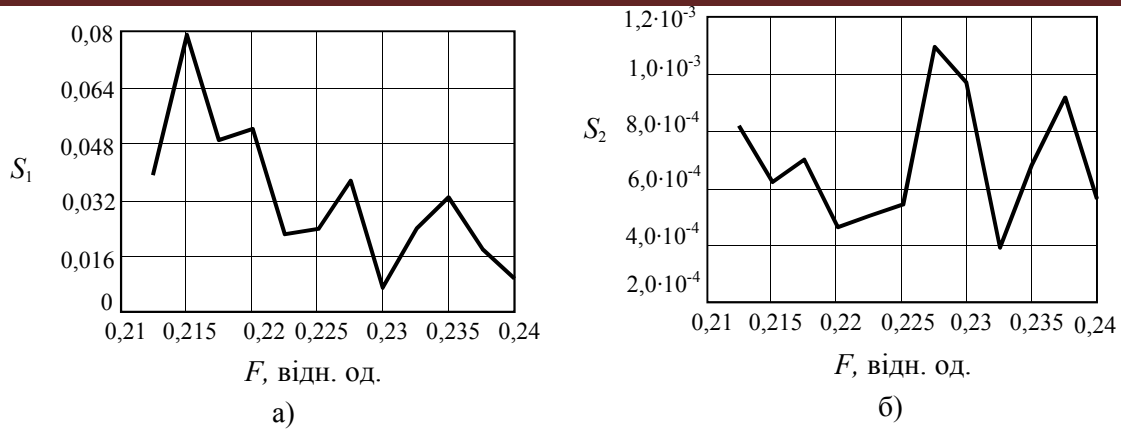


Рисунок 4 – Середньоквадратичне відхилення різниці фаз гармонік на частоті 0,2 від зсуву по частоті відносно неї другої гармоніки в двох спектрах з використанням прямокутного вікна: а) відносно відомої різниці фаз  $\pi/7$ ; б) відносно незміщеної статистичної оцінки математичного сподівання різниці фаз по 10 вимірюванням

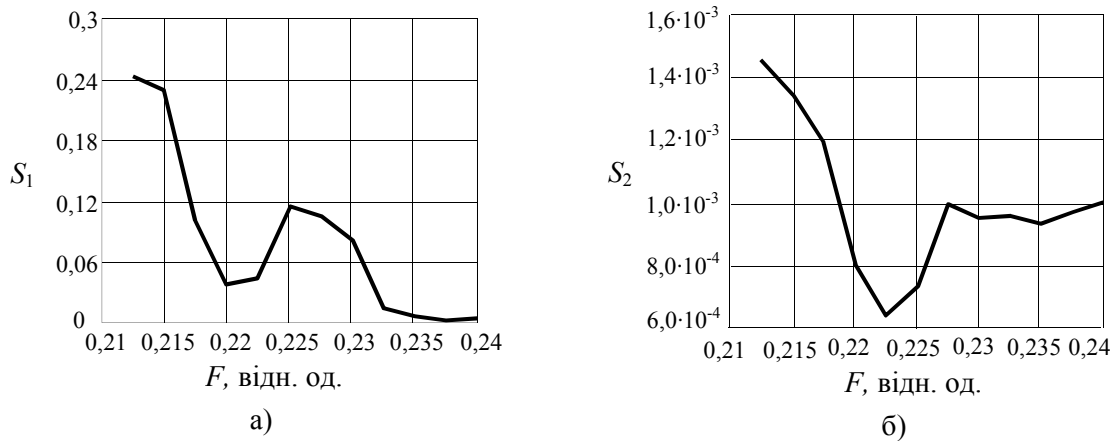


Рисунок 5 – Середньоквадратичне відхилення різниці фаз гармонік на частоті 0,2 від зсуву по частоті відносно неї другої гармоніки в двох спектрах з використанням вікна Ханна: а) відносно відомої різниці фаз  $\pi/7$ ; б) відносно незміщеної статистичної оцінки математичного сподівання різниці фаз по 10 вимірюванням

**Висновки**

Отримані за результатами імітаційного моделювання залежності дозволяють оцінити вплив дестабілізуючих факторів (власних шумів приймача або шумових завад, близькість частот гармонічних сигналів) на точність вимірювання різниці фаз гармонік методом ДПФ.

Зближення частот менше, ніж на 0,04 від частоти дискретизації, веде до суттєвого зростання систематичної похибки вимірювання різниці фаз гармонік за методом ДПФ.

Суттєва чутливість фазового методу вимірювань до вказаних факторів вимагає подальшого пошуку більш стійких до дестабілізуючих факторів методів вимірювань або ж попередньої обробки сигналу з метою зниження впливу таких факторів.

**Список використаних джерел**

1. Soumekh M. ‘Automatic Aircraft Landing Using Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging’, IEEE Trans. Image Process., September 1996, 5, (9), pp. 1335 – 1345.
2. Xiaojian Xu, Ram M. Narayanan, ‘Three-Dimensional Interferometric ISAR Imaging for Target Scattering Diagnosis and Modeling’, IEEE Trans. on Image Process., July 2001, 10, (7), pp. 1094 – 1011.
3. C. L. Liu, X. Z. Gao, W. D. Jiang, X. Li. ‘Interferometric ISAR Three-dimensional Imaging using one Antenna’, Progress In Electromagnetics Research M., 2011, 21, pp. 33 – 45.
4. Смаглюк Г. Г. Моделювання відновлення тривимірних радіозображень в радіолокаційних системах з інверсним синтезуванням апертури / Г. Г. Смаглюк, Д. В. Григор’єв, А. І. Плотник,

Г. В. Грабовський // Матеріали Восьмої Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів (Одеса, 18-19 травня 2017 р.), 2017. – С. 139 – 141.

5. D. Felguera-Martín, J.-T. González-Partida, P. Almorox-González, M. Burgos-García, B.-P. Dorta-Naranjo, 'Interferometric inverse synthetic aperture radar experiment using an interferometric linear frequency modulated continuous wave millimetre-wave radar', IET Radar, Sonar & Navigation, Volume 5, Issue 1, January 2011, p. 39 – 47.

6. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Москва: Мир, 1990 г. – 265 с.

7. Мясникова М. Г. Измерение параметров электрических сигналов на основе метода Прони: диссертация кандидата технических наук: 05.11.01 / М. Г. Мясникова; [Место защиты: Пенз. гос. ун-т]. – Пенза, 2007. – 184 с.

8. Micheletti, R.: 'Phase Angle Measurement Between Two Sinusoidal Signals', IEEE Trans. In-

strum. Meas., vol. 40, no. 1, February 1991. – pp. 6 – 9.

9. Sedlacek M., Krumpholtz M. 'Digital Measurement of Phase Difference – a Comparative Study of DSP Algorithms', Metrology and Measurement Systems, 12(4), 2005. – p. 427 – 449.

10. Krumpholtz M., Sedlacek M. 'Measurement of Phase Difference Using DSP Algorithms by NonCoherent Sampling', 14th IMEKO Symposium on New Technologies in Measurement and Instrumentation, Gdynia, Poland, Sept. 2005. – pp. 229 – 235.

*Надійшла до редакції 12.06.2017 р.*

**Рецензент:** д.т.н., доцент Банзак О. В., Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса

**Г. Д. Братченко, д.т.н., Д. В. Григорьев, Г. Г. Смаглиук**

#### **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ ФАЗ СООТВЕТСТВУЮЩИХ ГАРМОНИК В ДВУХ СИГНАЛАХ**

*Методом имитационного моделирования оценивается влияние дестабилизирующих факторов на точность измерения разности фаз гармоник в спектрах двух сигналов, которые являются аддитивной смесью нескольких гармонических сигналов и гауссовских шумов, с использованием метода дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Как дестабилизирующие факторы рассматриваются собственные шумы в приемном канале и влияние сближения гармоник по частоте. Оценки влияния этих факторов выполняются для случаев применения прямоугольного окна и окон Хемминга или Ханна.*

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, измерение разности фаз, дискретное преобразование Фурье (ДПФ), дестабилизирующие факторы.

**H. D. Bratchenko, DSc, D. V. Grygoryev, H. H. Smahliuk**

#### **INFLUENCE ASSESSMENT OF DESTABILIZING FACTORS ON THE PHASE DIFFERENCE MEASUREMENT ACCURACY OF RELEVANT HARMONICS IN TWO SIGNALS**

*By the simulation method the influence of destabilizing factors on the phase difference measurement accuracy of harmonics in the spectrum of two signals which are an additive mix of several harmonic signals and Gaussian noise is estimated using the discrete Fourier transform (DFT) technique. As destabilizing factors are considered the internal noises in the receiving channel and the influence of harmonics frequency convergence. Assessments of these factors influence are performed for cases of using a rectangular window and Hamming's or Hannah's windows*

**Keywords:** simulation, phase difference measurement, discrete Fourier transform (DFT), destabilizing factors.