

Математические модели трехфазных асинхронных двигателей, включаемых в однофазную сеть / Ю. А. Мощинский А. П. Петров // *Электричество*. – 2000. – № 2. – С. 40–95. 6. Петров А. П. Исследование асинхронных конденсаторных двигателей с трехфазными обмотками: дис... канд техн. наук: спец. 05.09.01 “Электромеханика и электрические аппараты” / А. П. Петров. – М.: МЭИ, 1999. – 179 с. 7. Торопцев Н. Д. Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором / Н. Д. Торопцев. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 128 с. 8. Фильц Р. В. Алгоритм расчета переходных процессов в асинхронной машине с учетом насыщения и вытеснения тока / Р. В. Фильц, Е. А. Онышко, Е. Г. Плахтына. Преобразователи частоты для электропривода. – Кишинев: Штиинца, 1979. – С. 11–22. 9. Фильц Р. В. Математические основы теории электромеханических преобразователей / Р. В. Фильц. – К.: Наук. думка, 1979. – 208 с. 10. Шуруб Ю. В. Математическая модель асинхронного конденсаторного двигателя с тиристорным управлением / Ю. В. Шуруб // *Технічна електродинаміка*. – 1999. – № 4. – С. 52–56.

УДК 681.586 – 45.29.33

В. Мороз, В. Оксентюк, П. Болкот, К. Снітков
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електроприводу і комп’ютеризованих електромеханічних систем,
СКБ електромеханічних систем

ВПЛИВ РОЗРЯДНОСТІ ДАНИХ НА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ КУТА В ІНДУКЦІЙНИХ ДАВАЧАХ КУТА

© Мороз В., Оксентюк В., Болкот П., Снітков К., 2016

Проаналізовано точність методу визначення фази з індукційного давача кута повороту залежно від розрядності вхідних цифрових даних, які отримані з давача за допомогою аналого-цифрового перетворювача. Метод визначення фази ґрунтується на відомому методі з використанням функцій арктангенса і арккотангенса, для яких знайдено максимальні та усереднені похибки залежно від розрядності вхідних цифрових даних. Досліджено впливи розрядності вхідних цифрових даних і кількість інтервалів інтегрування на точність інтегральних реалізацій функції арктангенса числовими методами знаходження означеного інтегралу різних порядків.

Ключові слова: давачі кута повороту, індукційні давачі, математична обробка даних, методи визначення фази, обробка сигналів, реалізація функцій обчислення арктангенса.

The accuracy analysis method for determining the signal phase of the induction encoder depending on the digit capacity of the input data obtained from the sensor via analog-to-digital converter presented in this article. The phase determining method based on a known method using the invers tangent and invers cotangent functions, which found the maximum and RMS errors depending on the digit capacity of the input data. The impact of input data's digit capacity and the number of intervals on the accuracy of the invers tangent function integrated implementations was investigate for numerical definite integral formulas of different orders.

Key words: angle sensors, arctangent function calculation, induction sensors, mathematical data processing, phase detection method, signal processing.

Постановка проблеми

Незважаючи на поширене застосування оптичних еncoderів у системах позиціонування, індукційні електромеханічні перетворювачі до цього часу є одним з популярних елементів позиційних систем керування. Це пояснюється перевагами останніх у зв'язку з доволі простою конструкцією,

яка може бути суміщена з основною виконавчою електричною машиною, невибагливістю до зовнішніх умов, що дає змогу їх використовувати у важких умовах експлуатації, та невисокою вартістю порівняно з оптичними давачами. Проте підвищення точності індукційних давачів можливе лише за допомогою застосування математичних методів обробки їх сигналів, оскільки резерв підвищення точності механічного виготовлення практично вичерпано, а пряме вимірювання фази сигналу індукційного давача кута ускладнюється суто технічними причинами. По-перше, як показали проведені в СКБ ЕМС Національного університету “Львівська політехніка” експериментальні дослідження, рівень шумів та завад з обмоток індукційного давача порівняно з корисним сигналом може становити 2–5 % (інколи навіть більше за наявності поблизу давача силової частини електроприводу). Це відчутно знижує точність ідентифікації переходу сигналу з обмотки давача через нуль і, отже, його фази внаслідок явища “розмивання” власне моменту переходу через нуль, що може становити (за несприятливих умов) навіть 5–10 кут. град. По-друге, для доволі типової частоти збудження індукційного давача 1 кГц і заданої (на теперішній час не дуже великої) точності 10 кут. секунд швидкість реакції системи у разі безпосереднього визначення фази сигналу схематичними методами не повинна перевищувати 5 нс, що технічно складно реалізувати застосуванням навіть сучасної електронної бази.

Завдання підвищення точності визначення кута з індукційних давачів можна виконати переходом до цифрових систем вимірювання, тому що іншого способу підвищення точності кутівимірювальних систем, як використання математичних методів обробки сигналів індукційного давача кута, сьогодні немає.

Аналіз останніх досліджень

У сучасних індукційних давачах кута (резольвери – *resolvers*) широко використовують схеми “оцифрування” вихідного сигналу і застосовують цифрові методи визначення кута повороту (наприклад, [1]). Принципи побудови цифрових кутівимірювальних систем і математичне підґрунтя цифрових методів обробки сигналів, що використовують у науково-дослідних роботах СКБ ЕМС Національного університету “Львівська політехніка”, викладені у статтях [2–4]. Подібні рішення, але без додаткової обробки інформації з давача, викладено у патентах, наприклад [5], і статтях [6, 7]. Провідні виробники електроніки також пропонують готові рішення, які ґрунтуються на згаданих принципах і реалізують вихідний сигнал кута повороту в цифровому вигляді після нескладної обробки ортогональних складових аналогового сигналу резольвера, наприклад, Analog Devices [8, 9], Texas Instruments [10], Freescale Semiconductor [11].

Показано [4, 12], що оптимальним щодо точності способом визначення кута за ортогональними сигналами з індукційного давача є застосування комбінованого методу з використанням функції арктангенса (арккотангенса).

На першому етапі досліджень пропонується проаналізувати вплив квантування за рівнем (“оцифрування”) сигналу з індукційного давача на точність визначення кута традиційним методом [2–12], а також впливу розрядності квантованих даних на точність роботи алгоритму визначення функції арктангенса [4, 12]. Потрібно відзначити, що традиційне використання обернених тригонометричних функцій для визначення фази передбачає і виконання арифметичних операцій з нескінченною точністю (що є традиційним підходом у математиці), і відповідну точність вхідних даних. Поява ефекту квантування за рівнем у вихідних даних зумовлює відповідні похибки в результатах виконання обернених тригонометричних функцій. Тому розрядність аналого-цифрового перетворювача (АЦП) є важливим чинником, від якого залежать додаткові похибки в системі та її вартість загалом – зі зростанням розрядності ціна АЦП відчутно зростає, проте знижується похибка квантування, яку можна описати як внесення додаткового шуму. Використання для кутівимірювальних систем і типових промислових 16-розрядних АЦП, і дешевших 12- і 10-розрядних, вимагає додаткового аналізування появи похибок визначення кута.

Задача досліджень

Задачею досліджень є підвищення точності визначення кута з використанням індукційних давачів, що можна поділити на два етапи:

- проаналізувати вплив на точність визначення фази для випадку типової (10, 12 і 16 бітів) розрядності квантування за рівнем ("оцифрованих" за допомогою аналого-цифрового перетворювача) сигналів з індукційного давача кута;
- проаналізувати вплив розрядності цифрових даних у випадку застосування 10-, 12- і 16-бітних аналого-цифрових перетворювачів і способу реалізації функції арктангенса на точність визначення кута.

Виклад основного матеріалу

Робота цифрової системи обробки даних полягає у фільтрації одержаного з обмоток індукційного давача (перетворювача) сигналу для усунення зовнішніх завад і похибок квантування [2–4] (розгляд цієї проблеми виходить за межі статті). Наступним етапом є визначення зсуву фази сигналу давача відносно опорного за отриманими ортогональними складовими (сигнали з обмоток давача) вимірюного та відфільтрованого сигналу (алгоритм роботи і структурна схема такої системи розглянуті, наприклад, у [2–4]). Знайдені ортогональні складові сигналу давача використовують для алгоритму знаходження кута ([2–4, 6–11]).

Поява широкодоступних персональних комп'ютерів і математичних застосунків до них (Mathcad, MATLAB тощо) дає змогу з використанням числових процедур спростити перевірку технічних рішень і здебільшого уникнути тривалого і складного аналітичного математичного аналізу. Тому на цьому етапі основним інструментом досліджень є числовий експеримент.

Процедура визначення кута повороту ϕ за ортогональними складовими a і b , як вже відзначено вище [4, 12], передбачає застосування комбінованого алгоритму з використанням обернених тригонометричних функцій \arctg і arcctg :

$$\text{якщо } |a| > |b|, \text{ то } \phi = \arctg\left(\frac{b}{a}\right), \text{ інакше } \phi = \text{arcctg}\left(\frac{a}{b}\right).$$

Усереднені похибки визначення кута за цим алгоритмом для 10-, 12- і 16-розрядного квантування сигналу наведено на полярних графіках рис. 1 у кутових мінутах (секундах).

На графіках прийнято позначення: N_{ADC} – розрядність АЦП. Значення ж максимальних кутових похибок (у кутових мінутах і секундах), а також точності вимірювань у двійкових розрядах (для оцінки апаратних засобів обробки сигналу з давача) для різних розрядностей квантування за допомогою АЦП зведено в табл. 1.

Таблиця 1

Значення максимальної похибки визначення кута (у кутових мінутах/секундах) і точності вимірювань (у двійкових розрядах) залежно від розрядності даних для алгоритму [4, 12]

Розрядність АЦП (N_{ADC})	8	10	12	14	16	18	20	24
Максимальна похибка (кут. мін/с)	13.0'	3.31'	48.3"	12.2"	3.0"	0.76"	0.19"	0.012"
Точність вимірювань (у дв. розрядах)	10	12	14	16	18	20	22	26

Спосіб обчислення функції арктангенса, який забезпечує не менш точний результат порівняно з відомими (наприклад, [7]), ґрунтується на класичній інтегральній залежності $\arctan(x) = \int_0^x \frac{1}{t^2 + 1} dt$

[4, 12]. Для знаходження цього означеного інтеграла використовується числове інтегрування за допомогою розбиття на M елементарних фігур, площі яких знаходять за допомогою апроксимації відповідного порядку. Аналіз точності такого методу залежно від розрядності даних здійснено для п'ятиох способів апроксимації елементарної площі S_i (де $i = 1 \dots M$) для знаходження інтегралу:

- трапеціями: $S_i = \frac{h}{2} \cdot (y_i + y_{i+1})$ (порядок апроксимації – другий);

- $S_i = \frac{h}{12} \cdot (5y_{i+1} + 8y_i + y_{i-1})$ – за неявною формулою Адамса третього порядку;
- $S_i = \frac{h}{24} \cdot (9y_{i+1} + 19y_i - 5y_{i-1} + y_{i-2})$ – за неявною формулою Адамса четвертого порядку;
- $S_i = \frac{h}{24} \cdot (-y_{i+2} + 13y_{i+1} + 13y_i - y_{i-1})$ – за формулою інтегрування четвертого порядку, що

виведена з класичної залежності $S_i = \int_{x_i}^{x_{i+1}} (a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0) dx$, де $a_0 \dots a_3$ –

коефіцієнти поліноміальної апроксимації:

$$a_0 = y_{i+1}; a_1 = (2y_{i+2} + 3y_{i+1} - 6y_i + y_{i-1})/6h;$$

$$a_2 = (y_{i+2} - 2y_{i+1} + y_i)/2h^2; a_3 = (y_{i+2} - 3y_{i+1} + 3y_i - y_{i-1})/6h^3;$$

- $S_i = \frac{h}{720} \cdot (251y_{i+1} + 646y_i - 264y_{i-1} + 106y_{i-2} - 19y_{i-3})$ – за неявною формулою Адамса п'ятого порядку.

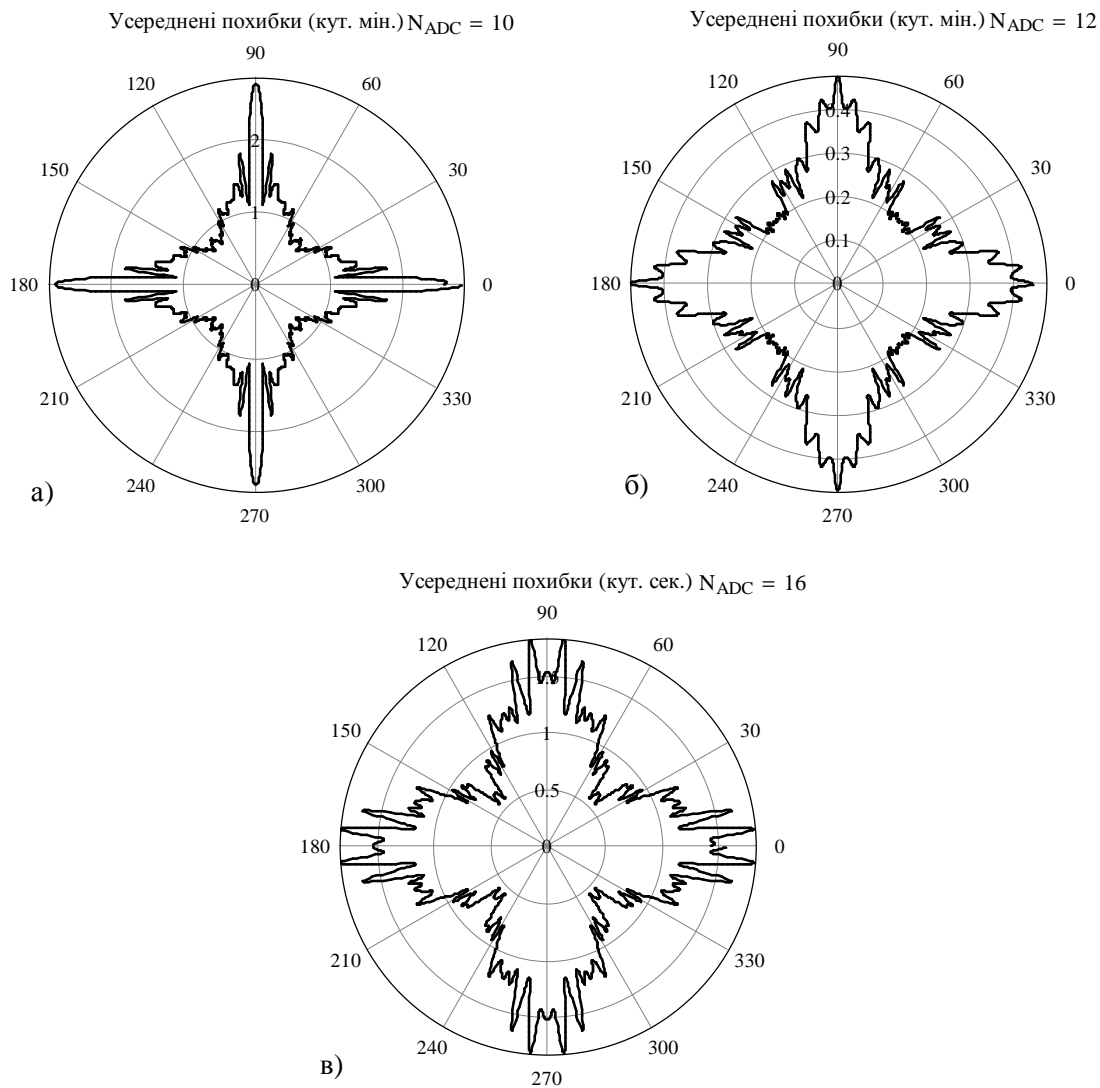


Рис. 1. Усреднені похибки алгоритму визначення фази:
 а – для 10-розрядного квантування сигналу (кут. мін.);
 б – для 12-розрядного квантування сигналу
 (кут. мін.); в – для 16-розрядного квантування сигналу (кут. с)

Експериментальні дослідження.

За допомогою постановки числових експериментів математичними застосунками (одним з найзручніших варіантів є використання математичної програми Mathcad) досліджено вплив розрядності даних апаратної частини давача кута на точність визначення кута за допомогою згаданих вище інтегральних реалізацій функції арктангенса. Приклад отриманих результатів дослідження точності відтворення функції арктангенса інтегральними залежностями в діапазоні кута повороту від 0 до $\pi/4$ (таке обмеження на кут взумовлене тим, що розподіл похибок є симетричним відносно осей координат) для 10-розрядного квантування сигналу та числа інтервалів розбиття діапазону повороту $M = 10$, що відповідає кроку інтегрування $\pi/40$, показано на рис. 2 (максимальні значення еквівалентної точності подано в двійкових розрядах). Закономірним результатом аналізу отриманого графіка є підтвердження того, що підвищення точності досягається при переході до формул інтегрування третього і вище порядків.

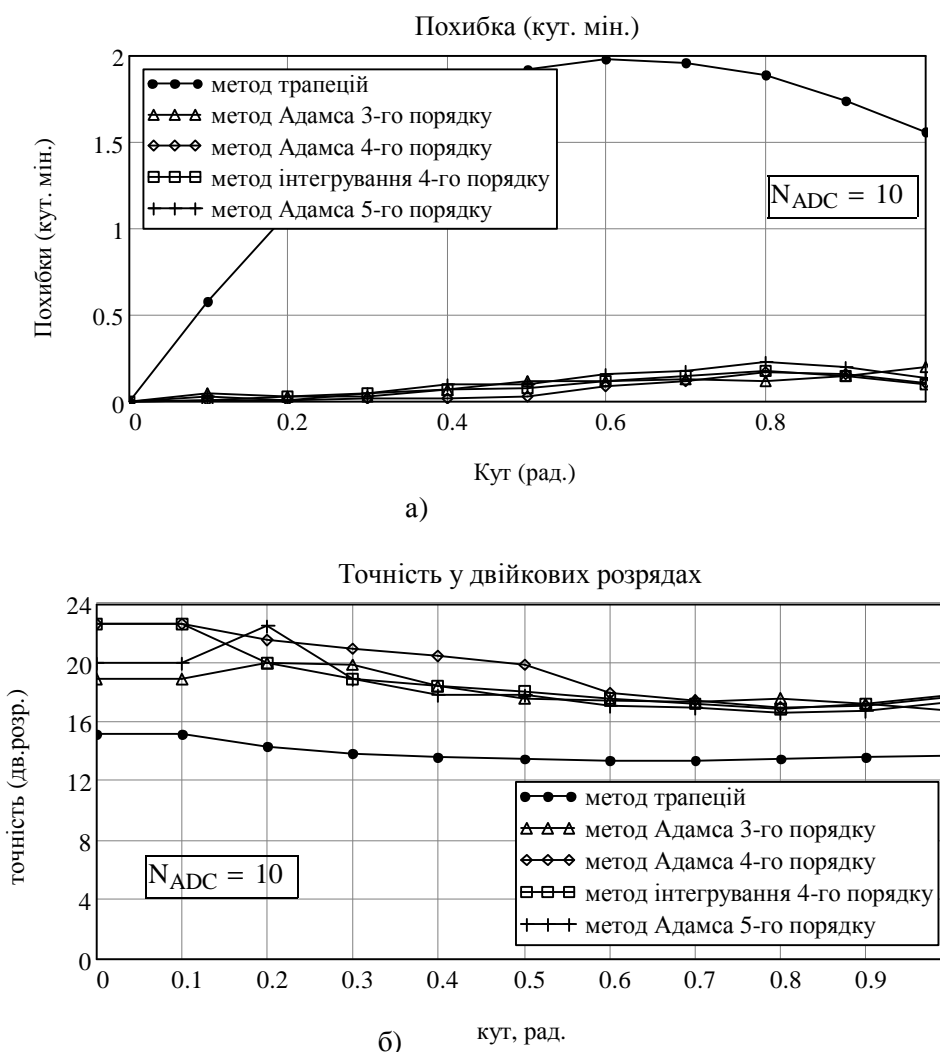


Рис. 2. Еквівалентна точність визначення фази (у кут. мін. і двійкових розрядах) для різних інтегральних реалізацій функції арктангенса залежно від кута повороту давача у випадку 10-розрядної точності цифрових даних: а – похибка у кутових мінутах; б – точність у двійкових розрядах

Узагальнені результати зведені на тривимірних графіках рис. 3, які побудовано для 10-, 12- і 16-розрядного квантування сигналу та кількості відліків від 6 до 64 на інтервалі інтегрування $0 \dots \pi/4$, де вжито позначення для методів інтегрування:

- трапецій (номер методу на графіках – 0);
- неявного Адамса третього порядку (номер методу на графіках – 1);

- неявного Адамса четвертого порядку (номер методу на графіках – 2);
- інтегрування четвертого порядку (номер методу на графіках – 3);
- неявного Адамса п'ятого порядку (номер методу на графіках – 4).

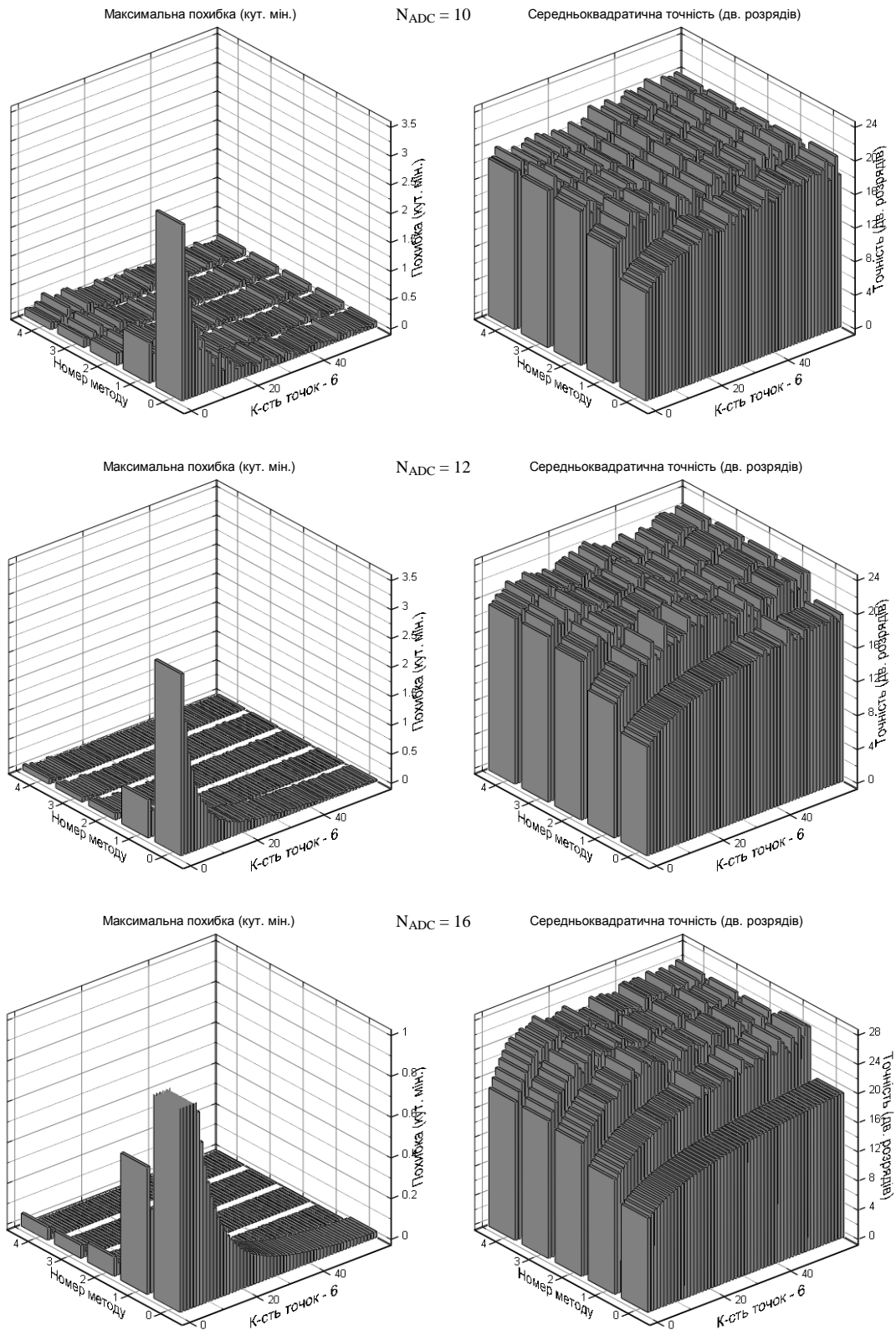


Рис. 3. Максимальна похибка (кут. мін.) і середньоквадратична точність (двійкових розрядів) для різних апроксимацій функції арктангенса залежно від кількості відліків (від 6 до 64) для випадку 10-, 12- і 16-розрядного квантування сигналу ($N_{ADC} = 10; 12; 16$)

Для підтвердження ефективності реалізованого математичного апарата в цифровій частині вимірювальної системи було проведено експериментальні дослідження в лабораторії НДЛ-68 СКБ ЕМС Львівської політехніки. Експерименти проводили з дослідним взірцем високоточного індукційного давача кута з цифровою обробкою 16-бітного сигналу з обмоток давача і заданою кутковою розділовою здатністю не гірше ніж 2". Під час досліджень було відзначено істотний вплив на величину вимірюваного кута (до 10"–15") зовнішніх механічних чинників (кількість і розташування болтів кріплення, зусилля їх закручування, наявність вібрацій від транзитного транспорту тощо). Це є підтвердженням того, що практично досягнуто межі точності для індукційних давачів кута з умов виготовлення, механічних і зовнішніх чинників. У той же час застосування математичного апарата забезпечило на порядок вищу точність вимірювань порівняно із заданою завдяки цифровій обробці сигналу з давача (див. табл. 1).

Аналіз наведених на рис. 3 узагальнених даних дає змогу виявити такий цікавий факт, як вищу точність визначення кута повороту інтегральними формулами для функції арктангенса, порівняно з точністю (розрядністю) даних ("оцифрованих" сигналів) з індукційного давача кута. Це явище виникає внаслідок того, що числовий інтегратор є цифровим низькочастотним фільтром, а похибки квантування можна розглядати як внесення в сигнал випадкового високочастотного шуму.

Цікавим також є те, що для забезпечення високої точності застосованого методу для визначення кута числовими методами третього і вищих порядків достатньо порівняно невеликого числа інтервалів інтегрування (10)–(20), після чого збільшення числа інтервалів інтегрування ефекту підвищення точності не надає.

Висновки

Результати проведених досліджень показали, що використання математичних методів обробки інформації дає змогу зменшити вплив обмеженої розрядності даних на похибку визначення кута з індукційних давачів та отримати результати з вищою точністю, ніж точність вихідних даних. Для зменшення впливу обмеженої розрядності на точність визначення кута необхідно:

- використовувати функцію арктангенса (арккотангенса) для визначення фази сигналів з обмоток індукційного давача, які мають обмежену розрядність;
- використовувати для отримання значення функції арктангенса інтегральні залежності третього і вищих порядків.

Виявлено, що використання формул інтегрування третього і вищих порядків для знаходження функції арктангенса дає змогу зменшити кількість відліків до 10–20 із збереженням необхідної точності визначення фази сигналу з індукційного давача у разі обмеженої розрядності даних.

1. *Blade360. Rotary Position Sensor [Electronic resource] / 360° Rotary Non-Contact Position Sensor. Gill Sensors. Saltmarsh Park, 67 Gosport Street, Lymington, Hampshire. SO41 9EG, UK. – 2013. – [Access mode]: <http://gillsc.com/content/datasheets/Rotary.pdf>.* 2. *Завгородній В. Д. Квантово-механічна модель давачів кута індукційного типу (Частина 3. Аналіз впливу технологічних похибок) / В. Д. Завгородній // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – № 3. – С. 26–31.* 3. *Завгородній В. Д. Квантово-механічна модель давачів кута індукційного типу (Ч. 4; Аналіз методів обробки вихідних сигналів) / В. Д. Завгородній, В. І. Мороз, О. А. Петрова // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – № 4. – С. 36–41.* 4. *Завгородній В. Квантово-механічна модель давачів кута індукційного типу (Частина 5. Аналіз алгоритмів обробки вихідних сигналів) / В. Завгородній, В. Мороз, А. Бойко // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – № 4. – С. 27–33.* 5. *Patent US 6754610 B2. Digital signal processing of resolver rotor angle signals / Donald R. Dudler, C. Mike Warner. – Date of Patent: Jun. 22, 2004. Prior Publication Data: May 16, 2001. – Assignee: Raytheon Company, Waltham, MA, USA.* 6. *Hou, C.-C. DSP-based resolver-to-digital conversion system designed in time domain / Hou, C.-C. [Dept. of Electr. Eng., Chung Hua Univ., Hsinchu, Taiwan]; Chiang, Y.-H.; Lo, C.-P. // Power Electronics, IET. – Vol. 7, Issue 9, September 2014. – P. 2227–2232.* 7. *Ануфрієв В. Методы обработки сигналов индуктивных датчиков линейных и угловых перемещений / В. Ануфрієв, А. Лужбинин, С. Шумилин // Современная электроника. – № 4. – 2014. – С. 31–33.* 8. *Szymczak J. Precision Resolver-to-Digital Converter Measures Angular Position and Velocity [Electronic resource] / Jakub*

Szymczak, Shane O'Meara, Johnny S. Gealon, Christopher Nelson De La Rama // *Analog Dialogue* 48-03, March (2014). – [Режим доступу до ресурсу]: <http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/48-03/resolver.html>. 9. Kester W. *Resolver-to-Digital Converters* [Electronic resource]. MT-030 Tutorial. Rev.A, 10/08, WK / Walt Kester // *Analog Devices*, February (2009). – [Режим доступу до ресурсу]: <http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-030.pdf>. 10. Staebler M. *TMS320F240 DSP Solution for Obtaining Resolver Angular Position and Speed* [Electronic resource]. DSP Field Application / Martin Staebler // *Texas Instruments Incorporated. Application Report SPRA605 – February 2000*. – [Режим доступу до ресурсу]: <http://www.ti.com/lit/an/spra605/spra605.pdf>. 11. Mienkina M. *56F80x Resolver Driver and Hardware Interface* [Electronic resource]. / Martin Mienkina, Pavel Pekarek, Frantisek Dobes // *Freescale Semiconductor. Application Note AN1942. Rev. 1, 08/2005*. – [Режим доступу до ресурсу]: <http://cache.freescale.com/files/product/doc/AN1942.pdf>. 12. Мороз В. Аналіз реалізації визначення кута при обробці сигналів з індукційних давачів кута / В. Мороз, І. Снітков, Д. Довгань, П. Болкот // *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки: зб. наук. пр.* – Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільськ. нац. ун-т, 2014. – Вип. 10. – С. 112–118. – *Бібліогр.: 3 назв.* – укр.

УДК 621.311.24 + 621.314

К. Б. Покровський, М. Ю. Кужелєв

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електричних станцій

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА ОСНОВІ ДАНИХ З ВІДКРИТИХ ДЖЕРЕЛ

© Покровський К. Б., Кужелєв М. Ю., 2016

Наведено оцінку ефективності вітроелектростанції в умовах Карпатського регіону на основі даних з відкритих джерел та розрахунки техніко-економічних показників електростанції.

Ключові слова: вітроелектростанція, ефективність.

There are represented assessment of efficiency of wind farms in the Carpathian region based on data from public sources and showing technic and economic indicators of power station.

Key words: wind power station, efficiency.

Постановка проблеми

Незворотний процес розвитку енергетики на фоні зростання екологічних вимог до технологічних процесів сприяє щораз ширшому застосуванню альтернативних технологій виробництва електроенергії, які набувають все більшої популярності у світі. Використання енергії вітру для електроенергетики стає однією з найефективніших «зелених» технологій у світі. Вітроенергетика на основі використання потужних вітроелектростанцій (ВЕС) в Україні зменшує споживання первинних енергоресурсів та залежність від їх імпорту, сприяє технологічному розвитку, скорочує кількість викидів CO₂ в атмосферу.

У багатьох країнах світу інтенсивно збільшується власний потенціал вітроенергетики – встановлена потужність ВЕС разом із збільшенням частки у загальному виробітку електроенергії [1]. Станом на 2015 рік США планують збільшення інвестицій у вітроенергетику до 7,4 млрд. \$,