

ОСОБЛИВОСТІ ДИНАМІЧНИЙ ВИМІРЮВАНЬ КОВЗАННЯ АСИНХРОННИХ МАШИН З ЕНКОДЕРОМ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Наведений авторами аналіз динамічних вимірювань ковзання $S(t)$ асинхронних машин дозволив виділити такі основні їхні особливості: інформативний параметр S протягом перехідного процесу асинхронної машини змінюється в широкому діапазоні від одиниці до декількох сотих одиниць; за короткий проміжок часу (за час перехідного процесу) необхідно отримати велику кількість результатів вимірювань; вимірювання є двоканальні (ω_M і ω_P) і опосередковані, що суттєво впливає на апаратно програмну реалізацію вимірювальних каналів ковзання та їхні похибки. Встановлено, що в процесі перехідного процесу кутова швидкість ротора ω_P (за короткий проміжок часу) зростає від 0 до синхронної, а період від максимального значення до мінімального. Така нерівномірність періодів призводить: по-перше, до нерівномірної дискретизації, і як наслідок похибки дискретизації; по-друге, суттєвої залежності похибки квантування від зміни кутової швидкості. В результаті досліджень показано, що частоту промислової мережі обов'язково необхідно вимірювати цифровим частотоміром миттєвих значень протягом перехідного процесу АМ.

Ключові слова: ковзання, кутова швидкість, кутова частота, енкодер, квантування, дискретизація, похибки квантування і дискретизації.

Abstract

The authors' analysis of dynamic slip measurements $S(t)$ of asynchronous machines made it possible to highlight their main features: the informative parameter S during the transient process of the asynchronous machine changes in a wide range from one to several hundredths of units; it is necessary to obtain a large number of measurement results in a short period of time (during the transition process); measurements are two-channel (ω_M and ω_P) and mediated, which significantly affects the hardware and software implementation of the sliding measurement channels and their errors. It was established that during the transient process, the angular velocity of the rotor ω_P (in a short period of time) increases from 0 to synchronous, and the period from the maximum value to the minimum. Such non-uniformity of the periods leads: firstly, to uneven discretization, and as a consequence of the discretization error: secondly, to a significant dependence of the quantization error on the change in angular velocity. As a result of the research, it is shown that the frequency of the industrial network must be measured with a digital frequency meter of instantaneous values during the transient AM process.

Keywords: sliding, angular velocity, angular frequency, encoder, quantization, discretization, quantization and discretization errors.

Вступ

Ковзання (S) є відносна різниця між кутовою частотою обертання магнітного поля статора ω_M та кутовою швидкістю обертання ротора ω_P асинхронних машин (АМ), яка подається у відносних одиницях [1-2] або відсотках:

$$S = \frac{\omega_M - \omega_P}{\omega_P} \quad (1)$$

Виходячи з цього динамічні вимірювання фізичної величин ковзання мають певні особливості:

- інформативний параметр S протягом перехідного процесу АМ змінюється в широкому діапазоні від одиниці до декількох сотих одиниць;

- за короткий проміжок часу (за час перехідного процесу) необхідно отримати велику кількість результатів вимірювань;
- вимірювання є двоканальні (ω_M і ω_P) і опосередковані, що суттєво впливає на апаратно програмну реалізацію вимірювальних каналів ковзання та їхні похибки.

Відповідно до чинних нормативів для вимірювання ковзання використовують [3-4] методи амперметра постійного струму, індуктивної котушки та стробоскопічний (*stroboscopic method*), а також частотні методи.

Перші три методи принципово не можливо застосувати для динамічних вимірювань ковзання. Має сенс зосередити подальші дослідження тільки засобів, що реалізують частотний метод [5-6]. Основними елементами таких пристроїв є: об'єкт вимірювання, вал якого через муфту спряження з'єднано з валом енкодера. Енкодер неелектричну величину кутову швидкість ротора ω_P перетворює в електричну – частоту імпульсів:

$$f_P = \frac{\omega_P \cdot Z}{2 \cdot \pi} \quad (2)$$

де Z – роздільна здатність енкодера.

Другий канал перетворює кутову частоту мережі ω_M у відповідне їй значення частоти

$$f_M = \frac{\omega_M}{2 \cdot \pi} \quad (3)$$

З цих частотних сигналів формуються відповідні їм періоди (T_P і T_M), які квантуються періодами T_0 зразкової частоти f_0 в логічних схемах 2I

$$N_P = \frac{T_P}{T_0}; \quad f_P = \frac{f_0}{N_P}; \quad N_M = \frac{T_M}{T_0}; \quad f_M = \frac{f_0}{N_M},$$

а їхню кількість підраховують відповідні двійкові лічильники СТ_{2P} і СТ_{2M}.

З рівнянь перетворення цифрового тахометра

$$\omega_P = \frac{f_P \cdot 2 \cdot \pi}{N_P \cdot Z} \quad (4)$$

і цифрового частотоміра промислової мережі

$$\omega_M = \frac{f_M \cdot 2 \cdot \pi}{N_M} \quad (5)$$

визначають числові значення кутової частоти обертання магнітного поля статора ω_M та кутовою швидкістю обертання ротора ω_P і за (1) опосередковано знаходять значення ковзання.

Такий підхід до динамічних вимірювань ковзання має певні недоліки:

1. Кількість виміряних значень кутової швидкості за час перехідного процесу АМ визначається розрізнявальною здатністю Z енкодера, а яку кількість виміряних значень частоти промислової мережі для забезпечення необхідної точності не встановлено. Більшість авторів вважають, що частота промислової мережі є досить стабільною фізичною величиною, то її вимірювати не обов'язково. Тому числове значення кутової частоти розраховують

$$\omega_M = 2 \cdot \pi \cdot f_H$$

де f_H – номінальне значення частоти рівне 50 Гц.

2. В процесі перехідного процесу кутова швидкість ротора ω_P (за короткий проміжок часу) зростає від 0 до синхронної, а період від максимального значення до мінімального. Така нерівномірність періодів призводить:

по-перше, до нерівномірної дискретизації, і як наслідок похибки дискретизації:

по-друге, суттєвої залежності похибки квантування від зміни кутової швидкості.

Метою роботи є підвищення точності динамічних вимірювань ковзання асинхронних машин за рахунок підвищення точності вимірювання частоти промислової мережі та зменшення похибки квантування і дискретизації кутової швидкості ротора в межах перехідного процесу.

Результати досліджень вимірювального каналу кутової швидкості

Припустимо [7], що під час перехідного процесу кутова швидкість [рад/с] ротора АМ змінюється (рис.1) за експоненціальним законом

$$\omega_p = \omega_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (6)$$

де ω_c – синхронна швидкість,
 τ - постійна часу.

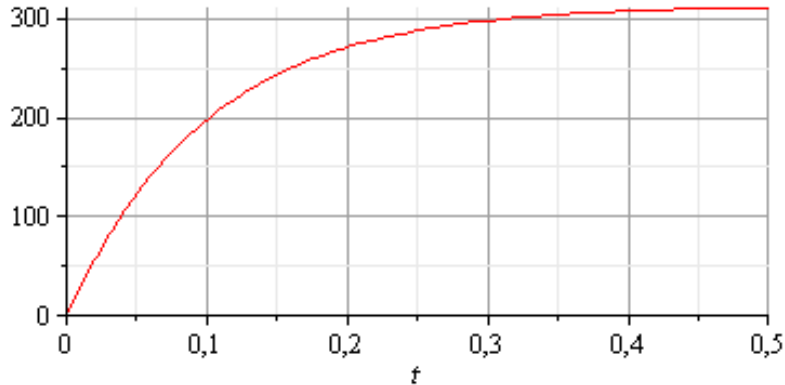
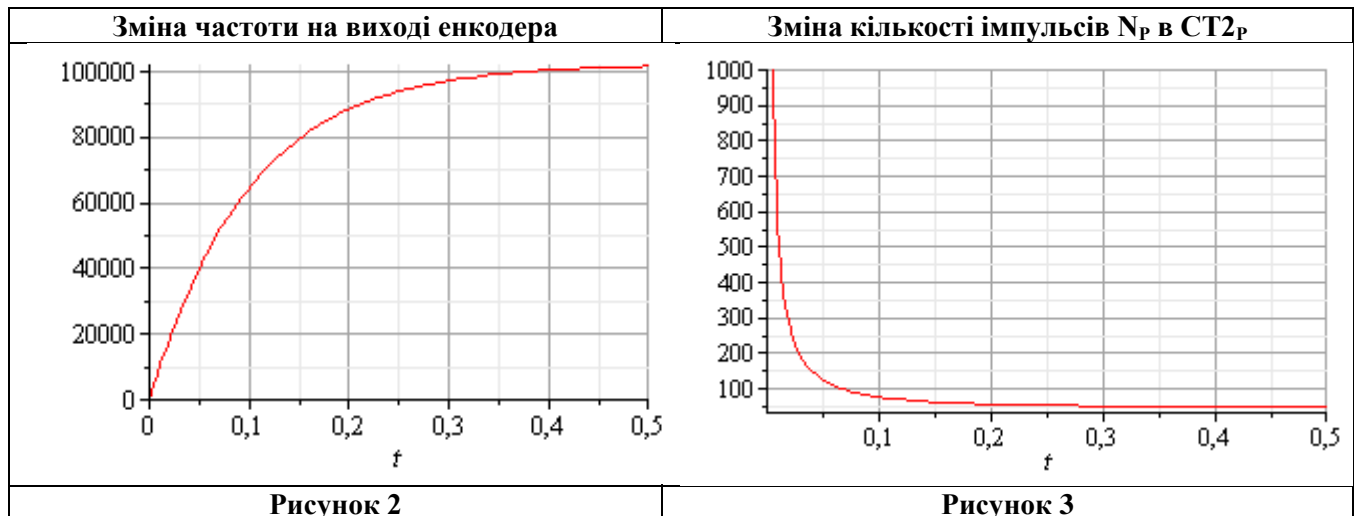


Рисунок 1 – Кутова швидкість АМ, під час перехідного процесу

Тоді частоту (рис.2) на виході енкодера подамо такою залежністю

$$f_p = \frac{\omega_p \cdot Z}{2 \cdot \pi} = \frac{\omega_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \cdot Z}{2 \cdot \pi} \quad (7)$$



Кількість імпульсів (рис.3), яку фіксує двійковий лічильник СТ2_p в процесі кантування кожного вимірюваного періоду T_p зразковими періодами T_0 , визначається [8-10]

$$N_p = \frac{T_p}{T_0} = \frac{f_0}{f_p} = \frac{f_0 \cdot 2 \cdot \pi}{Z \cdot \omega_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)} \quad (8)$$

В результаті заміни аналогової величини $\omega_c(t)$ обмеженою кількістю числових значень N_p виникає похибка квантування [11], відносно значення якою оцінимо так

$$\delta_K = \frac{1}{N_p} \cdot 100\% = \frac{Z \cdot \omega_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)}{f_0 \cdot 2 \cdot \pi} \quad (9)$$

Графічне подання зміни числових значень похибки квантування в процесі зростання кутової швидкості за час перехідного процесу наведено на рис.4.

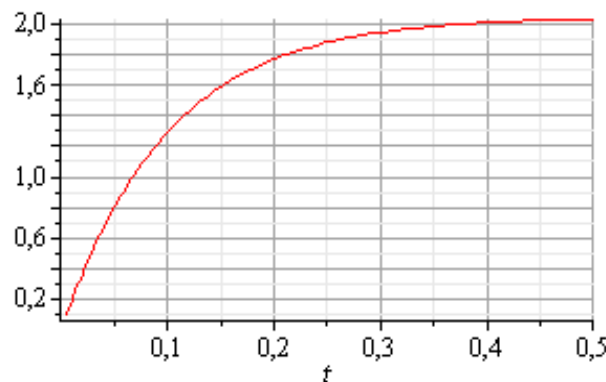


Рисунок 4 – Похибка квантування під час перехідного процесу АМ

Аналіз наведених результатів моделювання показує, що під час динамічних вимірювань [9] кутової швидкості похибка квантування зростає: на початку діапазону вимірювань вона мінімальна, а на верхній межі досягає максимальних значень. Шляхами зменшення відносної похибки квантування [12-13] є зменшення роздільної Z здатності енкодера і збільшення зразкової частоти f_0 кварцового резонатора.

Оскільки квантування здійснюється в межах кожного періоду T_p вихідного частотного f_p сигналу енкодера, то значення цих періодів і є кроками дискретизації кутової швидкості

$$T_d = T_p = \frac{1}{f_p} = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)} \quad (10)$$

В процесі заміни аналогової величини кутової швидкості обмеженою кількістю її миттєвих значень виникає похибка дискретизації [11]

$$\Delta_d = \frac{1}{2} \cdot T_d \cdot \frac{d\omega_p}{dt} \quad (11)$$

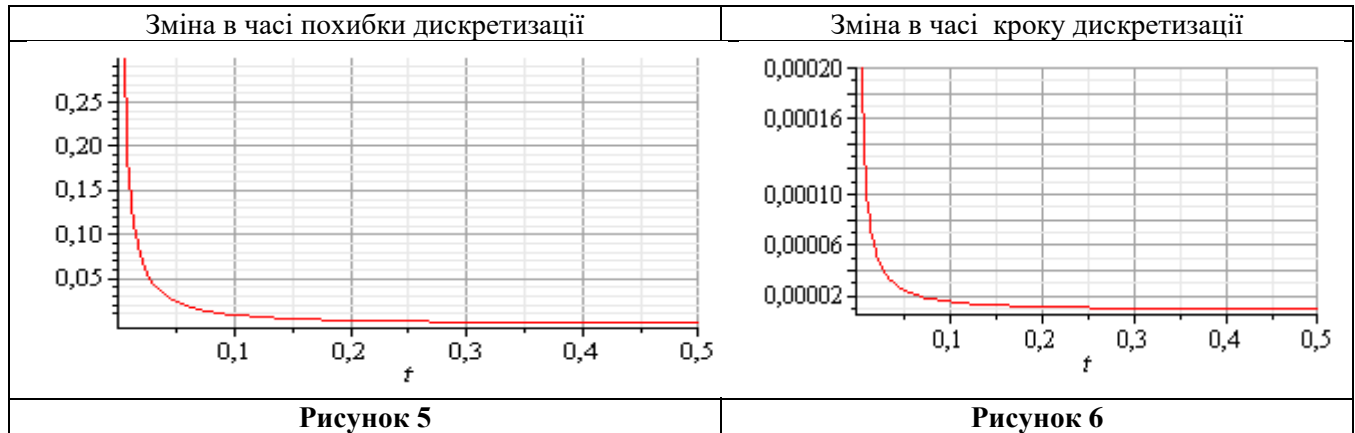
Взявши похідну з (6) отримаємо прискорення зміни кутової швидкості

$$\frac{d\omega_p}{dt} = \frac{\omega_c \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}}{\tau} \quad (12)$$

Підставимо (10) і (12) в (11) і матимемо аналітичну залежність для оцінювання похибки дискретизації

$$\Delta_D = \frac{\pi \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}}{Z \cdot \tau \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)} \quad (13)$$

Аналіз результатів моделювання наведених на рис.5 і рис.6 дозволяє дійти такого висновку: зміна кроку дискретизації зумовлює відповідну зміну динамічної похибки дискретизації. На початку діапазону крок дискретизації T_d великий, що і пояснює великі значення похибки дискретизації. З ростом кутової швидкості зменшується крок дискретизації і відповідно зменшується похибка дискретизації.



Результати досліджень вимірювального каналу кутової частоти промислової мережі

Вимірювальний канал частоти промислової мережі являє собою масштабний перетворювач (вимірювальний трансформатор напруги), тригер Шмідта, тактовий тригер (пристрій виділення періоду), логічну схему 2І, кварцовий резонатор і двійковий лічильник СТ_М.

Підставимо значення кутової швидкості (4) і кутової частоти промислової мережі (5) в (1) і отримаємо рівняння для опосередкованих вимірювань ковзання асинхронних машин

$$S = \frac{\omega_M - \omega_P}{\omega_M} = \frac{\omega_M - \omega_C \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)}{\omega_M} \quad (14)$$

а графічну залежність, що ілюструє зміну ковзання в часі протягом перехідного процесу АМ, наведено на рис.7.

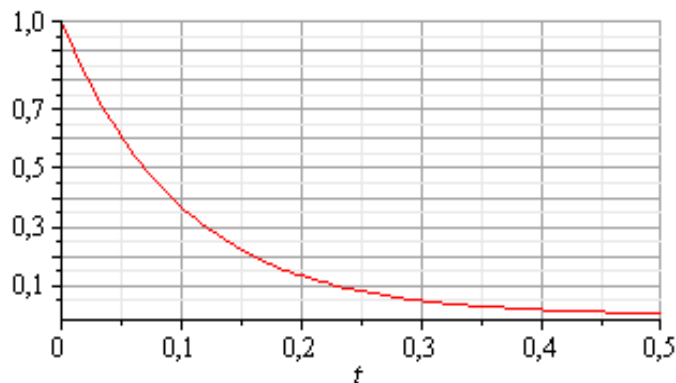


Рисунок 7 – Зміна ковзання в часі протягом перехідного процесу АМ

Ковзання АМ протягом перехідного процесу змінюється від $S=1$ (при нерухомому роторі $\omega_p = 0$) і до декількох сотих коли $\omega_p = \omega_c$.

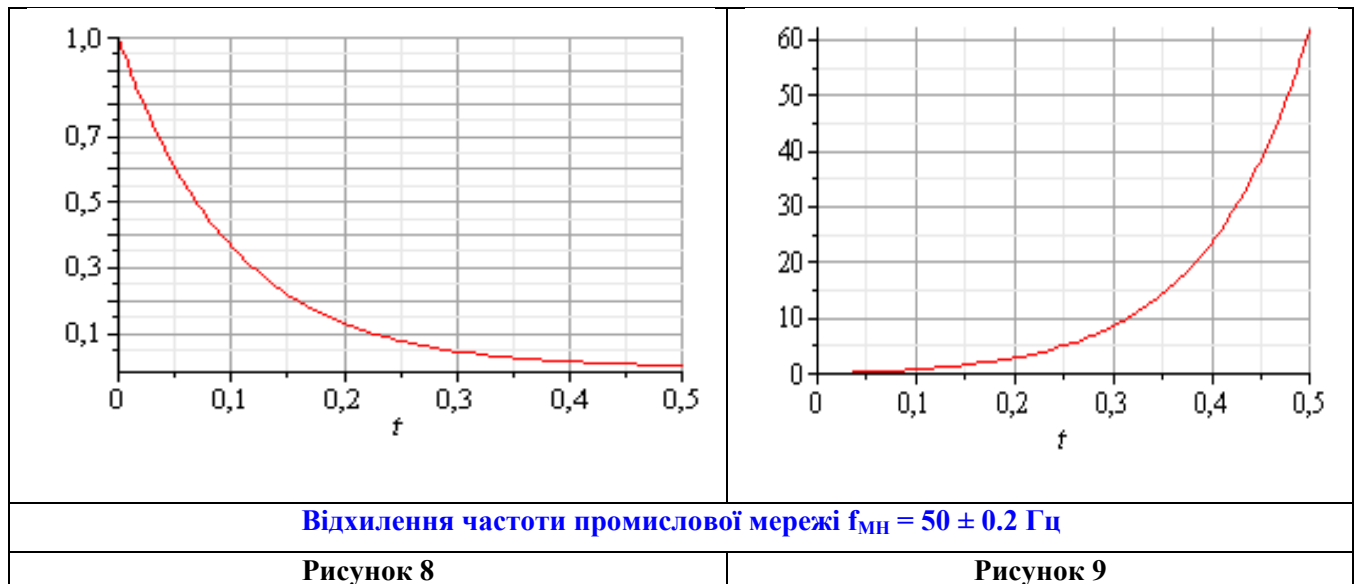
Згідно показників якості електричної енергії за ДСТУ-13109-97 номінальна частота напруги промислової мережі 50 Гц. Нормально допустиме відхилення частоти 50 ± 0.2 Гц, а гранично допустиме відхилення 50 ± 0.4 Гц.

На рис.8 наведено результати моделювання зміни ковзання $S(t)$ в часі при відхилення частоти промислової мережі від номінального значення на ± 0.2 Гц, а на рис.9 зміна відносної похибки в часі $\delta(t)$

$$\delta(t) = \frac{S_{50 \pm 0.2} - S_{НОМ}}{S_{НОМ}} \cdot 100\%$$

яка в усталеному режимі роботи АМ може досягати 60% (рис.9).

Виходячи з викладеного, частоту промислової мережі обов'язково необхідно вимірювати цифровим частотоміром миттєвих значень протягом перехідного процесу АМ.



Висновки

1. Вимірювальний канал ковзання з енкодером дозволяє отримати велику кількість миттєвих значень кутової швидкості за час перехідного процесу АМ, що є достатнім для забезпечення високої точності сумісних вимірювань складових динамічної механічної характеристики $M=f(S)$.
2. Аналіз наведених результатів моделювання показує, що під час динамічних вимірювань кутової швидкості похибка квантування зростає: на початку діапазону вимірювань вона мінімальна, а на верхній межі досягає максимальних значень. Шляхами зменшення відносної похибки квантування є зменшення роздільної Z здатності енкодера і збільшення зразкової частоти f_0 кварцового резонатора.
3. Встановлено, що зміна кроку дискретизації зумовлює відповідну зміну динамічної похибки дискретизації. На початку діапазону крок дискретизації T_d великий, що і пояснює великі значення похибки дискретизації. З ростом кутової швидкості зменшується крок дискретизації і відповідно зменшується похибка дискретизації.
4. Для забезпечення високої точності вимірювання ковзання обов'язково необхідно вимірювати ще і частоту промислової мережі цифровим частотоміром миттєвих значень протягом перехідного процесу АМ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вовк О. Ю. Пристрій вимірювання ковзання асинхронного електродвигуна / О. Ю. Вовк, С. О. Квітка // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. - 2013. - Вип. 13, т. 2. - С. 136-140. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptdau_2013_13_2_23
2. О. П. Чорний, Ю. В. Зачепа, В. К. Титюк, О. А. Чорна. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів : навчальний посібник. – Кременчук : ЧП Щербатых А. В., 2019. – 122 с.
3. В. В. Кухарчук, Елементи теорії керування динамічними параметрами електричних машин: Монографія, Вінниця: Університет-Вінниця, 1998, 125 с.
4. Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Володарський С.Т., Грабко В.В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник / [В.В.Кухарчук, В.Ю.Кучерук, С.Т.Володарський, В.В.Грабко] – Херсон: Олді-плюс, 2013. -538с.
5. В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький, Вимірювання параметрів обертального руху електромеханічних перетворювачів енергії в перехідному режимі роботи: Монографія, Вінниця: УНІВЕРСУМВінниця, 2018, 155 с.
6. В. В. Кухарчук, В. С. Голодюк, Інструмент для динамічних вимірювань параметрів обертального руху електричних машин у перехідних режимах роботи, Інтегровані інтелектуальні роботизовані комплекси, ІРТК-2021 13-а Міжнародна науково-практична конференція, Київ, Україна, 18-19 травня 2021 р., с. 87.
7. Vasyk Kukharchuk , Oleksandr Vasilevskyi , Volodymyr Holodiuk. Results of study of quantization and discretization error of digital tachometers with encoder // ACTA IMEKO ISSN: 2221-870X June 2023, Volume 12, Number 2, 1 - 6 ACTA IMEKO | www.imeko.org June 2023 | Volume 12 | Number 2 | - P.1-6 .
8. В. В. Кухарчук, Основи метрології та електричних вимірювань, Конспект лекцій. Частина II: Вінниця: ВНТУ, 2020, 155 с.
9. В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Аналіз динамічних властивостей тахометричних перетворювачів, Технічна електродинаміка, 2000, Частина 1, с. 103-107.
10. В. Ю. Кучерук, В. В. Кухарчук, Аналіз і практична реалізація мікропроцесорного засобу вимірювання кутової швидкості обертання електричних машин, Вісник ВПІ, 1995, No 2, с. 12-16.
11. В. В. Кухарчук, В. С. Голодюк, Результати досліджень похибки квантування та дискретизації цифрових тахометрів з енкадером, Інтегровані інтелектуальні роботизовані комплекси (ІРТК2022), 15-та Міжнародна науково-практична конференція 17-18 травня 2022 р., Київ, Україна, К.: НАУ, 2022, 241 с. (збірник тез), с. 98-100
12. V. V. Kukharchuk, S. V. Pavlov, V. S. Holodiuk, V. E. Kryvonosov, K. Skorupski, A. Mussabekova, G. Karnakova Information Conversion in Measuring Channels with Optoelectronic Sensors. Sensors 2022, 22, 271. DOI: 10.3390/s22010271
13. V. V. Kukharchuk, V. F. Hraniak, S. Sh. Katsyv, V. S. Holodiuk, Torque measuring channels: dynamic and static metrological characteristics, Informatyka, Automatyka, Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 10(3), 2020, pp. 82–85. DOI: 10.35784/iapgos.2080

Кухарчук Василь Васильович – д.т.н. проф. кафедри КЕМСК, Вінницький національний технічний університет.

Остапюк Юрій Михайлович – студент групи ЕПА-22М, факультет ФЕЕЕМ, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: MrGronom@gmail.com .

Глух Дмитро Олегович – студент групи ЕПА-22М, факультет ФЕЕЕМ, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: dimon18112000@gmail.com .

Науковий керівник: Кухарчук Василь Васильович – д.т.н. проф. кафедри КЕМСК, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Kuharchuk V. V. - Ph.D. Prof. Department of KEMSK, Vinnytsia National Technical University.

Ostapiuk Y. M. - student of the EPA-22M group, FEEEM faculty, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: MrGronom@gmail.com.

Glukh D. O. - student of the EPA-22M group, FEEEM faculty, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dimon18112000@gmail.com.

Supervisor: Kuharchuk V. V. - Ph.D. Prof. Department of KEMSK, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.