

Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Дослідження ковзання асинхронних машин

в досліді холостого ходу»

Виконав: студент 2-го курсу, гр. ЕПА-22м  
спеціальності 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Глух Дмитро

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н. проф. кафедри КЕМСК

Кухарчук ВАСИЛЬ

(прізвище та ініціали)

«21» 14 2023 р.

Опонент: Олександр Кривошея

Олександр Кривошея

(прізвище та ініціали)

«  »    2023 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри   

«21» 14 2023 р.



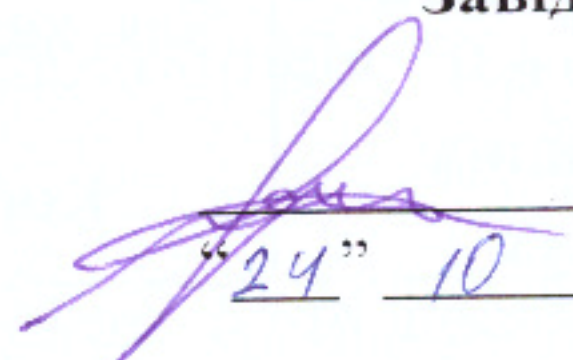
Вінницький національний технічний університет  
Факультет Електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
Галузь знань 14 – Електрична інженерія  
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРИЗ

  
"24" 10 2023 року

## **ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Глуху Дмитру Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження ковзання асинхронних машин в досліді холостого ходу

керівник роботи Кухарчук Василь Васильович, д.т.н., проф. каф. КЕМС  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "18" 09 2023 року №247

2. Термін подання студентом роботи 28.11 2023

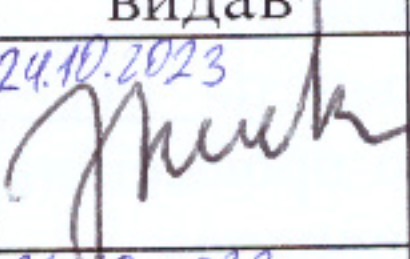
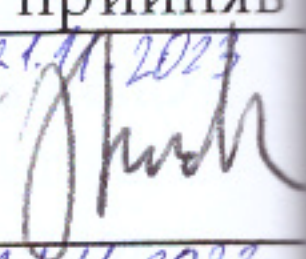
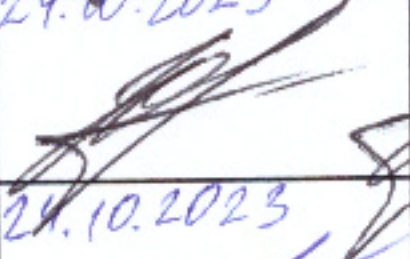
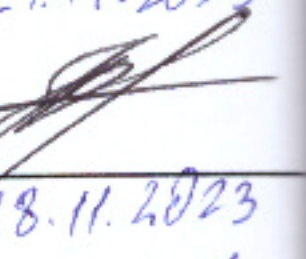

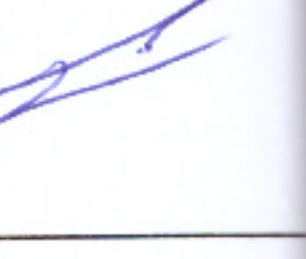
3. Вихідні дані до роботи: тип двигуна 4A71A2U3;

4. Зміст текстової частини: 1 Загальні відомості; 2 2 Вимірювальний канал кутової швидкості з енкодером; 3 Огляд сенсорів кутової швидкості з аналоговим виходом; 4 Структурна схема і принцип дії цифрового тахометра з тахогенератором; 5 Вплив похибки мережі на параметри двигуна; 6 Охорона праці; 7 Техніко-економічне обґрунтування; Висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1 Вступ, об'єкт, предмет, мета, задачі дослідження. 2 Аналіз засобів виміру параметрів обертання АМ в досліді ХХ; 3 Математична модель засобу динамічного вимірювання кутової швидкості АМ; 4 Застосування мікропроцесора для вимірювання кутової швидкості обертання; 5 Моделювання асинхронної машини; 6 Моделювання похибки квантування; 7 Наукова новизна та практичне значення; 8 Висновки



6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	д. т. н., проф. каф. КЕМСК Кухарчук В. В.	24.10.2023 	21.11.2023 
Економічна частина	Шулле Ю. А. к. т. н., доц. каф. ЕСЕЕМ	24.10.2023 	27.11.2023 
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Зав. каф. БЖДПБ, д. пед. н., проф. Кобилянський О. В.	24.10.2023 	28.11.2023 

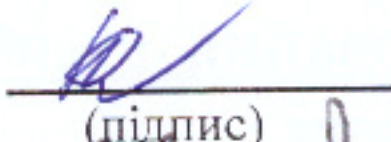
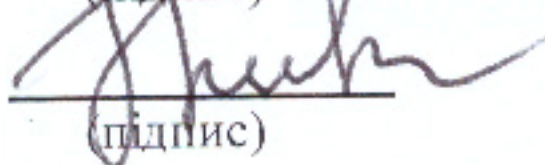
7. Дата видачі завдання 24.10.2023

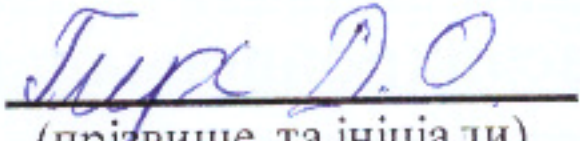
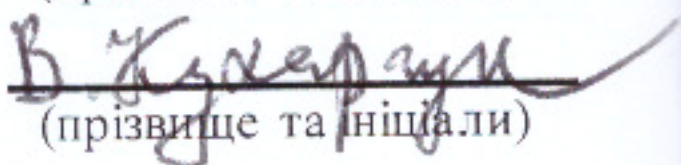
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	03.10.2023	
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	21.11.2023	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	28.11.2023	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	21.11.2023	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	28.11.2023	
6	Попередній захист МКР	28.11.2023	
7	Нормоконтроль МКР	28.11.2023	
8	Рецензування МКР	11.12.2023	
9	Захист МКР	12.12.2023	

Студент

Керівник роботи

  
(підпис)  
  
(підпис)

  
(прізвище та ініціали)  
  
(прізвище та ініціали)



## АНОТАЦІЯ

УДК: 621.3(075)

Глух Д. О. Дослідження ковзання асинхронних машин в досліді холостого ходу. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма – електромеханічні системи автоматизації та електропривод. Вінниця: ВНТУ, 2023  
84 с.

На укр. мові. Бібліограф.: 16 назв; рис.: 38; табл. 10

В магістерській кваліфікаційній роботі було досліджено вплив зміни частоти мережі, в роботі були отримані експериментальні виміри частоти мережі, досліджена можлива похибка а також запропоновані варіанти зменшення похибки, виведений закон розподілу верхню і нижню межу. За результатами роботи можна покращити якості оцінки асинхронних машин, за допомогою мікропроцесорних засобів вимірювання на усьому діапазоні зміни швидкості в досліді холостого ходу. За допомогою такого динамічного вимірювання, пропонується алгоритм по підвищенню якості вимірювання, за рахунок зменшення нормованої похибки квантування вимірювання кутової швидкості асинхронних машин. Методом імітаційного комп'ютерного моделювання в програмному середовищі MatCAD було встановлено залежності похибки квантування при знаходженні кутової швидкості обертання асинхронної машин на усьому діапазоні її зміни. Запропоновано структурна схема мікропроцесорного засобу вимірювання та алгоритм роботи мікропроцесора на базі нормування похибки квантування

Графічна частина складається з 2 плакатів із результатами роботи.

Ключові слова: мікропроцесорний засіб вимірювання, енкодер, асинхронна машина, математична модель, експериментальні виміри, структурна схема.



## ABSTRACT

Glukh D. O. Study of slippage of asynchronous machines in the experiment of idling. Master's qualification thesis on specialty 141 - Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, educational program - electromechanical automation systems and electric drive. Vinnytsia: VNTU, 2023 84 with.

In Ukrainian speech Bibliography: 16 titles; Fig.: 38; table 10

In the master's qualification work, the effect of changing the network frequency was investigated, experimental measurements of the network frequency were obtained in the work, the possible error was investigated, as well as the proposed options for reducing the error, the law of distribution of the upper and lower limits was derived. Based on the results of the work, it is possible to improve the quality of the assessment of asynchronous machines, using microprocessor-based measuring tools over the entire range of speed changes in the idling experiment.

With the help of such dynamic measurement, an algorithm is proposed to improve the quality of the measurement by reducing the normalized quantization error of the angular speed measurement of asynchronous machines. Using the method of simulation computer modeling in the Matlab (Simulink) software environment, the dependencies of the quantization error when finding the angular speed of rotation of asynchronous machines over the entire range of its change were established. The structural diagram of the microprocessor measuring tool and the algorithm of microprocessor operation based on normalization of the quantization error are proposed

The graphic part consists of 2 Posters with work results.

Key words: microprocessor measuring device, encoder, asynchronous machine, mathematical model, experimental measurements, structural diagram



## ЗМІСТ

<b>ЗМІСТ .....</b>	<b>3</b>
<b>Вступ.....</b>	<b>4</b>
<b>1 Загальні відомості .....</b>	<b>8</b>
<b>2 Вимірювальний канал кутової швидкості з енкодером.....</b>	<b>36</b>
<b>3 Огляд сенсорів кутової швидкості з аналоговим виходом .....</b>	<b>41</b>
<b>4 Структурна схема і принцип дії цифрового тахометра з тахогенератором.....</b>	<b>46</b>
<b>5 Вплив похибки мережі на параметри двигуна .....</b>	<b>51</b>
<b>6 Охорона праці.....</b>	<b>58</b>
6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи асинхронних машин в умовах впливу загрозливих чинників надзвичайних ситуацій .....	65
6.3.1 Дослідження безпеки роботи системи керування в умовах впливу іонізуючого випромінювання.....	66
6.3.2 Дослідження безпеки роботи системи керування в умовах дії електромагнітного імпульсу.....	68
6.3.3 Розробка заходів по підвищенню безпеки роботи системи керування в умовах надзвичайних ситуацій.....	69
<b>7 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ .....</b>	<b>71</b>
7.1 Технічне обґрунтування вибору двигуна.....	71
Висновок.....	74
<b>ВИСНОВОК.....</b>	<b>75</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....</b>	<b>76</b>
Додаток А.....	1
Додаток Б .....	5



## ВСТУП

Сучасний розвиток технологій і автоматизації виробництва неможливо уявити без застосування електричних двигунів, які виступають ключовими елементами в системах приводу. Асинхронні двигуни, завдяки своїй простоті у будові та надійності, широко використовуються в промислових, побутових та транспортних системах. Однак, щоб забезпечити оптимальну ефективність роботи асинхронного двигуна, важливо враховувати та досліджувати різноманітні аспекти його функціонування.

**Актуальність теми дослідження** Одним із важливих аспектів є взаємодія асинхронного двигуна з основними елементами системи, зокрема, елементами керування та механічним навантаженням. Ковзання, або ступінь різниці між швидкістю обертання магнітного поля статора та швидкістю обертання ротора, є одним із фундаментальних параметрів, які впливають на ефективність та динаміку асинхронного двигуна.

**Об'єктом дослідження** є засоби динамічних вимірювань ковзання асинхронних машин в перехідних режимах роботи.

**Предметом дослідження** є математичні моделі динамічних вимірювань ковзання асинхронних машин адаптивних до частоти промислової мережі.

**Мета** даного дослідження полягає в підвищенні точності динамічних вимірювань ковзання асинхронної машини шляхом зменшення систематичної і випадкової складових похибок, що спричинені відхилення промислової мережі від номінального значення .

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні **задачі**:

- Здійснити огляд відомих сенсорів кутової швидкості для динамічних вимірювань ковзання;



- Проаналізувати відомі методи та цифрові засоби вимірювання ковзання асинхронних машин;
- Здійснити моделювання зміни ковзання АМ в часі скориставшись експоненціальною математичною моделлю;
- Провести експериментальні дослідження частоти промислової мережі;
- Розробити алгоритми для зменшення впливу відхилень частоти промислової мережі від номінального значення на результати динамічних вимірювань ковзання;
- Розробити мікропроцесорний засіб динамічних вимірювань ковзання асинхронних машин з тахогенератором.

#### **Методи дослідження:**

1. Емпіричні методи експериментальних досліджень частоти
2. Метод імітації моделювання кутової швидкості асинхронної машини і кутової частоти
3. Методи оцінювання систематичної і випадкової похибок

#### **Наукова новизна одержаних результат**

Отримав подальший розвиток опосередкований метод вимірювання ковзання асинхронних машин, який на відмінну від відомих забезпечує квантування напруги з виходу тахогенератора і періодів частоти промислової мережі в «примикаючи» інтервалах, що забезпечує динамічні вимірювання миттєвих значень ковзання з нормованим значенням похибки квантування.

#### **Практичне значення.**

1. Експериментально встановлено, що багаторазові вимірювання частоти промислової мережі за час перехідного процесу асинхронної машини в «примикаючих» інтервалах з використанням середнього арифметичного при оцінюванні ковзання замість номінального значення частоти дозволяє суттєво зменшити систематичну похибку і в разів випадкову. Такий підхід дозволяє виконувати динамічні опосередковані



вимірювання ковзання асинхронних машин з класом точності, який регламентовано для статичних вимірювань.

2. Розроблено алгоритм зменшення систематичної і випадкової похибок, що спричинені відхиленням частоти промислової мережі від номінального значення, для мікропроцесорної реалізації засобу вимірювання ковзання асинхронних машин.

3. Розроблено структурну схему двухканального засобу вимірювання ковзання асинхронних машин з тахогенератором в якості сенсора кутової швидкості і миттєвих значень періодів частоти промислової мережі.

4. Проведено експериментальні дослідження частоти промислової мережі в результаті чого отримано такі основні статистичні характеристики випадкової похибки: систематична складова похибки = 0.0321 Гц; випадкова складова = 0.0056 Гц; мінімальне значення абсолютного відхилення = 0.0211 Гц; максимальне значення абсолютного відхилення = 0.0431 Гц; крок дискретизації  $T_D = 30$  с.

5. На підставі  $\chi^2$  - критерію доведено, що закон розподілу випадкових відхилень промислової мережі від номінальних значень нормальний.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати магістерської кваліфікаційної роботи було отримано автором самостійно.

**Апробація результатів дослідження.** За результатами дослідження, було проведено подальше дослідження теми, яке доповідалось та обговорювалось на науково-технічній конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2024)

**Публікації.** За темою дослідження опубліковано 1 тези доповідей матеріалів конференцій :

- Особливості динамічних вимірювань ковзання асинхронних машин з енкодером / В. В. Кухарчук, Ю. М. Остапюк, Д. О. Глух – Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)», Вінниця, 2023. [Електронний ресурс].



<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2024/paper/view/19153>

:

Вінниця: ВНТУ, 2023р. – 7 с



## 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Призначення асинхронних машин: асинхронна машина — це електрична машина змінного струму, в якій частота обертання ротора  $n$  змінюється зі зміною навантаження, на відміну від синхронної (частоти обертання магнітного поля)  $n_1$  [1].

Асинхронні двигуни є основним типом електричних двигунів, які перетворюють електричну енергію в механічну в системах керування електроприводами. З іншого боку, асинхронні машини є оборотними, але асинхронний генератор майже не використовується. Отже, ми розглядатимемо лише АД.

Цей тип електричних двигунів є найпоширенішим. Порівняно з іншими типами електродвигунів, вони мають високу надійність, високий коефіцієнт корисної дії (ККД) і легкі в обслуговуванні. Вони також мають деякі недоліки. По-перше, вони потребують мережі реактивного струму для створення магнітного потоку, що призводить до того, що їхній коефіцієнт потужності  $\cos\phi < 1$ , і по-друге, їм важче регулювати частоту обертання порівняно з двигунами постійного струму. АД можуть працювати з однофазними, двофазними та трифазними мережами змінного струму.

Будова електродвигунів: короткозамкнений (КР) і фазний (ФР). ФР також називають двигунами з контактними кільцями.

Трифазний електродвигун складається з нерухомого статора та обертового ротора. Підшипникові щити скріплюють ротор і статор. Двигуни з самовентиляцією закритого типу також мають кришку-кожух з торця, яка прикриває вентилятор.

Статор працює для створення обертового магнітного поля машини за допомогою трифазної обмотки, яка живиться трифазною системою струмів. Ротор працює для перетворення електричної енергії в механічну обертову силу за допомогою індукованої електроенергії (ЕРС) і струмів, що містяться в його обмотці.



Для зменшення втрат на гістерезис і вихрові струми сердечники статора та ротора виготовляють із листів електротехнічної сталі. Сердечник ротора закріплений на валові, а сердечник статора в корпусі. Розташування трифазної обмотки в сердечнику статора таким чином, щоб її осі були під кутом 120 градусів, включає в себе відповідні обмотки як у зовнішні, так і в внутрішні пази сердечника ротора. Трикутник або зірка можуть бути використані для зв'язку фазних обмоток. Пульсуюче магнітне поле створюється кожною фазою трифазної обмотки статора. Обмотка ротора може бути фазною (для ФР) або короткозамкненою (для КР). Більшість часу біляча клітка складається з мідних або алюмінієвих стержнів, замкнених накоротко з торців двома кільцями. Цей стержень обмотки входить у пази сердечника ротора. Трифазну обмотку типу статора вбудовують у пази фазного ротора. Зірка зазвичай з'єднується з фазною обмоткою ротора. У цьому процесі кінці обмотки з'єднуються, а початки приєднуються до контактних кілець, на яких встановлюють щітки.

Електромагнітна енергія, яка передається магнітним полем у повітряному зазорі між статором і ротором, використовується для роботи електромашин. Якщо обмотку статора АД увімкнути в трифазну мережу, обертове магнітне поле статора перетинає силові лінії обмотки ротора, що призводить до індукції електрорушійних сил (ЕРС). Ці ЕРС створюють індукційні струми в обмотці ротора, коли вона замкнена або на резистори. Відповідно до закону Ампера обертове магнітне поле двигуна взаємодіє зі струмами ротора, створюючи електромеханічну силу, яка діє на провідники обмотки ротора, а також обертовий електромагнітний момент двигуна  $M$ , який приводить ротор до обертання. Таким чином, принцип роботи АД полягає в тому, що обертове магнітне поле взаємодіє зі струмами, які індукуються цим самим полем у провідниках обмотки ротора.

На рисунку 1.1 показано, як струми розподілені по обмотках статора відповідно до синусоїдного закону. Обертове магнітне поле повертається на той самий кут, коли фаза синусоїди змінюється на певний кут.

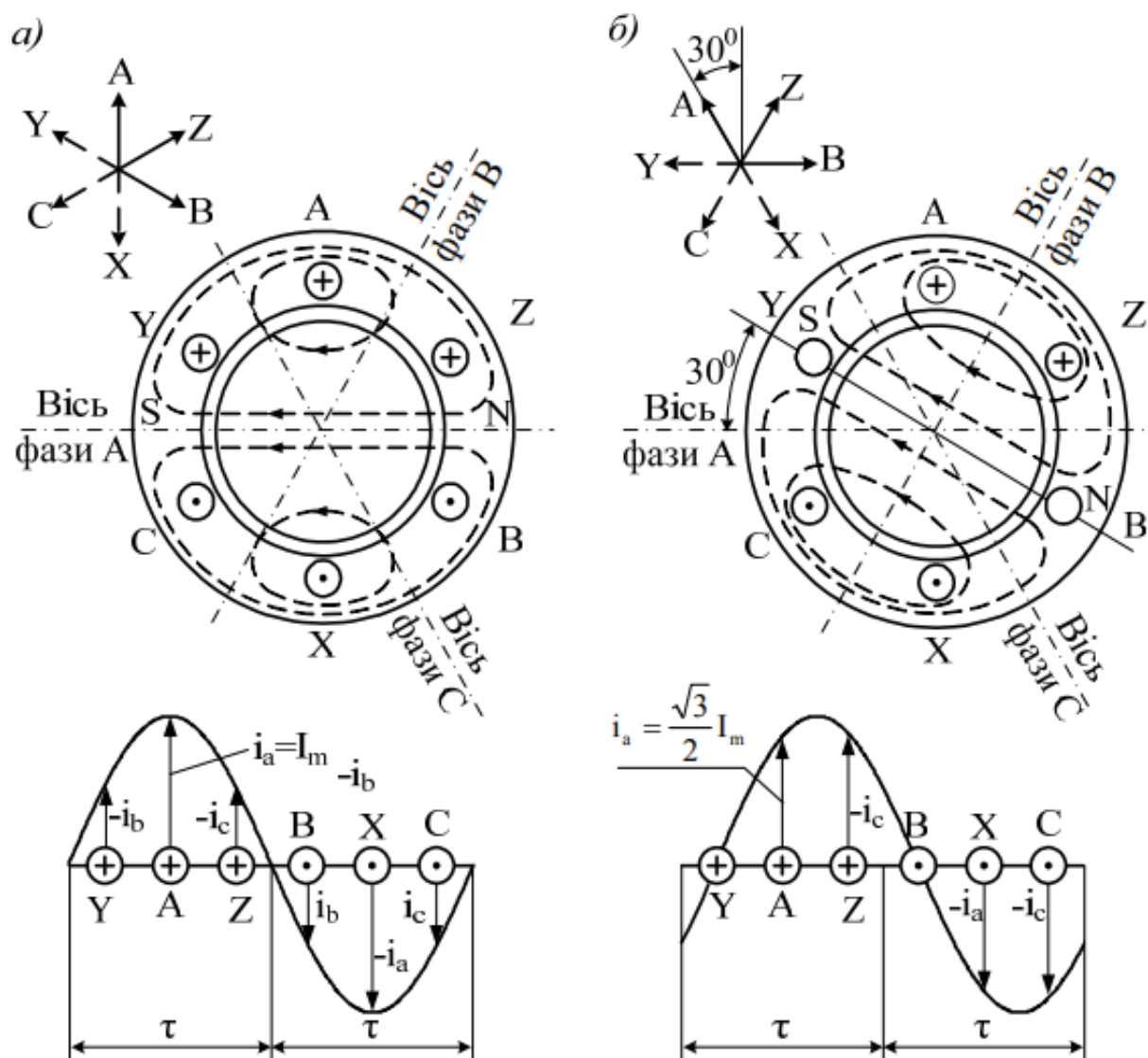


Рисунок 1.1 – Обертове магнітне поле асинхронного двигуна: а) початковий момент; б) при зміні фази струму на 30 градусів

Правило правої руки визначає напрямок струму, який створюється, коли обертове магнітне поле статора індукується в провідниках обмотки ротора ЕРС. Це означає, що відносно обертання провідника обертається проти руху стрілки годинника, а магнітне поле обертається за напрямом руху стрілки годинника. Правило «лівої руки» передбачає, що обертовий момент буде прикладений до провідника, що примушує його рухатися в сторону руху магнітного поля статора. Зростання ЕРС в роторі буде пропорційним зростанню обертового моменту та струму в провідниках



ротора І2. Електромагнітний момент  $M$  повинен збільшуватися зі збільшенням статичного навантаження на вал двигуна, що призводить до збільшення дисперсії  $n_1 - n$ .

Таким чином ротор АД обертається асинхронно з магнітним полем. Різницю їхніх частот обертання оцінюють за допомогою ковзання:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}, \quad (1.1)$$

де  $\omega_1, \omega$  – кутові швидкості обертання магнітного поля та ротора відповідно, рад/с.

Частота обертання магнітного поля (в об/хв) з  $p$  парами полюсів визначається як

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (1.2)$$

де  $f_1$  – частота струму статора, Гц.

Зв'язок між кутовою швидкістю та частотою обертання можна подати у вигляді

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}. \quad (1.3)$$

При промисловій частоті струму  $f_1 = 50$  Гц можливі частоти обертання магнітного поля наведені в таблиці. 1.1.

Таблиця 1.1 – Можливі частоти обертання магнітного поля при  $f_1 = 50$  Гц

$p$	1	2	3	4	5	6	8	10	30
$n_1,$ об/хв	3000	1500	1000	750	600	500	375	300	100

При пуску двигуна ( $n = 0$ )  $s = 1$ , а при обертанні ротора синхронно з полем статора (з синхронною частотою)  $n = n_1$   $s = 0$ . При  $n = n_1$  магнітне

поле статора відносно ротора нерухоме і струми в роторі індукуються не будуть, тому  $M = 0$  і такої швидкості обертання двигун досягнути не може. Тому в режимі двигуна завжди  $0 < n < n_1$  і  $1 > s > 0$ .

Частота струму в обмотці ротора:

$$f_2 = p(n_1 - n) = spn_1 = sf_1, \quad (1.4)$$

як наслідок, частота струму в роторі змінюється пропорційно ковзанню. Якщо зовнішній обертовий момент до ротора АД прикладається з частотою, більшою за синхронну ( $n > n_1$ ), ротор обганяє магнітне поле. У такому випадку машина працює в режимі генератора ( $s < 0$ ). Коли ротор обертається в напрямі, зворотному напрямку обертання поля статора ( $n < 0$ ), машина перебуває в режимі противмикання або електромагнітного гальмування.

Розглянемо АМ із трифазними обмотками на статорі та роторі при загальмованому роторі ( $s = 1$ ). У цьому режимі роботи АМ обмотки статора та ротора перетинаються магнітним потоком з однаковою швидкістю, тобто  $f_1 = f_2$ . Це робить його найзручнішим для дослідження процесів, що відбуваються в ньому. Цей тип роботи називають трансформаторним режимом.

Режим холостого ходу: якщо обертове магнітне поле є близьким до кругового, а вищі гармоніки електроенергії подавляються, електроенергія, що індукуються в обмотках статора  $E_1$  і ротора  $E_2$ , буде мати вигляд:

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{об1} \Phi, \quad (1.5)$$

$$E_2 = 4,44 f_1 w_2 k_{об2} k_c \Phi, \quad (1.6)$$

де  $w_1, w_2$  – число витків однієї фази обмотки статора і ротора, відповідно;

$k_c$  – коефіцієнт скосу пазів обмотки ротора;

$\Phi$  – магнітний потік;

$k_{об1}, k_{об2}$  – обмотувальні коефіцієнти обмотки статора і ротора відповідно:



$$k_{o\delta} = k_y k_p, \quad (1.7)$$

де  $k_y$  – коефіцієнт укорочення обмотки;

$k_p$  – коефіцієнт розподілу обмотки.

Відношення ЕРС  $E_1$  до  $E_2$  дорівнює коефіцієнту трансформації ЕРС:

$$k_E = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 k_{o\delta 1}}{w_2 k_{o\delta 2} k_c}. \quad (1.8)$$

Нехтуючи різницею обмотувальних коефіцієнтів, величини яких знаходяться в межах 0,96 – 0,90, а коефіцієнт скосу  $k_c$  обмотки ротора наближається до одиниці, можна вважати:

$$k_E \approx \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.9)$$

В режимі холостого ходу обмотка ротора розімкнена, в результаті чого по ній струм не протікає, а тому вона не впливає на електромагнітні процеси в статорі. При цьому справедливим є рівняння:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_0 R_1, \quad (1.10)$$

де  $U_1$  – напруга живлення

$I_0$  – струм холостого ходу, що протікає по обмотці статора;

$R_1$  – активний опір обмотки статора;

$E_{\sigma 1}$  & – ЕРС, викликана потоком розсіювання обмотки статора:

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_0 X_1, \quad (1.11)$$

де  $X_1$  – індуктивний опір обмотки статора. Векторна діаграма АМ при загальмованому роторі для режиму холостого ходу наведена на рисунку 1.2, на якому  $I_0 a$   $I_0 p$  – активна та реактивна складові струму холостого ходу, відповідно.

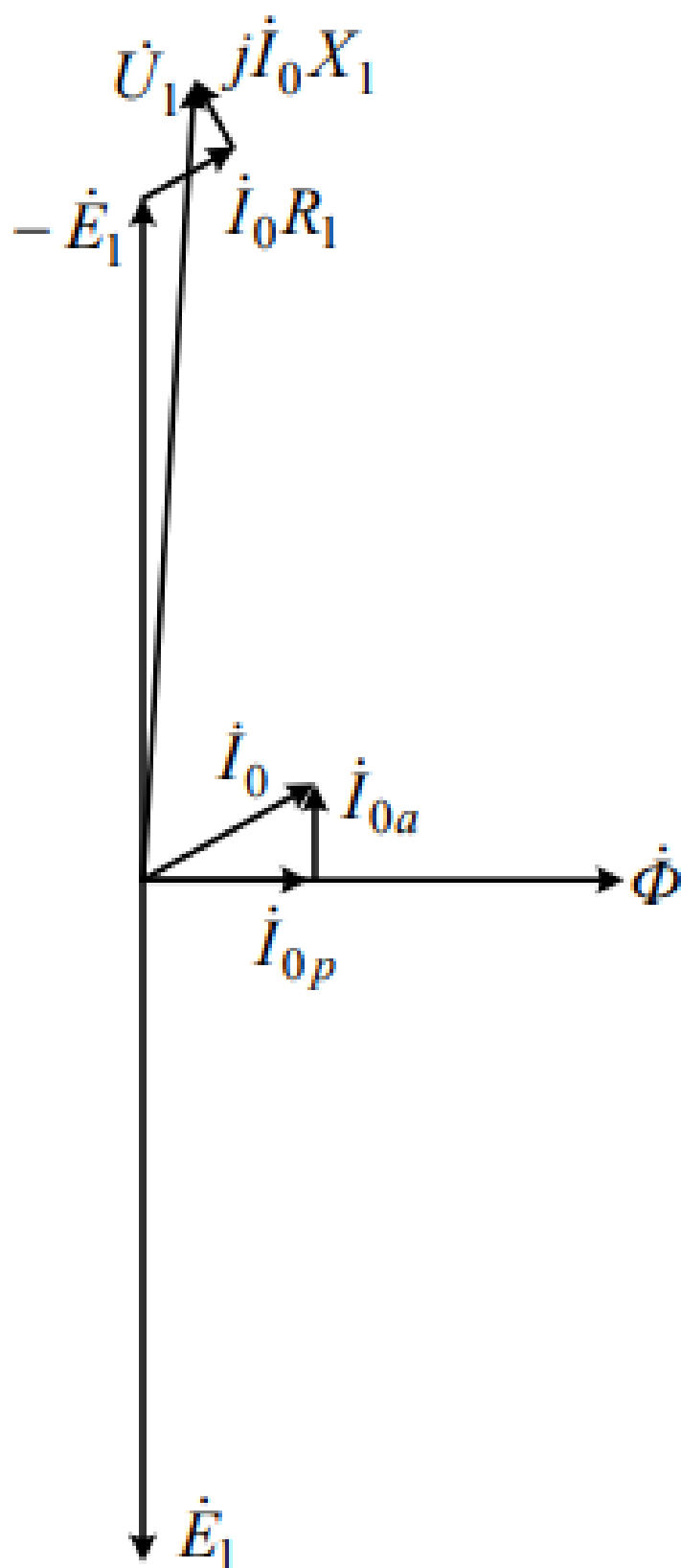


Рисунок 1.2 – Векторна діаграма АМ при загальмованому роторі в режимі холостого ходу



Через повітряний зазор між ротором і статором струм холостого ходу  $I_0$  в акумуляторі складає 20–40% від номінального струму. Отже, спадом напруги не можна нехтувати. Наявність великого струму холостого ходу в АМ збільшує втрати обмотки статора, одночасно знижуючи коефіцієнт потужності машини. Для зменшення цих неприємних явищ при конструюванні АМ мінімізують повітряний зазор між ротором і статором.

Двигуни з більшою потужністю та частотою обертання мають кращий ККД. Таким чином, можна також подати електричні втрати в обмотці ротора та механічну потужність таким чином:

Опір навантаження  $Z_n$  можна включити у вторинне коло АМ (коло обмотки ротора), що дозволяє йому працювати як трансформатор. На рисунку 1.3 показана векторна діаграма, яка відповідає цьому режиму

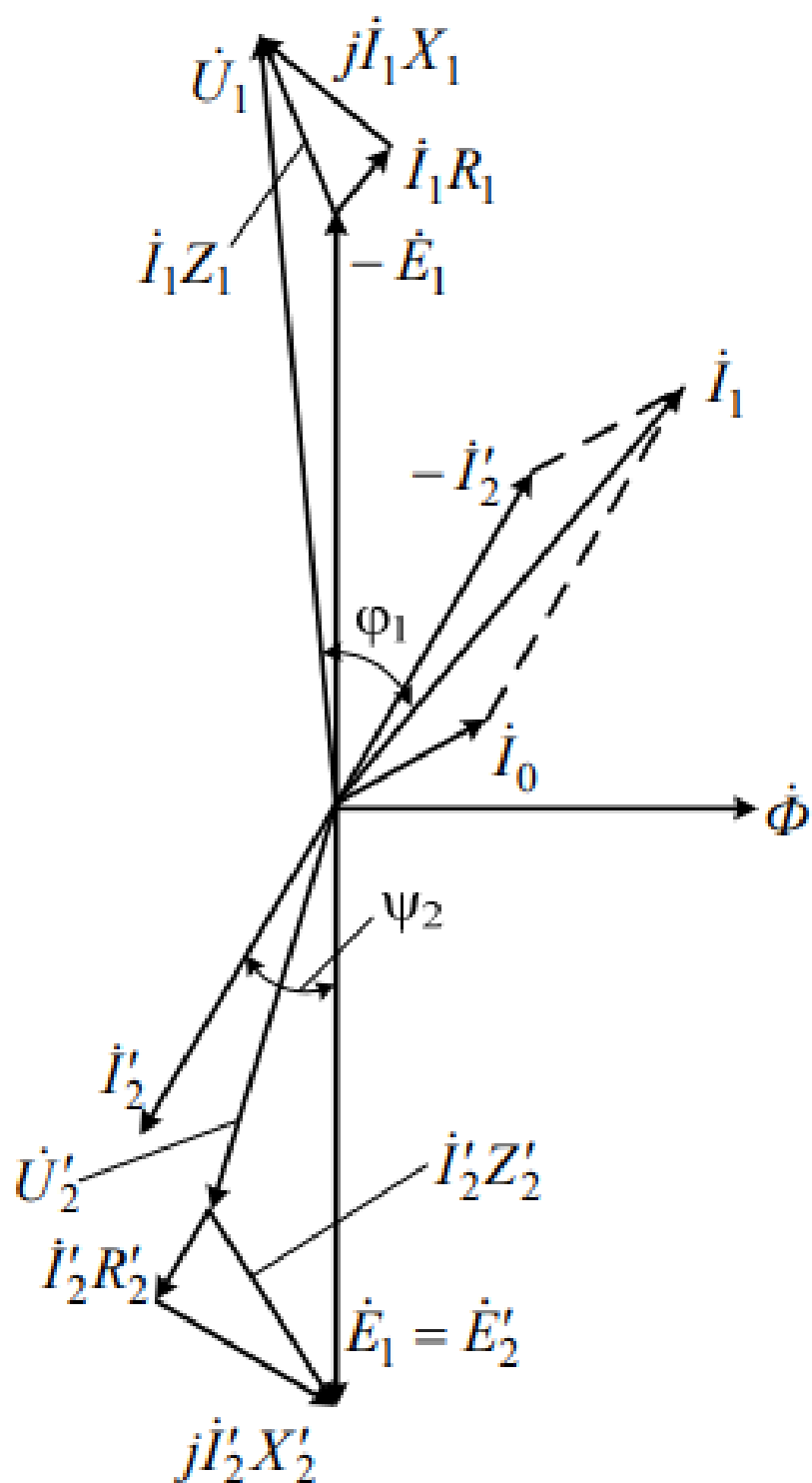


Рисунок 1.3 – Векторна діаграма АМ при загальмованому роторі в режимі навантаження



Система рівнянь може бути записана у вигляді

$$\begin{cases} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 = \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1; \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 R'_2 - j\dot{I}'_2 X'_2; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2, \end{cases} \quad (1.12)$$

де  $\dot{I}_1$  – струм, що протікає по обмотці статора;

$\dot{U}'_2$  – напруга обмотки ротора, приведена до обмотки статора;

$\dot{E}'_2$  – ЕРС обмотки ротора, приведена до обмотки статора;

$\dot{I}'_2$  – струм, що протікає по обмотці ротора, приведений до обмотки статора;

У АМ є обертове магнітне поле, що змінює спосіб взаємодії струмів, що протікають по обмотках статора та ротора. Дослідження даних процесів показало, що умовою роботи АМ є рівність магніторушійних сил ротора та статора. Звідси випливає ще одне твердження: кількість пар полюсів статора та ротора повинна бути однакою, тобто  $p_1 = p_2$ . У таких ситуаціях магніторушійні сили статора та ротора не рухаються один від одного, і їхня взаємодія дозволяє передавати потужність від статора до ротора. Тим не менш, число фаз обмоток статора  $m_1$  і ротора  $m_2$  може бути будь-яким у цьому випадку. Наприклад, квадратний метр в АД з КР еквівалентний кількості стержнів білячої клітки.

$$\Delta p_{ел2} = sP_{ем}, \quad (1.12)$$

$$P_{мх} = (1 - s)P_{ем}. \quad (1.13)$$

З останніх виразів можна зробити висновок, що мінімальне ковзання  $s$  необхідно для зменшення  $p_{ел2}$  і підвищення ККД.

Потужність ковзання — це термін, який використовується для опису сили, яка генерується у вторинному колі АД:

Електромагнітний момент можна записати через електромагнітну

потужність:

$$M = \frac{P_{em}}{\omega}, \quad (1.14)$$

Для цієї формули будуть наступні параметри заміщення

$$M = \frac{m_1 U_1^2 \frac{R'_2}{s}}{\omega_1 \left[ \left( R_1 + C_1 \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + C_1 X'_2)^2 \right]} \quad (1.15)$$

Згідно з формулою переміщення, електромагнітний момент  $M$  при будь-якому заданому значенні ковзання  $s$  пропорційний квадрату прикладеної напруги  $U_1$  і менший, чим більший  $R_1$  і індуктивні опори розсіювання машини. Коли струм кола ротора використовується для визначення  $M$ ,

Критична частота - це частота обертання пкр, при якій АД створює максимальний момент  $M_{max}$ . Відповідно, критичне ковзання скр — це ковзання, при якому досягається  $M_{max}$ . Для деякого приводного двигуна АМ переходить у генераторний режим (рекуперативний), де ковзання від'ємне  $s < 0$ , коли частота обертання  $n > n_1$ . У двигунному режимі зміна ковзання від 1 (нерухомий стан) до 0 (досягнення синхронної частоти обертання). Якщо змінити чергування двох фаз обмотки статора під час роботи АМ в двигунному режимі, машина автоматично перейде в режим протимикання, також відомий як режим електромагнітного гальмування. У цьому режимі зміна напрямку обертання ротора  $n < 0$  і ковзання, більше одиниці  $s < -1$ .

Частота обертання  $n = 0$  у нерухомому режимі та частота ковзання  $s = 1$  у пусковому моменті  $M_p$ . Момент  $M$  збільшується разом із скр, коли ковзання збільшується від  $s = 0$  до  $s = скр$ . Коли ковзання збільшується далі, момент  $M$  зменшується. Цей тип механічної характеристики пояснюється

тим, що струм  $2I$  стає все більш індуктивним зі збільшенням  $s$ . Отже, активна складова  $2I$ , яка визначає величину  $M$ , спочатку збільшується разом з  $2I$ , а потім зменшується при збільшенні  $s$ , незважаючи на збільшення  $2I$ . Крім того, слід враховувати, що коли  $\Pi$  збільшується, спад напруги в первинному колі збільшується. У результаті ЕРС  $E_1$  і потік  $\Phi$  трохи зменшуються, коли створюється момент. нераторного. Критичне ковзання можна виразити і через перевантажувальну здатність  $\lambda = M_{max} / M_{ном}$ :

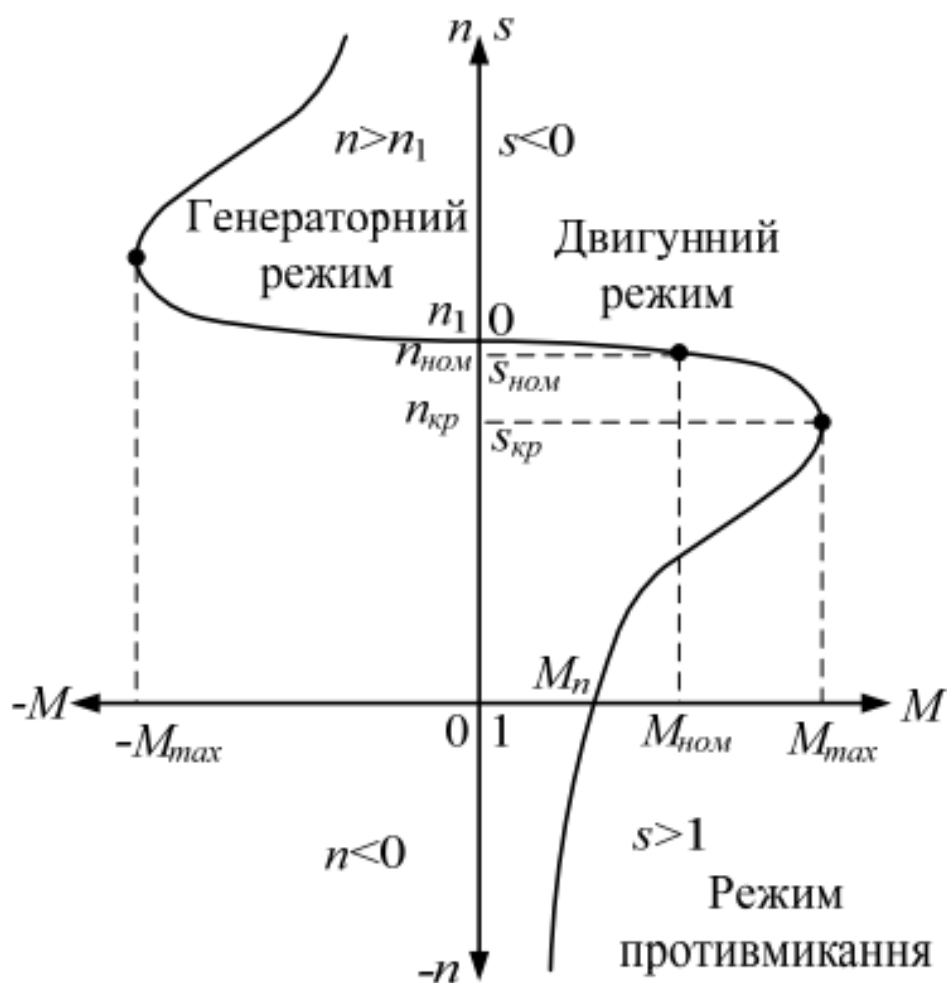


Рисунок 1.4– Механічна характеристика

Стійкий режим роботи електродвигуна означає, що він може відновити усталену частоту обертання після короточасних збурень, викликаних змінами навантаження або напруги живлення. Для початку розглянемо умови, при яких автономне керування буде працювати в



стійкому режимі. Рівень руху електродвигуна можна записати таким чином:

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.16)$$

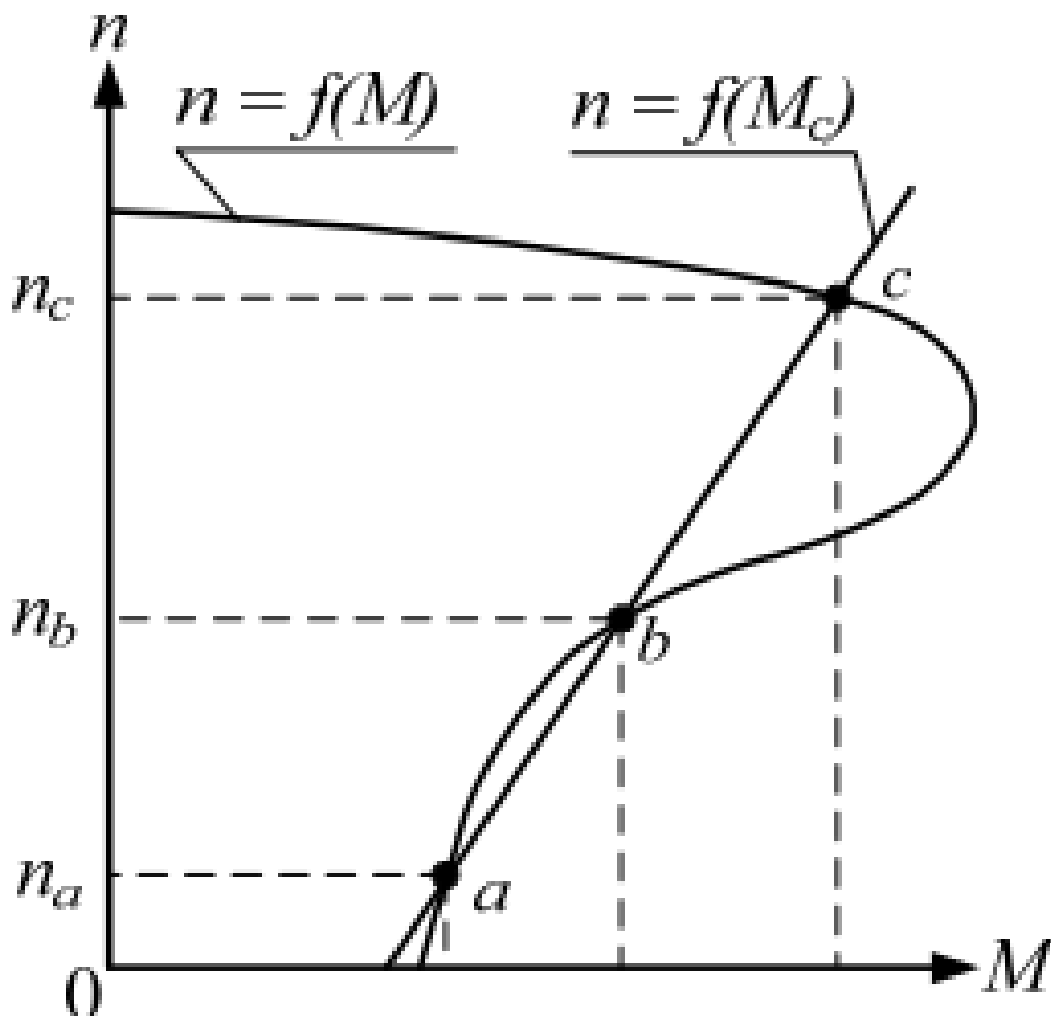


Рисунок 1.5– Визначення стійкості АД

Двигуни переходять з нерухомого стану в робочу точку з частотою обертання  $n_a$ . Припустимо, що частота обертання зменшилася через вплив зовнішніх факторів, тобто  $n < n_a$ . У цьому випадку  $M$  більше  $M_c$ , що означає, що двигун прискорюється до частоти обертання  $n_a$  (точка  $a$ ). Якщо, з деяких причин, при роботі АД в точці  $a$  частота обертання збільшиться, тобто  $n > n_a$ , ми матимемо  $M < n_b$  і отримаємо  $M < n_b$ , що означає, що  $M > M_c$ . Після цього двигун почне збільшувати швидкість до частоти обертання  $n_c$ . АД

буде діяти так само, як і в точці а, коли частота обертання  $n \in \epsilon$ . З викладеного випливає, що лише точки а і с із трьох можливих робочих точок будуть стійкими. З іншого боку, робота в точці b буде нестійкою.

Режим роботи в точці а на практиці неприйнятний через високий струм в обмотках, низьку частоту обертання та поганий ККД. У результаті двигун швидко перегрівается та виходить з ладу. З вищезазначеного випливає, що точка с є єдиною стійкою точкою роботи АД за даного навантаження .

У встановлених умовах ( $M_{дин} = 0$ )  $M = M_c$ . Коли  $M$  більше  $M_c$ , то динамічний момент  $M_{дин}$  більше 0, а  $\dot{t}$  більше 0, що вказує на те, що двигун збільшує свою швидкість. Двигуни сповільнюються, коли  $M < M_c$  і динамічний момент  $M_{дин} < 0$ , тобто  $\dot{t} < 0$ . Механічні характеристики електродвигуна  $n = f(M)$  повинні бути розташовані в одній системі координат, щоб дізнатися, чи може він працювати на те чи інше навантаження з механічною характеристикою  $n = f(M_c)$ . У ситуації, коли характеристики  $n = f(M)$ ,  $n = f(M_c)$  перетинаються в точці 1 Теоретичних відомостей про АМ 41, електродвигун має здатність витримати даний момент статичного навантаження. Час від часу є кілька робочих точок. Наприклад, на зображенні 1.5 їх три.

Робочі характеристики двигуна включають частоту обертання  $n$  (або ковзання  $s$ ), момент на вал  $M_2$ , струм статора  $I_1$ , коефіцієнт потужності  $\cos \phi_1$ , ККД  $\eta$  та потужність  $P_1$ , споживану з мережі, якщо  $U_1 = \text{const}$  та  $f_1 = \text{const}$  від корисної потужності на вал  $P_2$ . На рисунку 1.6 показано близький до них вигляд.

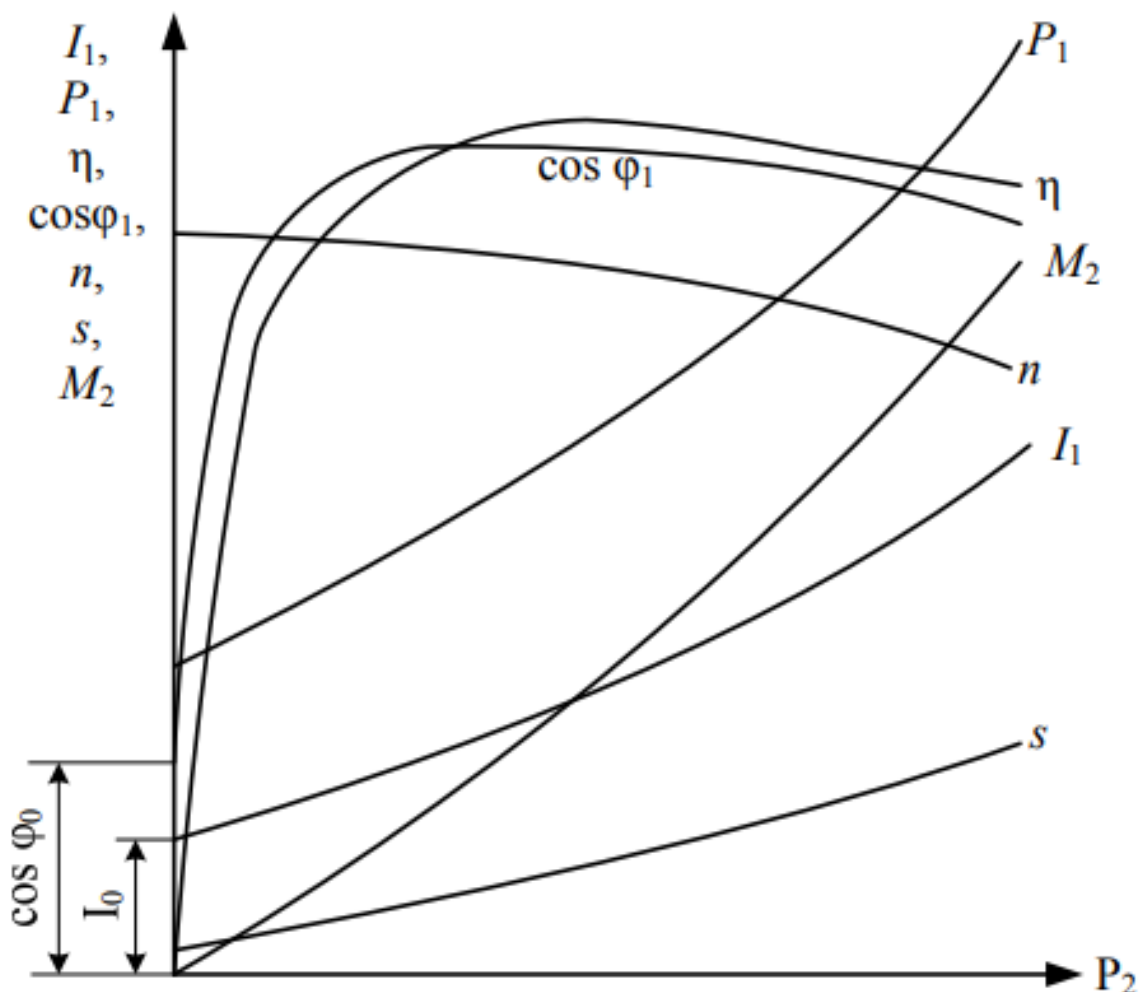


Рисунок 1.6– Робочі характеристики АД

При роботі на холостому ході, коли  $P_2 = 0$  та  $M_2 = 0$ , АД споживає струм  $I_1 = I_0$  з мережі, щоб створити основне магнітне поле. Підвищений струм холостого ходу  $I_0 = (25-30)I_{1\text{ном}}$  виникає через повітряний зазор між ротором і статором. Потужність  $P_1$ , яку мережа споживає при холостому ході, покриває втрати всередині машини, які складаються з механічних втрат, магнітних втрат статора та електричних втрат обмотки статора. У цьому випадку є коефіцієнт потужності  $\cos\theta$  і початкове ковзання  $s$ . При збільшенні навантаження частота обертання  $n$  починає знижуватися. Це пов'язано з тим, що збільшення електромагнітного моменту  $M$  призводить до збільшення ковзання  $s$ , а також до підвищення електромагнітної енергії ( $E_2s = E_2s$ ) в обмотці ротора. В результаті в обмотці ротора збільшується



струм  $I_2$ . Ця залежність міцна, оскільки немає значного падіння частоти обертання при збільшенні навантаження. Завдяки збільшенню ковзання  $s$  відставання ротора від магнітного поля збільшується.

Залежність  $M = f(P_2)$  зростає майже прямолінійно. З-за того, що частота обертання  $n$  зменшується зі збільшенням навантаження, вона дещо витягнута вперед. Залежності  $P_1 = f(P_2)$  і  $I_1 = f(P_2)$  є криволінійними з верхнім згином. Це пов'язано зі збільшенням втрат в обмотках двигуна під час навантаження. Коли постійні та змінні втрати двигуна однакові, залежність  $\eta = f(P_2)$  досягає максимального значення під навантаженням. Індуктивний опір ротора  $X_2$  буде незначним, а струм ротора  $I_2$  практично активний при малих навантаженнях ковзання  $s$ . Кут зсуву  $\phi_1$  між струмом  $I_1$  та напругою  $U_1$  буде зменшуватися зі збільшенням навантаження, що призводить до збільшення залежності  $\cos\phi_1 = f(P_2)$ . Навантаження ковзання  $s$  і частота індукованої ЕРС  $E_2$  в роторі збільшуватимуться, що призведе до збільшення індуктивного опору обмотки ротора  $X_2$ . У результаті реактивна складова струму ротора та статора збільшиться, а  $\cos\phi_1$  зменшиться. Аналітичним шляхом, експериментальним шляхом або розрахунками з використанням схеми заміщення або кругової діаграми визначають робочі характеристики.

Найпоширеніший спосіб керування АД це частотне керування обертання АД частота обертання ротора АД.

$$n = n_1(1 - s) \quad (1.17)$$

Відповідно до попередньої формули методи регулювання частоти обертання АД поділяються на два види. Перший клас включає регулювання частоти обертання первинного магнітного поля, яке досягається або зміною числа пар полюсів двигуна  $p$ , або регулюванням первинної частоти  $f_1$ . Другий клас включає регулювання ковзання двигуна  $s$ , якщо  $p_1 = \text{const}$ . У першому випадку ККД двигуна залишається високим, але в другому

випадку збільшення  $s$  призводить до зниження ККД, оскільки потужність ковзання  $P_s = sP_{em}$  витрачається даремно у вторинному колі двигуна.

У цьому методі регулювання частоти обертання зміненням  $f_1$  вимагає наявності джерела живлення, яке має регульовану частоту  $f_1$ . Такими джерелами можуть бути синхронні генератори або перетворювачі частоти.

Збільшення номінального магнітного потоку призводить до збільшення насичення магнітного кола та значного збільшення струму намагнічування, тоді як зменшення магнітного потоку призводить до недовикористання машини, зменшення перевантажувальної здатності та збільшення струму  $I_2$  при тому самому значенні  $M$ . Отже, при регулюванні 1 Теоретичні відомості про АМ 63 п небажано значне змінення  $\Phi$ . Отже, умова  $\Phi = \text{const}$  повинна виконуватися. Зважаючи на це, співвідношення вказує на те, що крім регулювання частоти  $f_1$  пропорційно їй також потрібно змінювати напругу  $U_1$ , тобто підтримувати.

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \quad (1.18)$$

Це правило можна порушити лише тоді, коли  $M_c$  швидко зменшується зі зменшенням  $n$ . Прикладом цього є приводи вентиляторів, коли  $M_c = n^2$ . У широкому діапазоні регулювання підтримка  $\Phi = U_1/f_1 = \text{const}$  є найкращою.

Рисунок 1.7 показує механічні характеристики АД при регулюванні частоти обертання з  $M_{\text{макс}} = \text{const}$ . Якщо регулювання здійснюється за допомогою постійної потужності  $P_2$ , момент  $M_{\text{макс}}$  повинен змінюватися пропорційно частоті обертання, а також  $f_1$ :

$$\frac{M_{\text{макс}(2)}}{M_{\text{макс}(1)}} = \frac{\omega_{(1)}}{\omega_{(2)}} = \frac{f_{1(1)}}{f_{1(2)}} \quad (1.19)$$

Після деяких перетворень можна отримати закон змінення напруги при регулюванні частоти обертання з постійною потужністю механічні характеристики для цього випадку наведені на рисунку 1.8

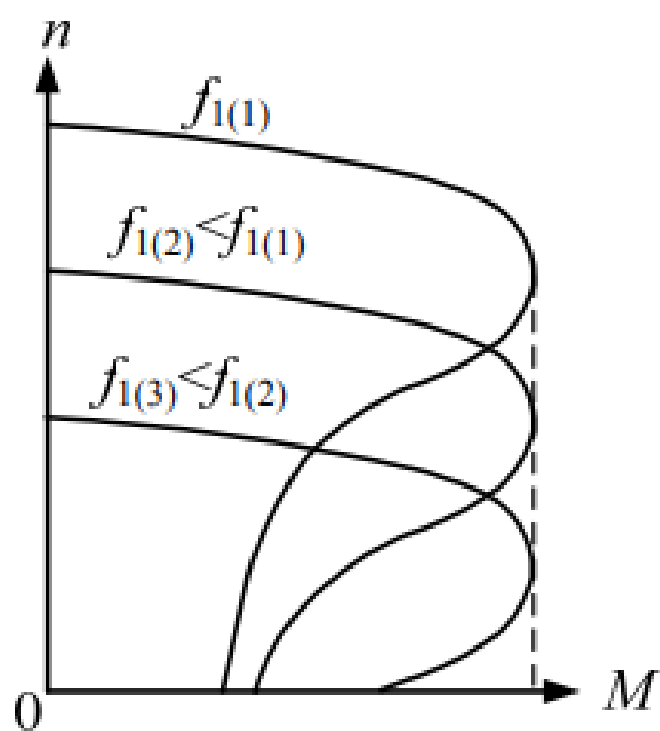


Рисунок 1.7– Механічні характеристики  $f_1$  і  $M = \text{const.}$



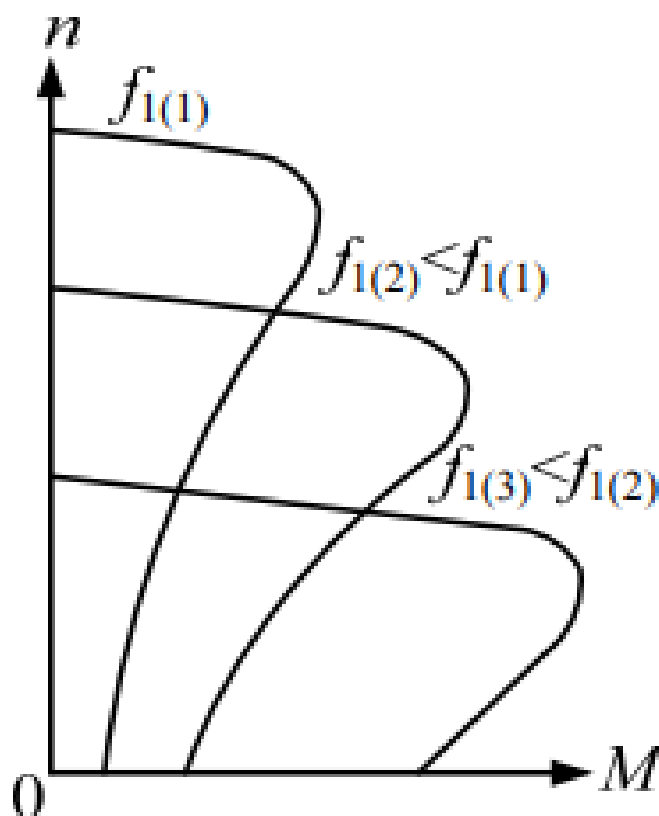


Рисунок 1.8– Механічні характеристики АД  $P_2 = \text{const}$

Переваги частотного регулювання включають високий пусковий момент (рівний критичному), плавність і точність.

Недостатності цього методу регулювання включають високу вартість і складність управління. Незважаючи на згадані недоліки, частотне регулювання сучасних електроприводів поступово перевершує всі інші види регулювання.

Електрична потужність ковзання  $P_s$  губиться в реостаті при реостатному регулюванні. Приєднання приймача електричної енергії як допоміжної електричної машини до контактних кілець АД з ФР дозволяє її використовувати та одночасно підвищувати ККД установки. У результаті обертання допоміжної машини в якорі індукуються ЕРС, коли машина працює в режимі двигуна. Це впливає на регульований асинхронний двигун, створюючи напругу на його вторинних затисках. Додаткова ЕРС дозволяє плавне регулювання швидкості обертання двигуна в двох зонах (вниз і вверх

від синхронної) шляхом зміни її значення та напрямку. У каскадних з'єднаннях двигуна використовуються допоміжні електричні машини для реалізації розглянутого методу регулювання швидкості обертання АД за допомогою додаткової ЕРС. Асинхронний каскад — це поєднання АД з перетворювальною установкою або з перетворювальною установкою та допоміжним двигуном. Асинхронні каскади в даний час використовуються переважно напівпровідниковими перетворювачами, тому їх часто називають вентильними каскадами або асинхронновентильними каскадами (АВК). Розглянемо АВК, який використовує машину постійного струму. АД з ФР М1 керує деяким виробничим механізмом (ВМ), як показано на рисунку 1.9 у схемі АВК. Випрямляч містить діоди VD1–VD6 і з'єднаний до обмотки ротора АД за трифазною мостовою схемою. Випрямляч подається на обмотку якоря двигуна постійного струму (ДПС) М2, а потім на обмотку збудження двигуна подається постійна напруга  $U_z$ .

ЕРС якоря ДПС у цьому конкретному випадку є додатковою ЕРС, розглянутою вище, яка вводиться у вторинне коло АД за допомогою випрямляча. Струм збудження ДПС регулюється для регулювання цієї ЕРС і швидкості обертання АД. ДПС знаходиться на валі живлення і перетворює потужність ковзання  $P_s$  з вторинного кола живлення в механічну потужність. Ця потужність передається ВМ через вал живлення разом із механічною потужністю ДПС. Такий тип каскаду відомий як електромеханічний. На рисунку 1.9 показана схема АВК, яка відрізняється від попередньої рисунком 1.10, оскільки ДПС М2 з'єднано механічно з допоміжною машиною, яка може бути синхронною або асинхронною. У цьому каскаді М3, який працює в режимі генератора, передає потужність ковзання  $P_s$  у мережу змінного струму при  $s > 0$ . При  $s=0$  М3 він працює як двигун. Такий тип каскаду відомий як електричний. У цьому каскаді ВМ отримує лише механічну потужність АД.

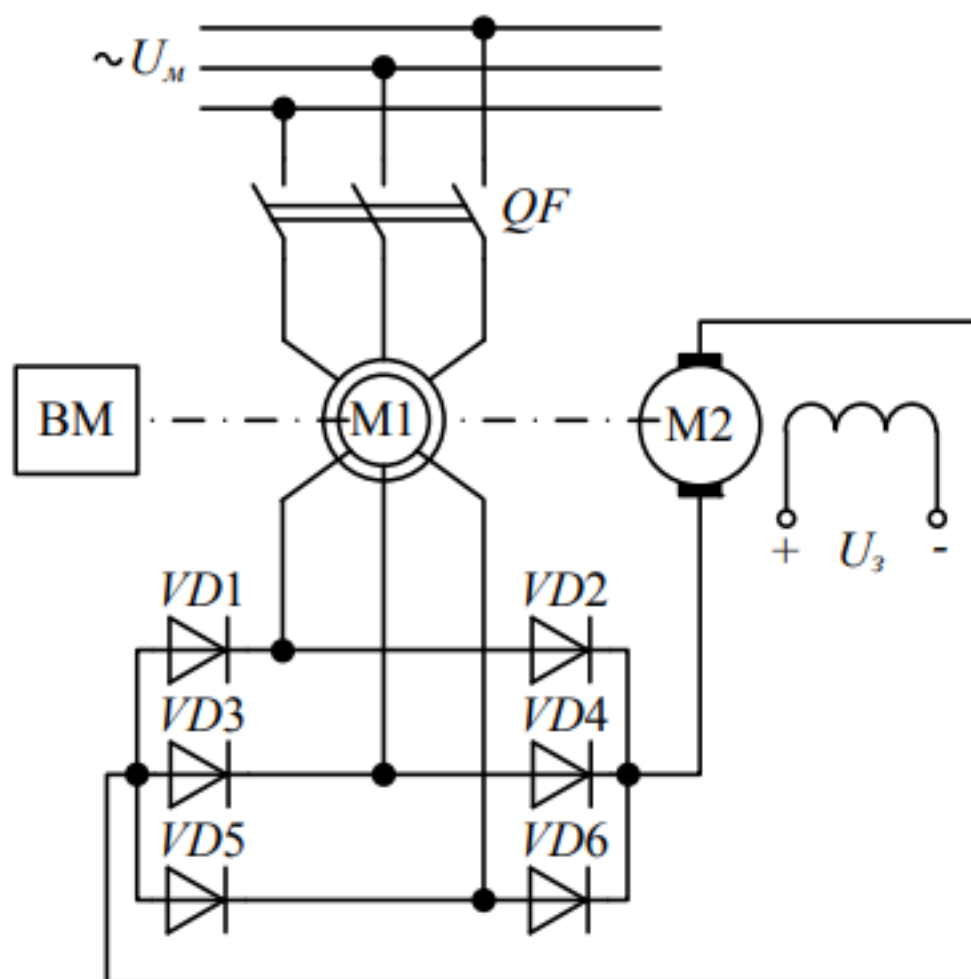


Рисунок 1.9– Схема електромеханічного АВК з ДПС



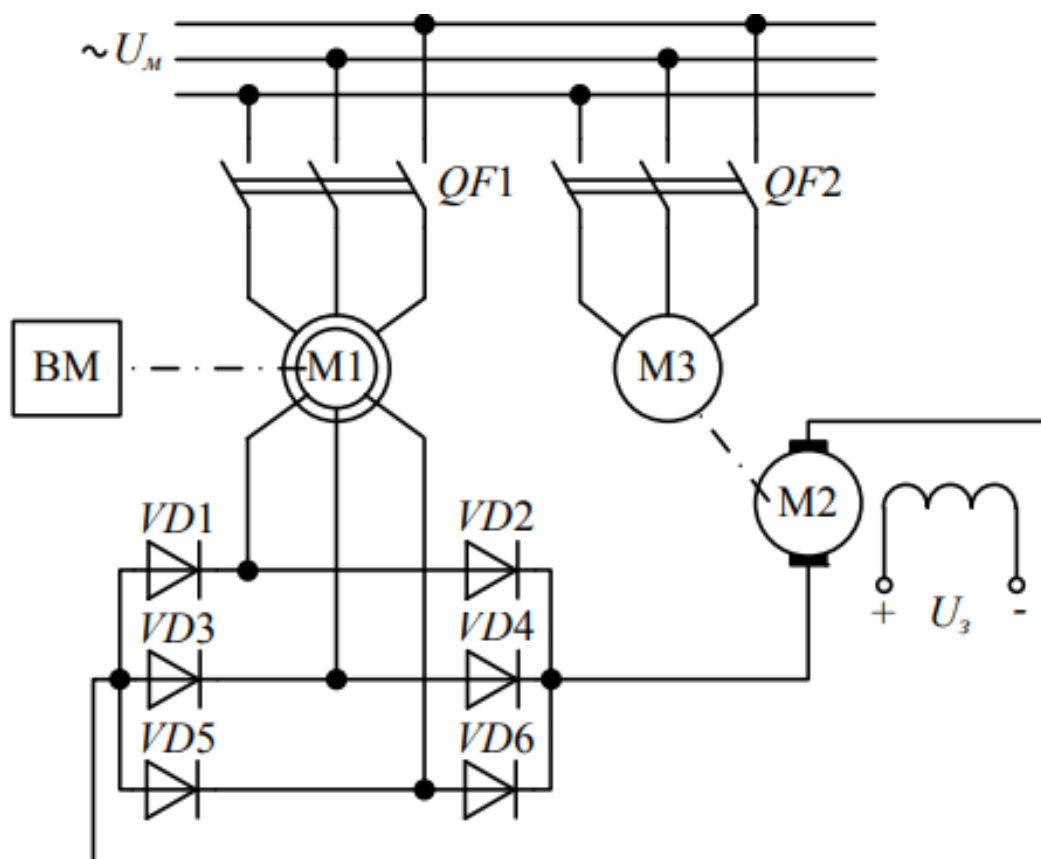


Рисунок 1.10– Схема електричного АВК з ДПС

Однак установка допоміжних машин і перетворювачів коштує більше, ніж каскадна регулювання швидкості обертання АД. Таким чином, каскади не можна використовувати для приводу великих виробничих механізмів, які вимагають досить широкого регулювання швидкості.

Електричне гальмування протимиканням відбувається, коли зовнішній момент обертає ротор проти магнітного поля машини. Перемкнувши дві фази обмотки статора під час роботи двигуна, можна досягти цієї умови. У цьому випадку магнітне поле миттєво змінює свій напрям обертання на протилежний, що викликає гальмівний момент у машині, який діє назустріч руху ротора, а двигун продовжує обертатися за інерцією. Таким чином ротор почне загальмовуватися. Крім того, якщо машину не відключити від мережі при частоті обертання  $n = 0$ , то АД розгойдується в протилежному напрямі.

Такий процес, коли двигун змінює напрямок обертання, називається

реверсом. Продовження двигунного режиму (ДР), яке розташоване в першому квадранті, переходить у четвертий рисунок 1.11, є механічною характеристикою АД при гальмуванні протимиканням (ГП). Діапазон зміни ковзання від  $s = 1$  до  $s = 2$  відповідає цьому режиму. 1 Значення теорії АМ 71 Реостат вмикається для обмеження великого струму в АД з ФР в коло ротора під час гальмування. Недолік гальмування протимиканням: підвищене споживання електроенергії з мережі та потенційне перегрівання обмоток двигуна через підвищені ЕРС ротора  $E_{2s}$  та ковзання  $s$ . Такий процес, коли двигун змінює напрямок обертання, називається реверсом. Продовження двигунного режиму (ДР), яке знаходиться в першому квадранті, переходить у четвертий рисунок 1.11, є механічною характеристикою АД при гальмуванні протимиканням (ГП). Діапазон зміни ковзання від  $s = 1$  до  $s = 2$  відповідає цьому режиму. Теоретичні дані щодо АМ 71 Реостат вмикається для обмеження великого струму в АД з ФР в коло ротора під час гальмування. Недолік гальмування протимиканням: підвищене споживання електроенергії з мережі та ймовірність перегрівання обмоток двигуна через підвищені ЕРС ротора  $E_{2s}$  та ковзання  $s$ . Рекуперативне гальмування дозволяє двигуну віддавати енергію в мережу, до якої він підключений. Якщо ротор АД розігнати під дією стороннього моменту до частоти, вищої за частоту магнітного поля, це можливо. Це означає, що  $n$  більше  $n_1$ , що означає від'ємне ковзання, яке варіюється від  $s = 0$  до  $s = -1$ . Механічні характеристики генераторного гальмування (ГМ) розташовані вище частоти обертання  $n_1$  у другому квадранті рисунок 1.11. Вона також є продовженням функції ДР.

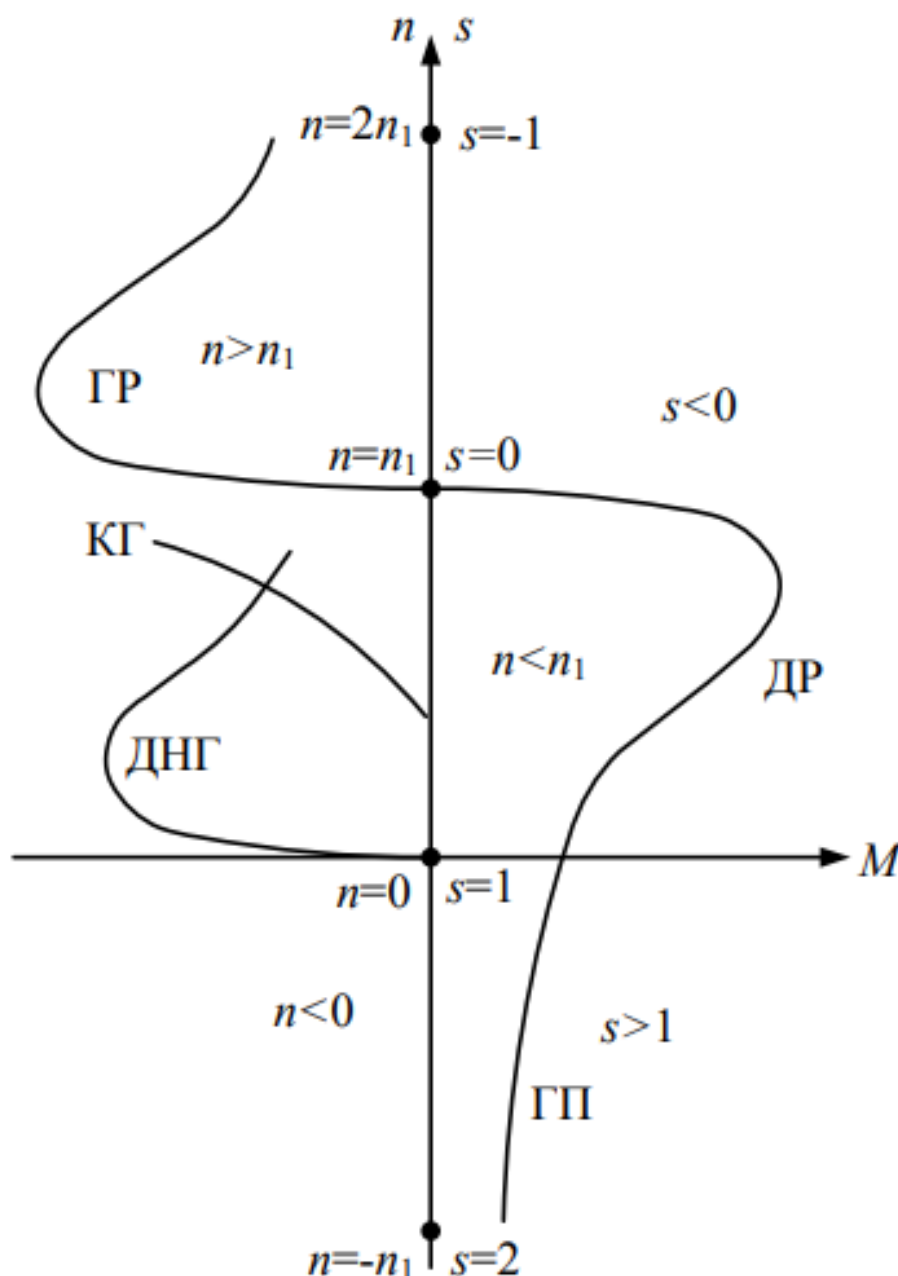


Рисунок 1.11– Гальмівні режими АД

Від'ємне ковзання збільшує максимальний момент у генераторному режимі, ніж у двигунному.

Динамічне гальмування АД відбувається, коли обмотку статора відключено від мережі змінного струму, а потім дві її фази підключені до джерела постійного струму. У цьому випадку третя фаза може не бути включена. В цьому режимі провідники обмотки ротора, що обертається, постійно перетинають просторе магнітне поле статора. У результаті

виникають індукційні струми, які при взаємодії з полем машини створюють гальмівний момент. В нижній частині другого квадранту знаходиться механічна характеристика режиму динамічного гальмування (DNG). Для гальмування АД з ФР обмотка ротора замикається на реостат. Це робиться для зменшення великих струмів і отримання різних характеристик.

Одним з важливих параметрів який впливає на вихід асинхронного двигуна на номінальні оберти є ковзання. На номінальних ковзання є сталою величиною і майже не змінюється, але під час розгону дана величина змінюється в широкому діапазоні що суттєво впливає на час розгону двигуна. В даному розділі буде показана залежність і вплив частоти мережі на ковзання асинхронного двигуна в момент розгону.

Ковзання визначають за формулою

$$S = \frac{\omega_m - \omega_p}{\omega_m} \quad (1.20)$$

де-  $\omega_m$  - кутова швидкість мережі

$\omega_p$  - кутова швидкість ротора

Кутова швидкість мережі визначається за формулою

$$\omega_m = 2\pi \times f_m \quad (1.21)$$

де –  $f_m$  частота мережі дорівнює 50 Гц

За експоненційною моделлю кутової швидкості асинхронного двигуна під час виходу на номінальні оберти отримуємо графік розгону рисунок 1.12

$$\Omega_p = \omega_m \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (1.22)$$

де-  $t$  час

$\tau$  - стала дорівнює 0,1



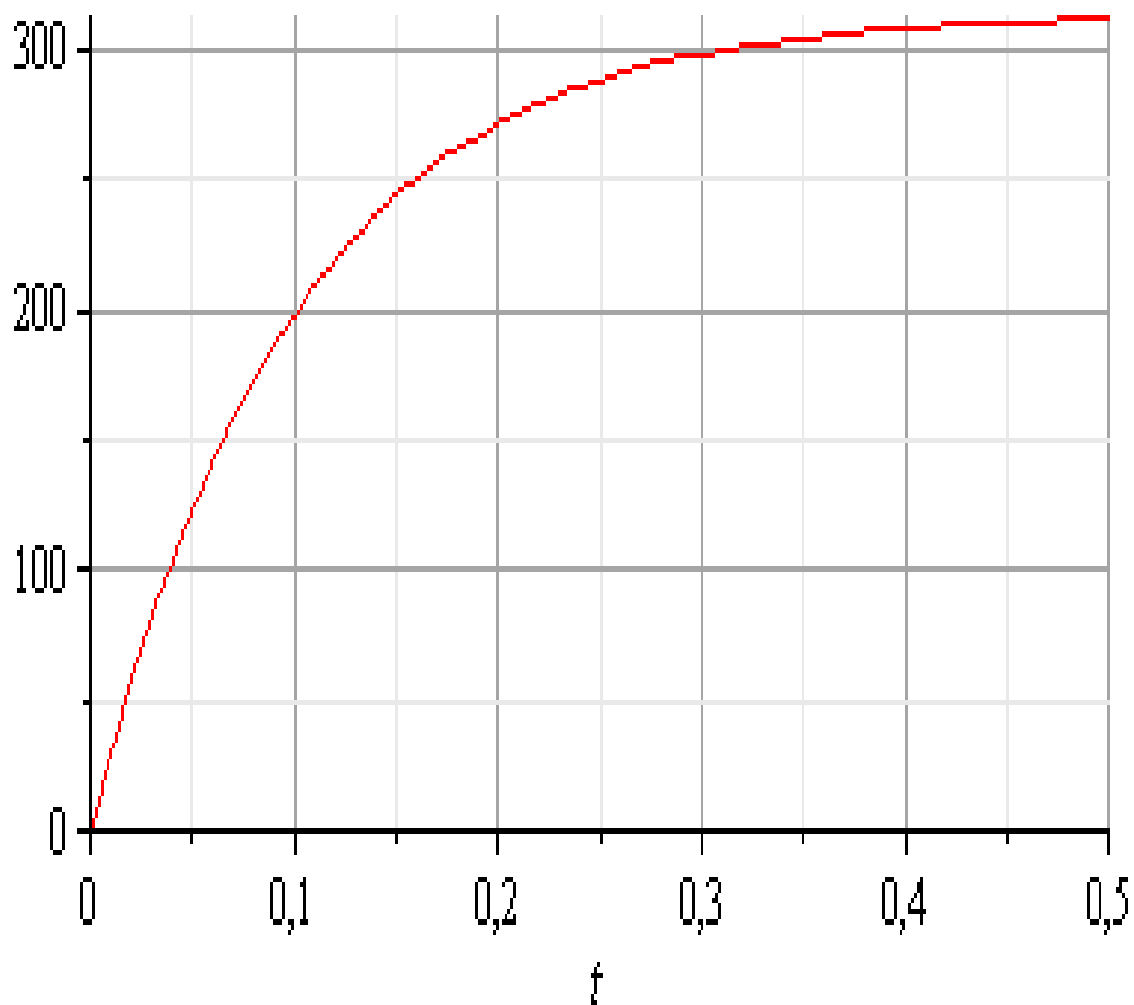


Рисунок 1.12– Графік виходу на номінальні оберти

Кутове прискорення показано на рисунку 1.13 і рахується за формулою

$$\varepsilon = \frac{d}{dt} \times (\omega_p) \quad (1.23)$$

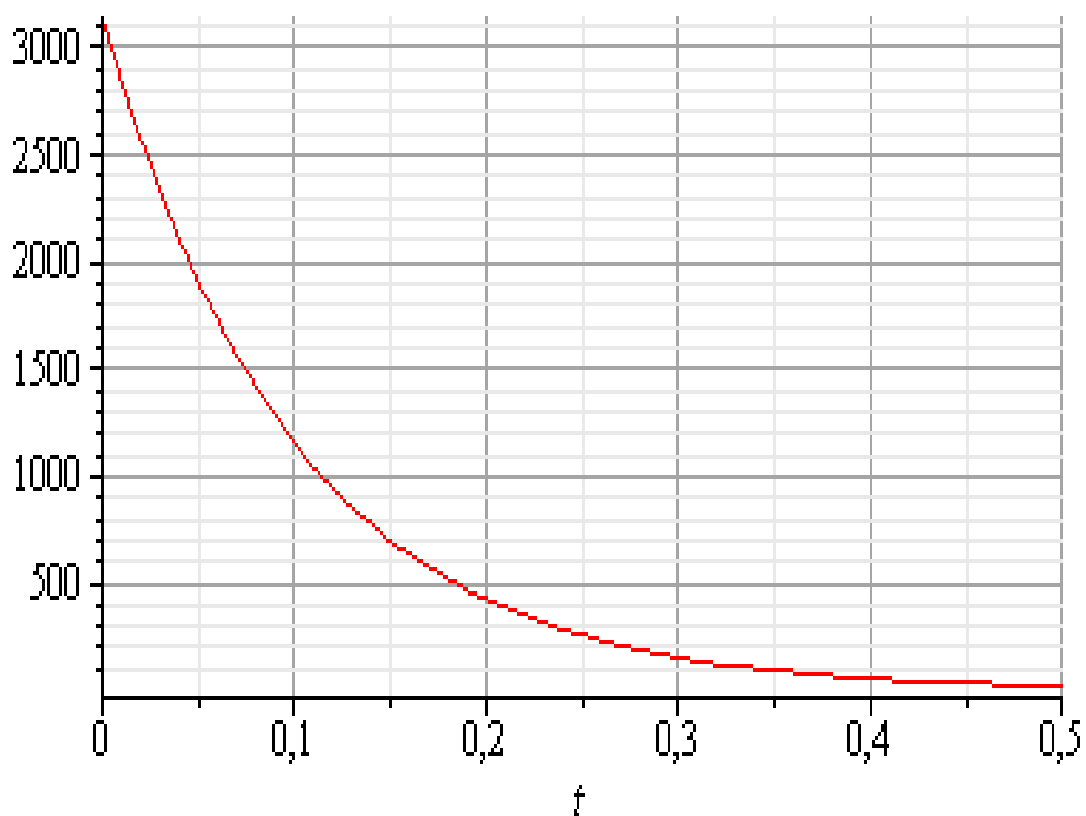


Рисунок 1.13– Кутове прискорення

Тепер підставимо в (1.1) три значення частоти номінальну, занижену і підвищену на 2 відсотка

На рисунку 1.14 показано ковзання при частоті мережі 50 Гц

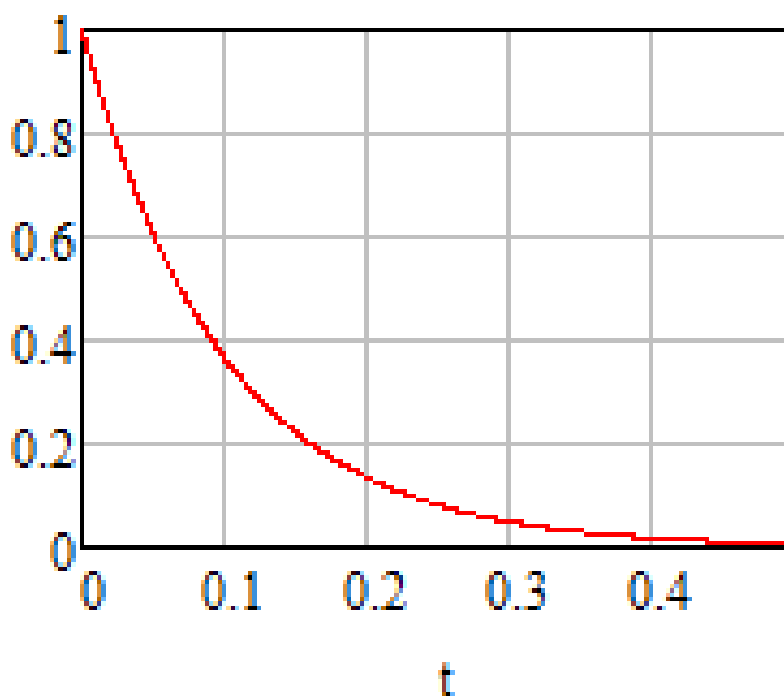


Рисунок 1.14– Ковзання при частоті мережі 50 Гц

При зміні частоти в межах допуску до 49,8 Гц ковзання зменшується, графік ковзання при частоті мережі 49,8 Гц показаний на рисунку 1.15

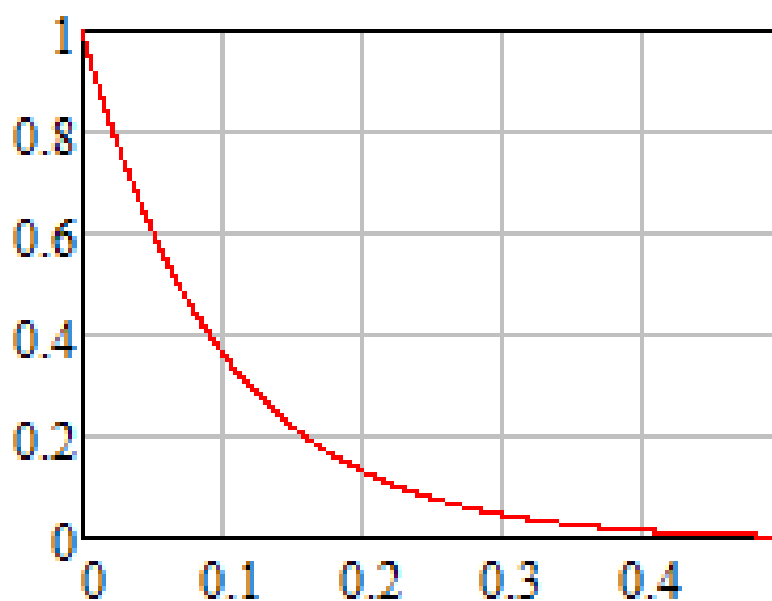


Рисунок 1.15– Ковзання при частоті мережі 49,8 Гц

При збільшенні частоти до верхньої межі 50,2 Гц ковзання зростає графік ковзання при частоті мережі 50,2 Гц показаний на рисунку 1.5

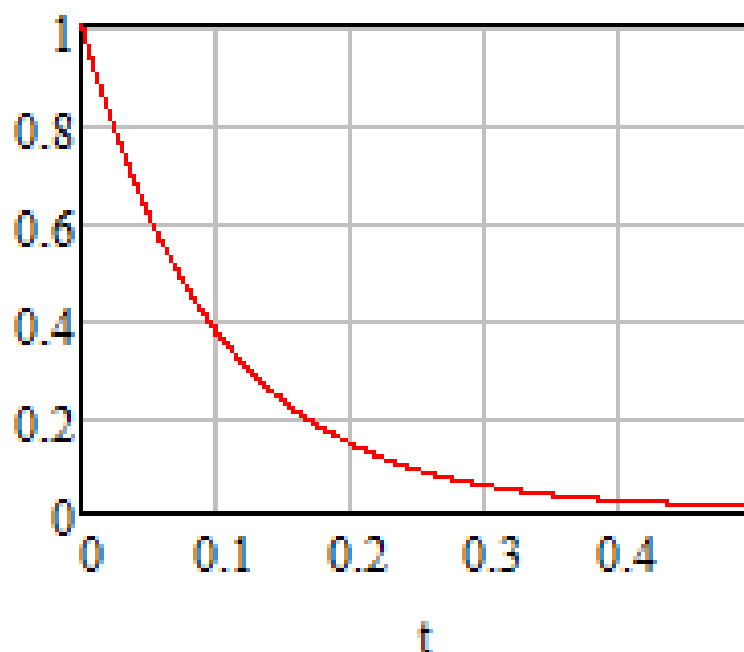


Рисунок 1.16– Ковзання при частоті мережі 50,2 Гц

## 2 ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ З ЕНКОДЕРОМ

Фотоелектричний перетворювач, як сказано в назві, перетворює світло, в електроенергію (зазвичай в вигляді двійкового коду). Такий перетворювач має найменше проблем з підключенням його до валу, так як не має прямого контакту з валом. Також він має найбільшу роздільну здатність, за рахунок швидкості світла.

Недоліками фотоелектричних перетворювачів є складність в виготовленні перетворювачів. Ця складність підвищується з більшою роздільною здатністю. З'єднавши частотний вихід фотоелектричного сенсора з входом формувача вимірювального каналу частоти миттєвих значень, отримаємо цифровий тахометр миттєвих значень рисунок 2.1

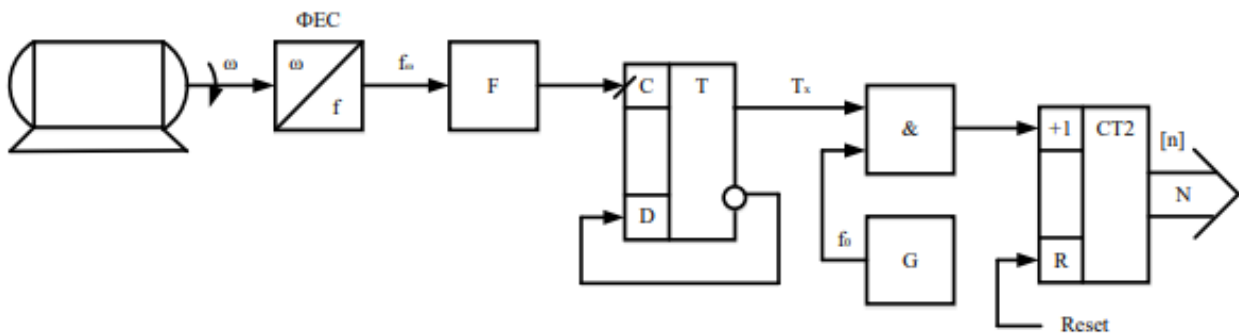


Рисунок 2.1– Цифровий тахометр миттєвих значень з енкодером

Підставивши рівняння перетворення для фотоелектричного сенсора в рівняння перетворення вимірювального каналу частоти миттєвих значень, отримаємо функції перетворення тахометра миттєвих значень.

Частота на виході енкодера обчислюється за формулою (21) і показана на рисунку 2.1

$$f_r = \frac{\omega_p \times Z}{2 \times \pi} \quad (2.1)$$



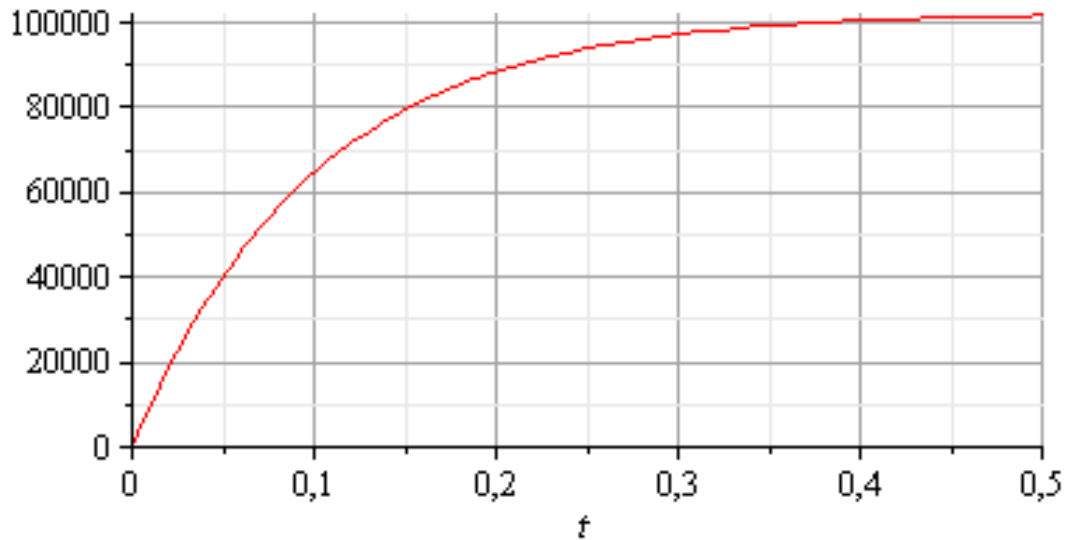


Рисунок 2.1– Частота на виході енкодера

де  $z$  кількість міток в фотоелектричному сенсорі кутової швидкості= 1000.

Кількість імпульсів на виході лічильника рахується за формулою і показана на рисунку 2.2

$$N = \frac{f_0}{f_r} \quad (2.2)$$

де  $f_0$  частота імпульсів квантування

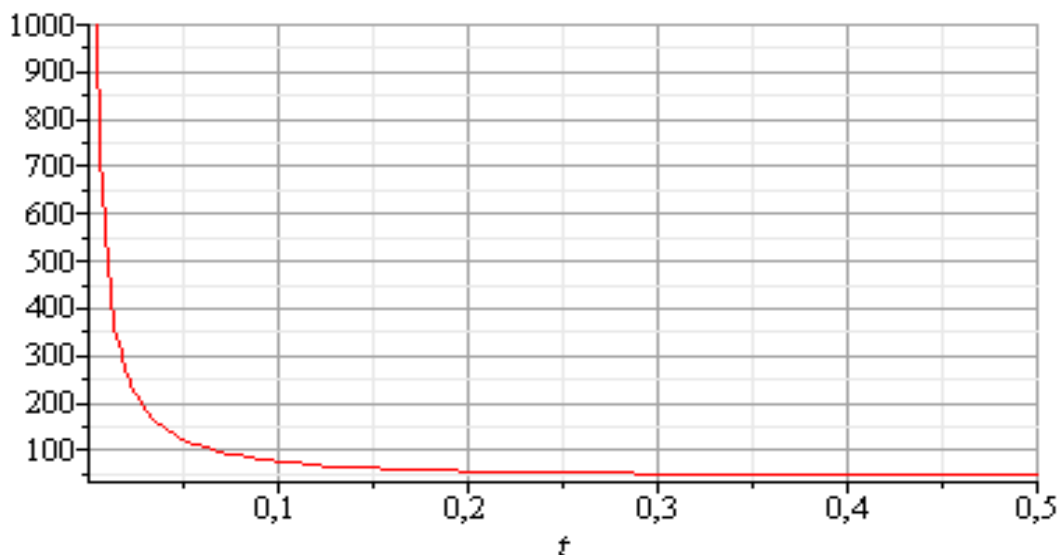


Рисунок 2.2– Кількість імпульсів на виході лічильника

Похибка квантування для середніх значень матиме наступний вигляд та показана графічно на рисунку 2.3

$$\delta_k = \frac{100}{N} \quad (2.3)$$

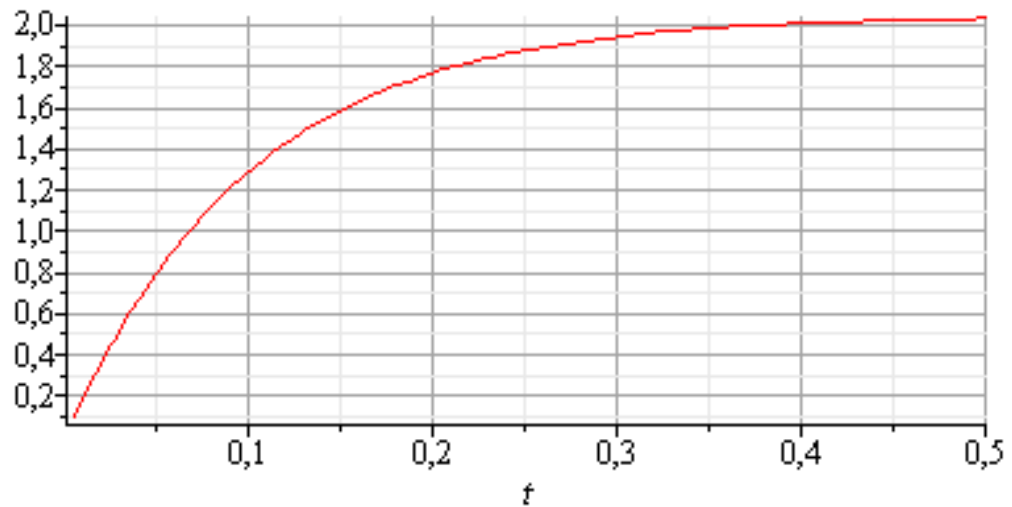


Рисунок 2.3- Похибка квантування

В наступній формулі буде порахований крок дискретизації а також показане його графічне представлення на рисунку 2.4

$$T_r = \frac{1}{f_r} \quad (2.4)$$

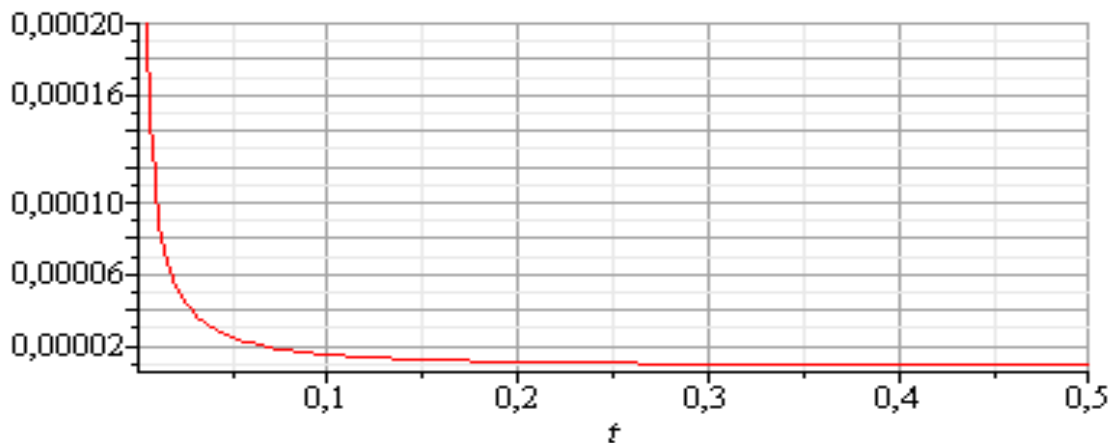


Рисунок 2.4- Крок дискретизації

Похибка дискретизації рахується за наступною формулою і показана графічно на рисунку 2.5

$$\Delta_d = \frac{1}{f_r} \quad (2.5)$$

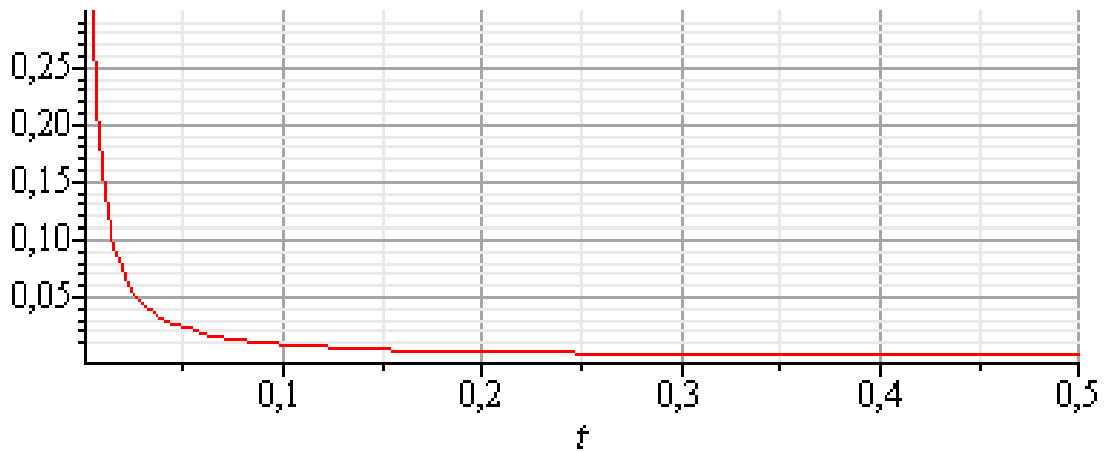


Рисунок 2.5- Похибка дискретизації

Зміна відносної похибки в часі показана в наступній формулі. Графічно зображене на рисунку 2.6, 2.7

$$\delta = \left| \frac{S1 - S}{S} \right| \times 100 \quad (2.6)$$

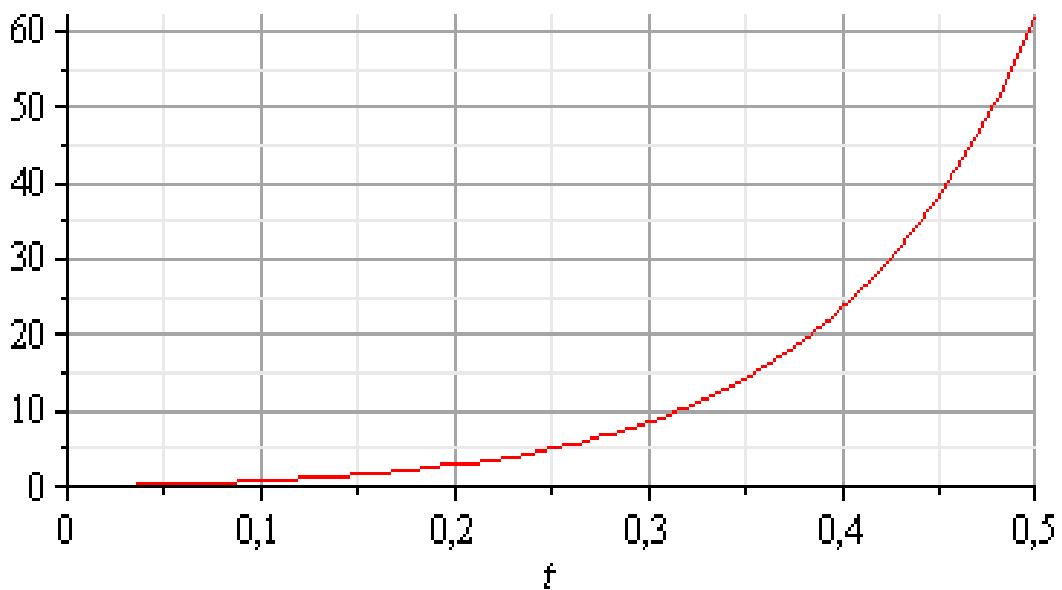


Рисунок 2.6- Зміна відносної похибки

$$\delta = \left| \frac{S2 - S}{S} \right| \times 100 \quad (2.7)$$

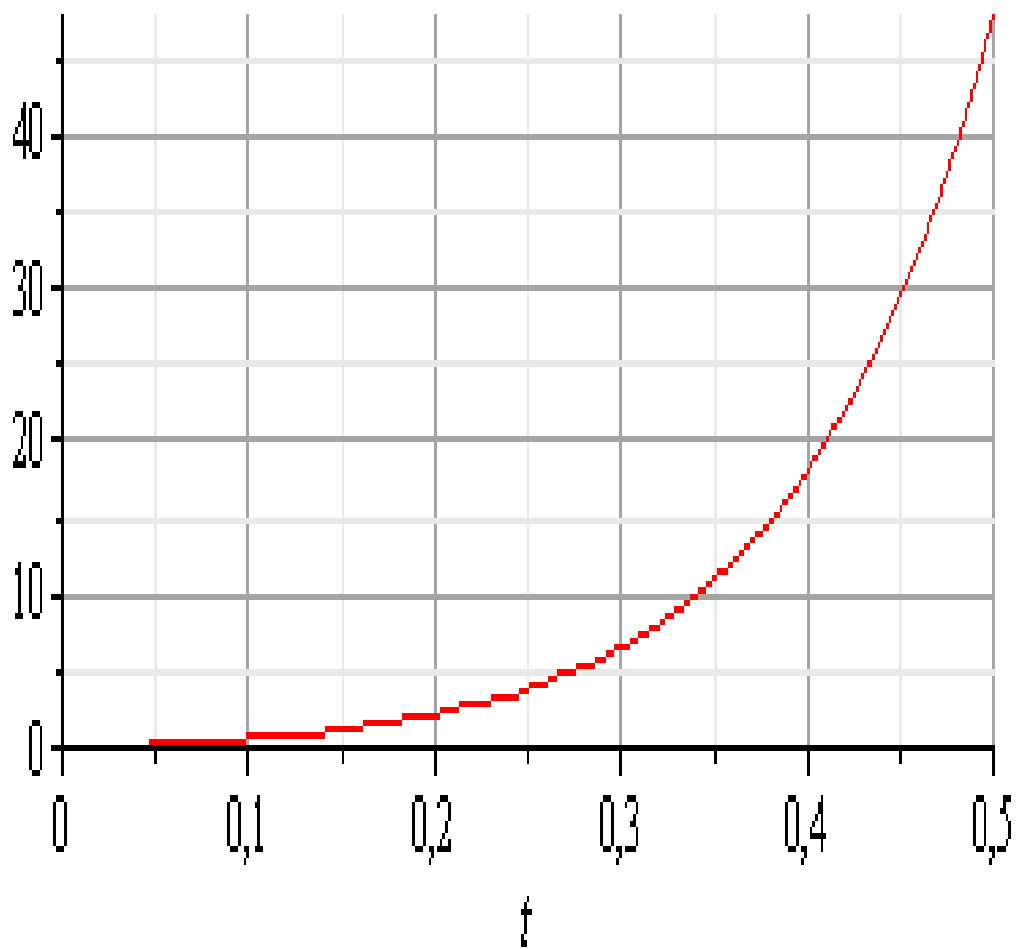


Рисунок 2.7- Зміна відносної похибки



### 3 ОГЛЯД СЕНСОРІВ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ З АНАЛОГОВИМ ВИХОДОМ

Тахогенератор – це пристрій для вимірювання швидкості обертання, за допомогою вимірювання кута повороту валу двигуна, та перетворення цієї величини в відповідну електричну напругу. Недоліком тахогенератора є наявність в конструкції щіток і колектора, що призводить до зони нечутливості, та відхилення від лінійної залежності. На рисунку 3.1 показана зміна кутової швидкості в часі

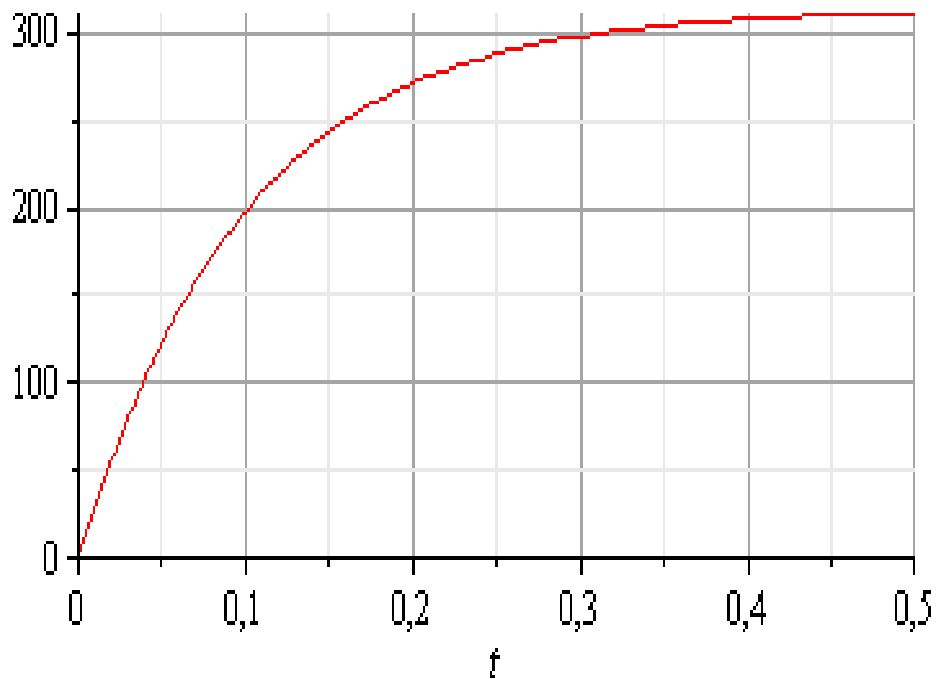


Рисунок 3.1– Зміна кутової швидкості в часі

В якості сенсору я буду використовувати тахогенератор постійного струму. Головним його параметром є зміна напруги на виході графічно зображене на рисунку 3.2

$$S_T = 3 \times 10^{-2} \quad (3.1)$$

$$U_T = S_T \times \omega_r$$

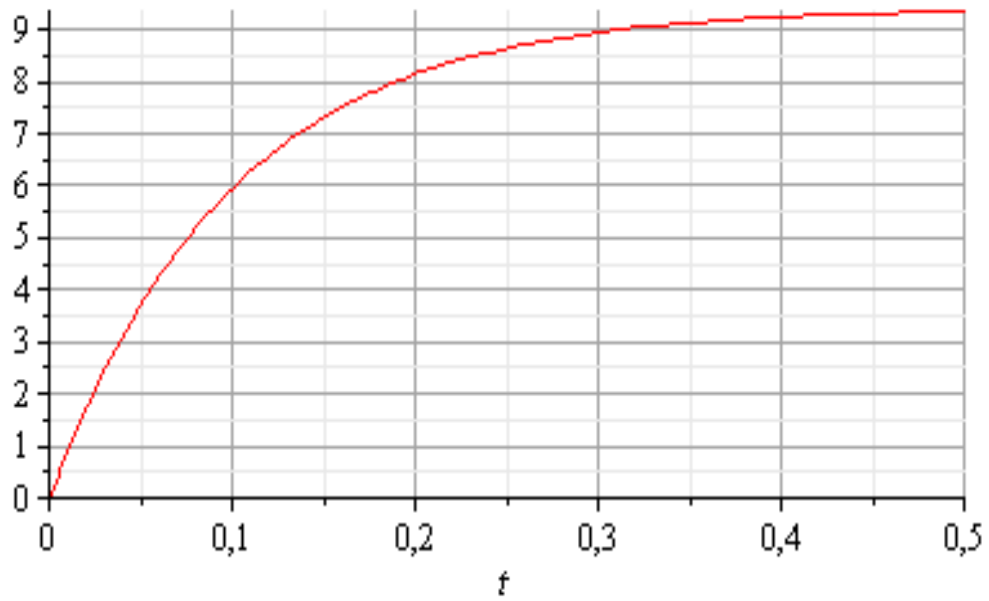


Рисунок 3.2– Зміна напруги на виході

Щоб отримати кількість імпульсів на виході 2-го лічильника рисунок 3.3 потрібно скористатися наступною формулою

$$N = \frac{U_T}{h} \quad (3.2)$$

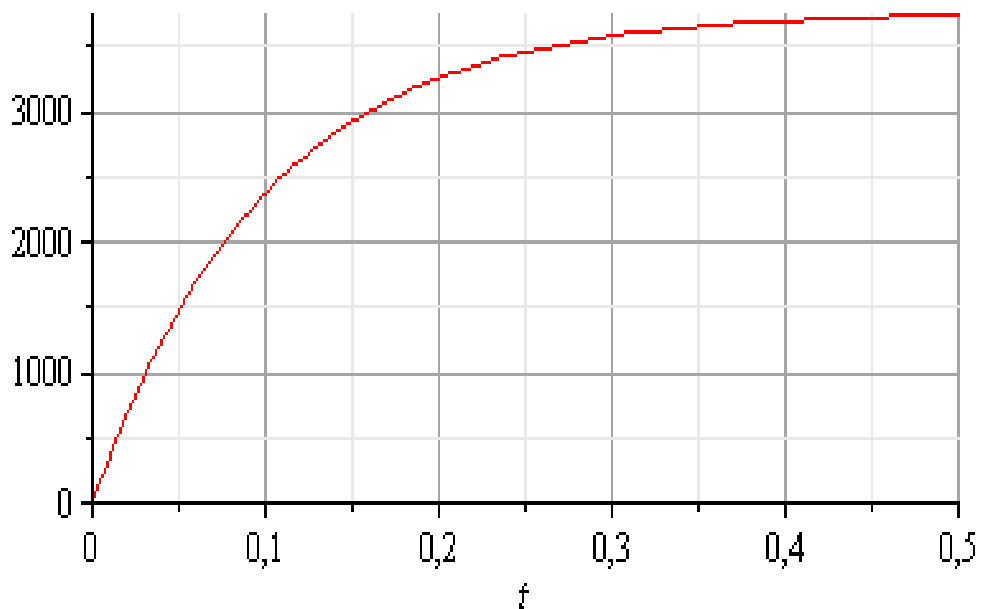


Рисунок 3.3– Кількість імпульсів на виході 2-го лічильника

Похибка квантування для середніх значень матиме наступний вигляд та показана графічно на рисунку 3.4

$$\delta_k = \frac{100}{N} \quad (3.3)$$

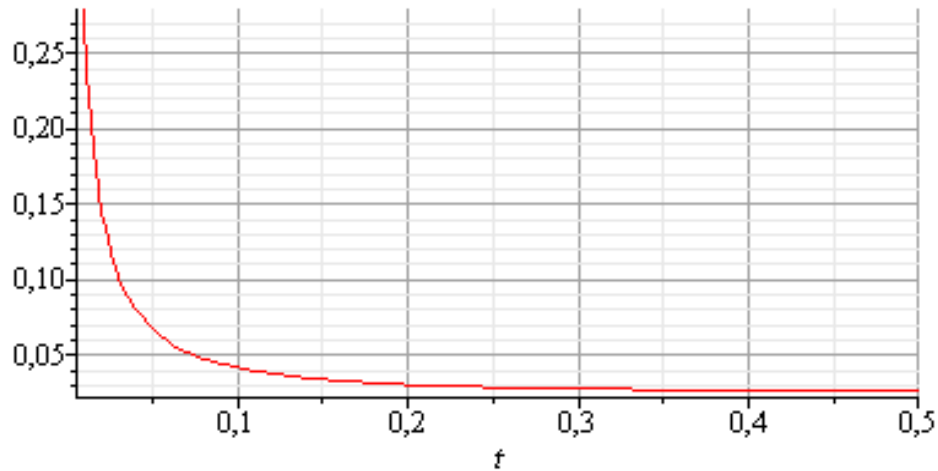


Рисунок 3.4– Похибка квантування для середніх значень

Далі необхідно перейти від обертів за хвилину на радіани у секунду за формулою

$$\omega_r = \frac{N \times h}{S_T} \quad (3.4)$$

Тепер визначимо кутову швидкість мережі

$$\omega_m = 2\pi \times f_m \quad (3.5)$$

Тепер можемо визначити ковзання за формулою графічне зображення рисунок 3.5

$$S = \frac{\omega_m - \omega_r}{\omega_m} \quad (3.6)$$

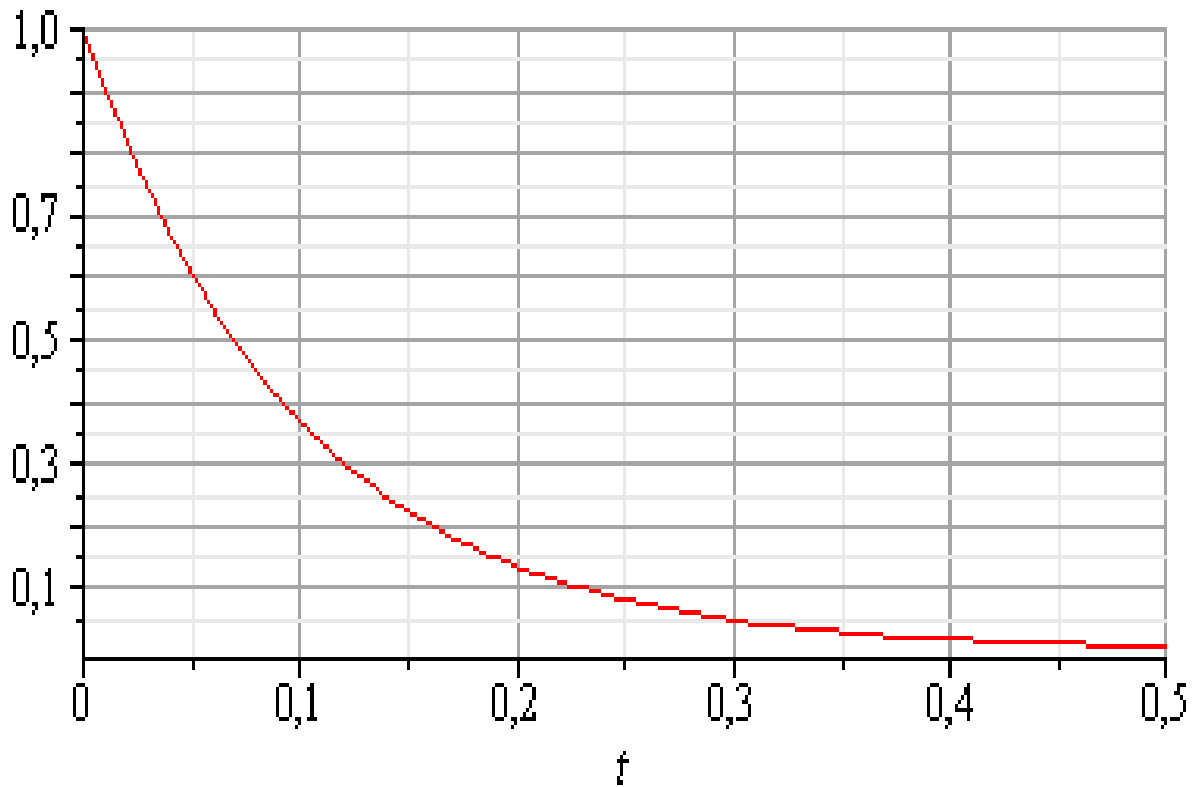


Рисунок 3.5- Ковзання

Далі знайдемо зміну прискорення в часі за наступною формулою графічне зображення рисунок 3.6

$$\varepsilon = \frac{(\omega_c - e^{-\frac{t}{\tau}})}{\tau} \quad (3.7)$$

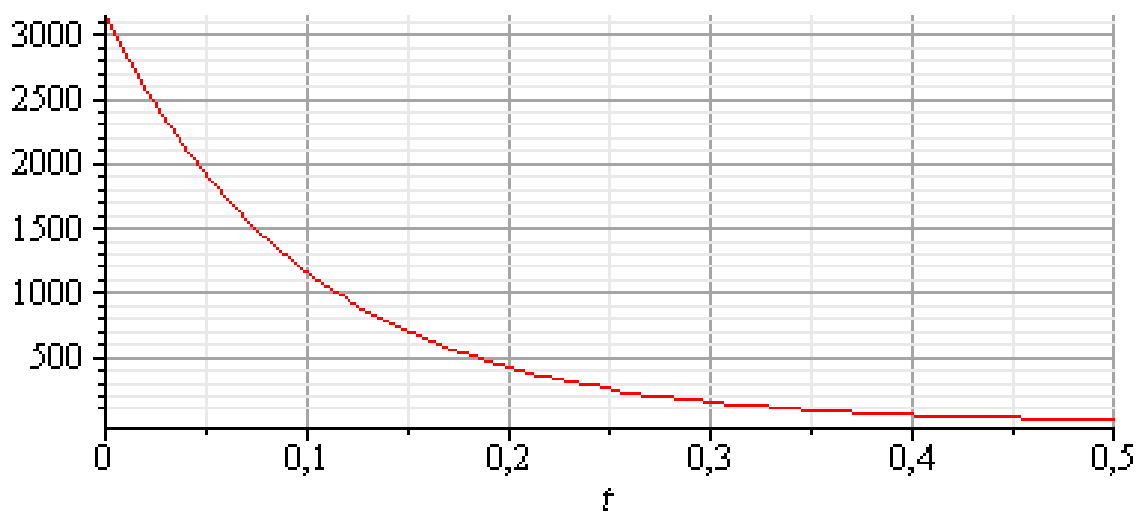
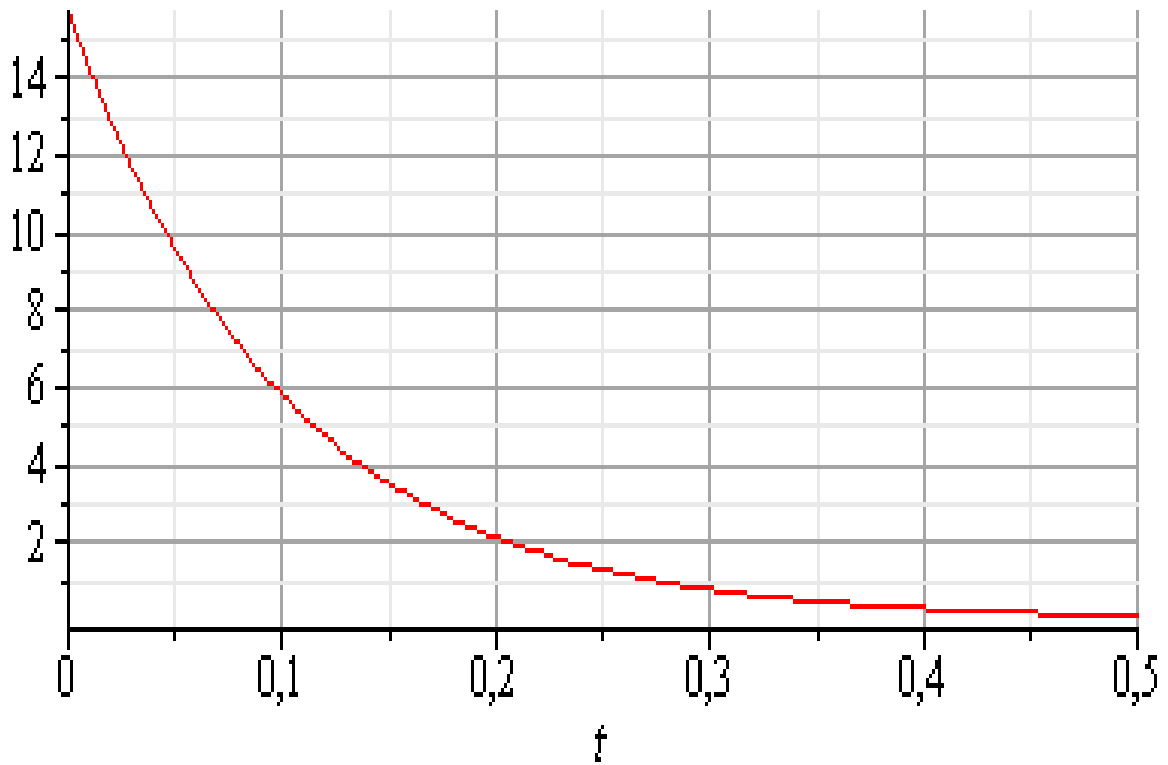


Рисунок 3.6- Зміна прискорення в часі

Далі визначимо похибку дискретизації за наступною формулою і показано графічно на рисунку 3.7

$$\Delta = \frac{1}{2} \times T_D \times \varepsilon \quad (3.8)$$



Рисунк 3.7- Похибка дискретизації



## 4 СТРУКТУРНА СХЕМА І ПРИНЦИП ДІЇ ЦИФРОВОГО ТАХОМЕТРА З ТАХОГЕНЕРАТОРОМ

Вимірювання впроваджується за допомогою каналу напруги послідовного наближення.

Суть алгоритму послідовного наближення полягає в тому, щоб компенсувати вимірювану напругу  $U_x$ , змінюючи її рівномірними ступенями або квантами. Цей алгоритм також відомий як «молодший розряд вперед».

Результати вимірювання обчислюються, коли ці величини рівні (із заданою точністю). Для отримання постійної інформації про вимірювання потрібно повторювати вимірювальний цикл. На рисунку 4.1 показано структурну схему цифрового вольтметра послідовного наближення, а на рисунку 4.2 показано часові діаграми роботи пристрою.

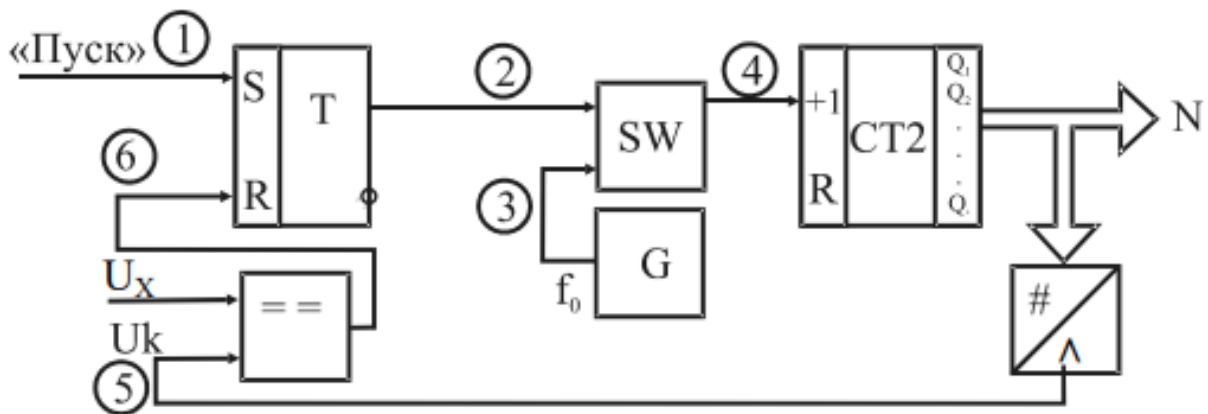


Рисунок 4.1– Структурна схему цифрового вольтметра послідовного наближення

Компаратор ПП, RS-тригер Т, логічна схема «І» SW, генератор зразкової частоти G, двійковий лічильник CT2, цифро-аналоговий перетворювач ЦАП і цифровий відліковий пристрій є основними компонентами пристрою. Вихідна ситуація Тригери двійкового лічильника CT2 і тригер Т перебувають у нульовому стані. Імпульси зразкової частоти  $f_0$  і закрита схема SW на рівні

логічного нуля не надходять на вхід лічильника СТ2. Рівні логічних нулів, отримані з паралельних виходів лічильника, надходять на відповідні входи цифро-аналогового перетворювача. Цей перетворювач перетворює нульове значення двійкового коду на нульове значення компенсувальної напруги УС, як показано на часовій діаграмі в точці 5. Розміри Тригер Т встановлюється в одиничний стан і відкриває логічну схему SW після надання команди «Пуск» (момент часу  $t_1$ ). Імпульси зразкової частоти  $f_0$ , які надходять на вхід двійкового лічильника СТ2 через відкриту схему SW, змінюють двійковий код на його виходах. Двійковий код надходить на входи ЦАП з паралельних виходів СТ2. Там він перетворюється на аналогову напругу Великобританії.

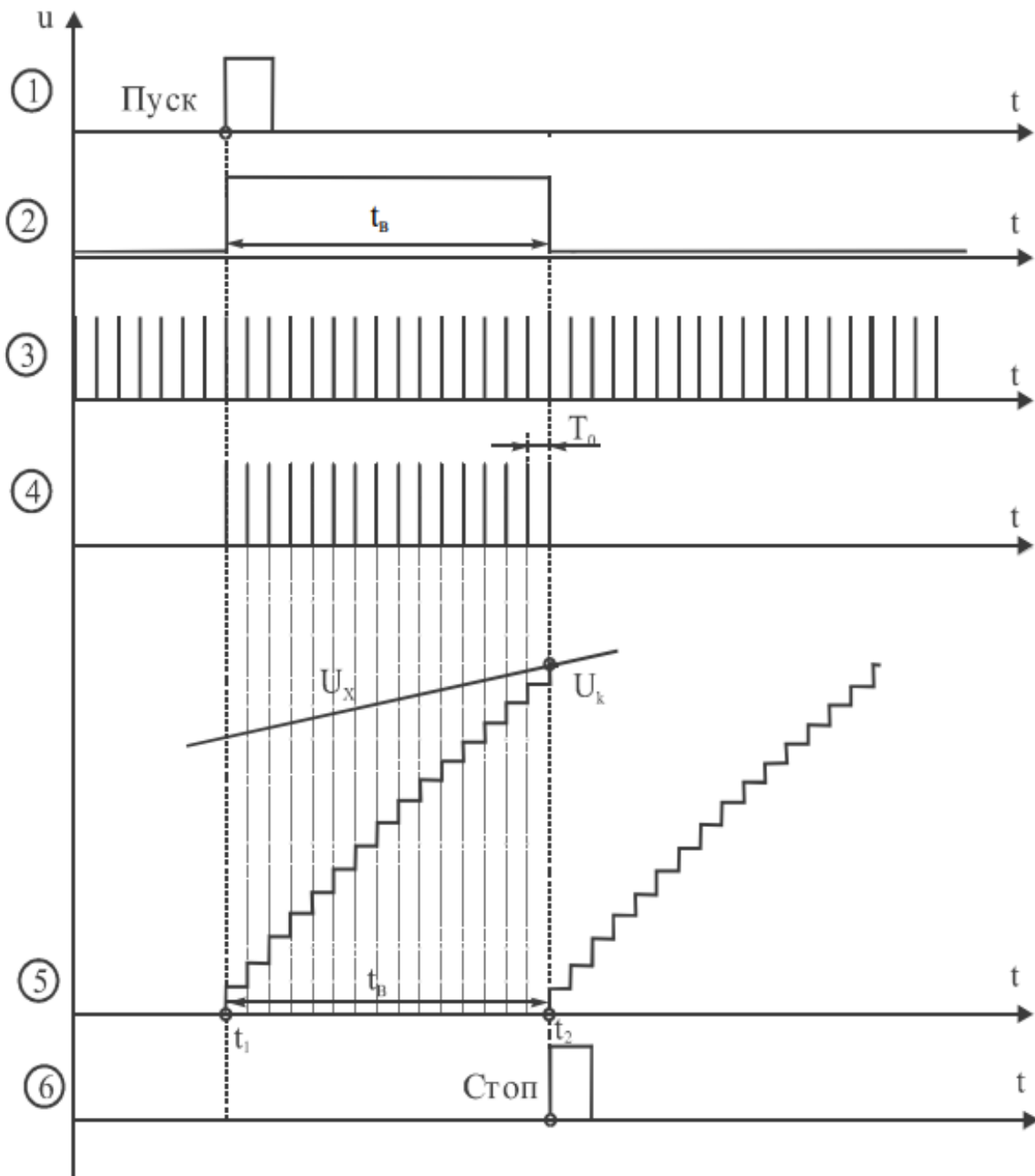


Рисунок 4.2– Часові діаграми цифрового вольтметра послідовного наближення

Надходження кожного імпульсу  $f_0$  від генератора  $G$  формує нову сходинку  $h$  компенсувальної напруги  $U_K$  на виході цифро-аналогового перетворювача. У момент часу  $t_2$ , коли  $U_X = U_K$ , тригер  $T$  сигналом «Стоп», який формується на виході компаратора, встановлюється в стан логічного «0» і тим самим закриває логічну схему  $SW$ . Таким чином, у лічильнику  $CT_2$  сформується двійковий код

На виході цифро-аналогового перетворювача нову сходинку  $h$  компенсувальної напруги  $U_K$  створює надходження кожного імпульсу  $f_0$  від генератора  $G$ . Сигнал

«Стоп», створений на виході компаратора, тригер Т закриває логічну схему SW у момент часу  $t_2$ , коли  $U_X = U_K$ . Таким чином, на виході цифро-аналогового перетворювача лічильник СТ2 створює двійковий код. Надходження кожного імпульсу  $f_0$  від генератора G створює нову сходинку  $h$  компенсувальної напруги  $U_K$ . Сигнал «Стоп», створений на виході компаратора, тригер Т закриває логічну схему SW у момент часу  $t_2$ , коли  $U_X = U_K$ . Таким чином, двійковий код сформується в лічильнику СТ2.

$$N_v = \frac{U_x}{h} = \frac{U_x}{U_0} \times 2^n \quad (4.1)$$

де  $h = U / 2$  – крок квантування;  $n$  – розрядність двійкового лічильника;  $U_0$  – напруга опорного джерела живлення ЦАП.

Статична характеристика вольтметра послідовного наближення наведена на рисунку 4.3.

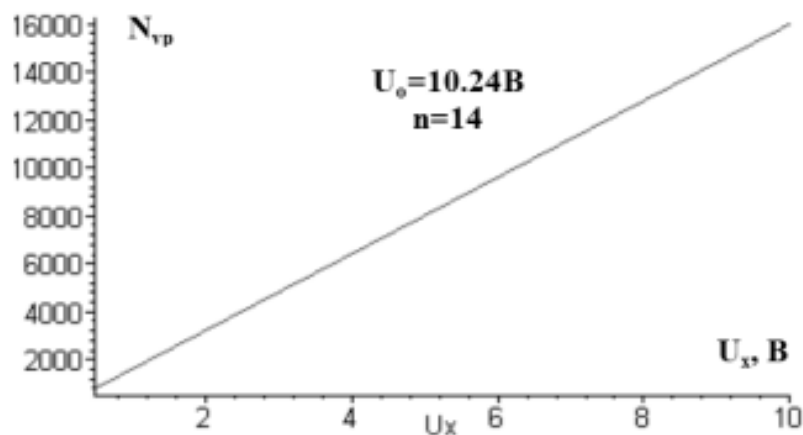


Рисунок 4.3– Статична характеристика вольтметра послідовного наближення

Спочатку отримаємо рівняння чутливості для цього вимірювального каналу

$$S = \frac{d}{dU_x} N_v = \frac{2^n}{U_0} = \text{Const.} \quad (4.2)$$

З аналізу рівняння чутливості можна зробити такі висновки: - чутливість в діапазоні зміни вимірюваної напруги є сталою величиною; значення

чутливості зростає при збільшенні розрядності  $n$  двійкового лічильника та при зменшенні опорної напруги  $U_0$  цифро-аналогового перетворювача.

Похибка квантування вольтметра послідовного наближення визначається за наступною формулою а її графічне подання наведено на рисунку 4.4

$$\delta_{kv} = \frac{1}{N_v} 100\% = \frac{U_0}{U_x 2^n} 100\% \quad (4.3)$$

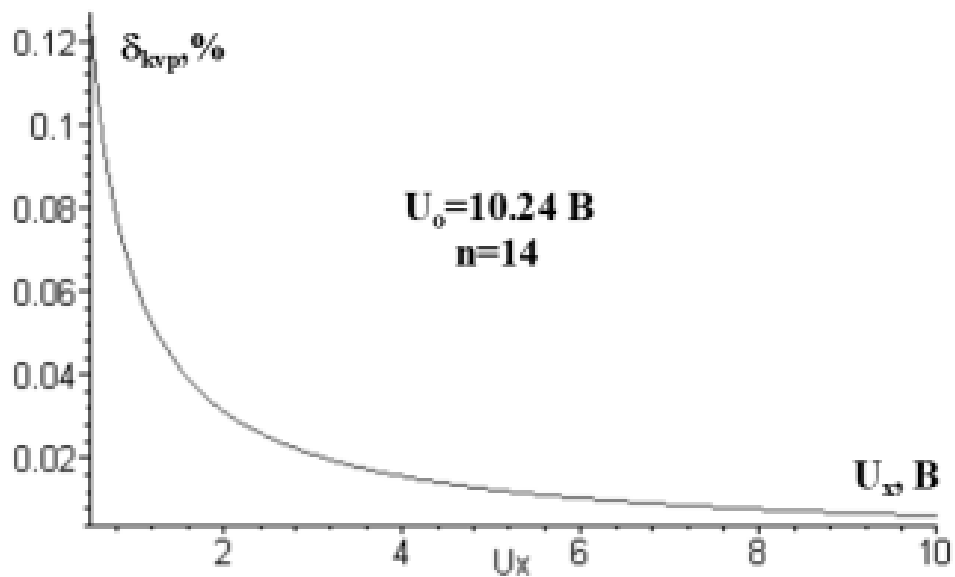


Рисунок 4.4– Похибка квантування вольтметра послідовного наближення

## 5 ВПЛИВ ПОХИБКИ МЕРЕЖІ НА ПАРАМЕТРИ ДВИГУНА

Ковзання ( $S$ ) асинхронних машин оцінюють опосередковано [5.1-5.2], як відносну різницю

$$S(t) = \frac{\omega_M(t) - \omega_P(t)}{\omega_P(t)} \quad (5.1)$$

Між миттєвими значеннями кутової частоти обертання магнітного поля статора  $\omega_M(t)$  та миттєвими значеннями кутової швидкості обертання ротора  $\omega_P(t)$ . В (1) результат вимірювання  $S(t)$  визначають опосередковано по проміжним даним прямих вимірювань  $\omega_M(t)$  і  $\omega_P(t)$ , що і пояснює необхідність двох вимірювальних каналів: кутової швидкості і кутової частоти промислової мережі. Оскільки аналізу підлягають динамічні вимірювання  $S(t)$ , то необхідно також отримувати миттєві значення проміжних результатів прямих вимірювань  $\omega_M(t)$  і  $\omega_P(t)$  за час перехідного процесу асинхронної машини (АМ).

В якості вимірювального каналу кутової швидкості переважна більшість дослідників віддають перевагу тахометрам миттєвих значень з енкодерами, періоди яких отримують в «примикаючи інтервалах» .

Основними елементами таких вимірювальних каналів є: об'єкт вимірювання, вал якого через муфту sprzęження з'єднано з валом енкодера. Енкодер неелектричну величину кутову швидкість ротора  $\omega_P(t)$  перетворює в електричну – частоту імпульсів

$$f_P = \frac{\omega_P(t) \cdot Z}{2 \pi} , \quad (5.2)$$

де  $Z$  – роздільна здатність енкодера.

Другий канал перетворює кутову частоту промислової мережі  $\omega_M(t)$  у відповідне їй значення частоти

$$f_M = \frac{\omega_M(t)}{2 \pi} . \quad (5.3)$$

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 2І

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

а їхню кількість підраховують відповідні двійкові лічильники СТ2.

З рівнянь перетворення цифрового тахометра

$$\omega_P = \frac{f_0 2\pi}{N_P Z} \quad (5.4)$$

і цифрового частотоміра промислової мережі

$$\omega_M = \frac{f_0 2\pi}{N_M} . \quad (5.5)$$

визначають миттєві значення [7] кутової частоти обертання магнітного поля статора  $\omega_M(t)$  та кутовою швидкістю обертання ротора  $\omega_P(t)$  і за (1) опосередковано оцінюють миттєві значення ковзання  $S(t)$  за час перехідного процесу АМ з частотою дискретизації  $f_D = T_P$  (період частоти  $f_P$  на виході енкодера).

Кількість вимірних значень кутової швидкості за час перехідного процесу АМ визначається розрізнявальною здатністю  $Z$  енкодера, а яку необхідно мати кількість вимірних 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

$$\omega_M = 2 \pi f_H \quad (5.6)$$

де  $f_H$  – номінальне значення частоти рівне 50 Гц.

Метою роботи є підвищення точності динамічних вимірювань ковзання асинхронних машин шляхом суттєвого зменшення систематичної і випадкової складових похибки вимірювання миттєвих значень частоти промислової мережі протягом перехідного процесу асинхронних машин.



Результати досліджень вимірювального каналу кутової частоти промислової мережі

Вимірювальний канал частоти промислової мережі являє собою масштабний перетворювач (вимірювальний трансформатор напруги), тригер Шмідта, пристрій виділення періоду  $T$  (подільник частоти на 2), логічну схему  $2I$ , кварцовий резонатор і двійковий лічильник СТ2.

Підставимо значення кутової швидкості і кутової частоти промислової мережі і отримаємо рівняння для опосередкованих вимірювань ковзання асинхронних машин

$$S = \frac{\omega_M - \omega_P}{\omega_M} = \frac{\omega_M - \omega_C \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)}{\omega_M}, \quad (5.7)$$

а графічну залежність, що ілюструє зміну ковзання в часі протягом перехідного процесу АМ, наведено на рисунок 5.1.

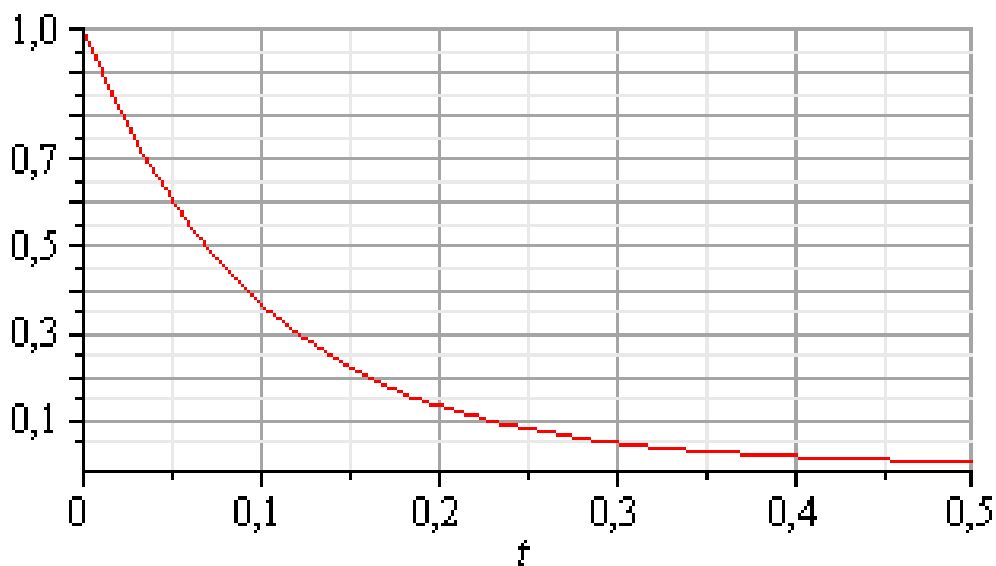


Рисунок 5.1– Графічна залежність зміни ковзання в перехідному процесі

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

На рисунку 5.2 наведено результати моделювання зміни відносної похибки в часі  $\delta(t)$  протягом перехідного процесу АМ при відхиленнях частоти промислової мережі від номінального значення на  $\pm 0.2$  Гц, числові значення якої оцінено так

$$\delta(t) = \frac{S_{50 \pm 0.2} - S_{НОМ}}{S_{НОМ}} \cdot 100\% \quad (5.8)$$

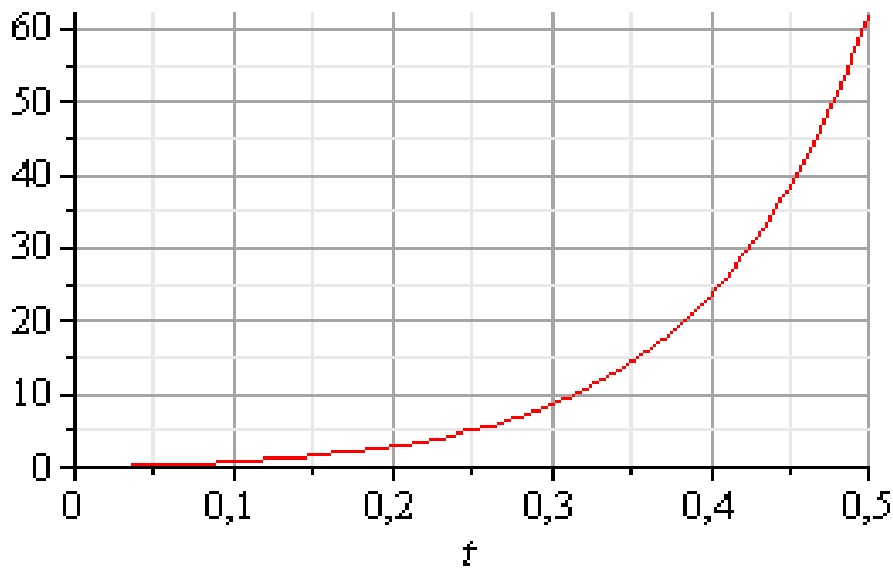


Рисунок 5.2– Результати моделювання зміни відносної похибки в часі

Аналіз наведених на рисунок 5.2 результатів показує, що в усталеному режимі роботи АМ систематична складова відносної похибки може досягати 60, що не прийнятним.

Отже, для зменшення систематичної складової похибки пропонується вимірювати частоту промислової мережі цифровим частотоміром миттєвих значень протягом перехідного процесу АМ і підставляти в (1) не номінальне значення частоти а дійсне за час перехідного процесу АМ. В таблиці 5.1 наведено основні статистичні характеристики результатів багаторазових вимірювань частоти промислової мережі.

Таблиця 5.1 – Статистичні характеристики відхилень частоти промислової мережі від номінального значення

Найменування характеристики	Умовне позначення	Числове значення	Одиниця вимірювання
Середнє арифметичне значення	$\bar{f}$	50.0321	Гц
Середнє квадратичне значення	$S_f$	0.00560	Гц
Мінімальне значення	$f_{\min}$	50.0211	Гц
Максимальне значення	$f_{\max}$	50.0431	Гц
Вибірка	$n$	100	
Крок дискретизації	$T_D$	30	с

Якщо середнє арифметичне із отриманого масиву багаторазових вимірювань

$$X_D = \bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i = 50.0321 \text{ [Гц]} \quad (5.9)$$

прийняти в якості дійсного  $X_D$ , то різниця між виміряними  $f_i$  і дійсним  $\bar{f}$  значеннями є випадкові відхилення (абсолютні випадкові похибки), що характеризують їхній розкид відносно середнього арифметичного (рис.3).

Реалізація рисунок 5.3 абсолютних випадкових похибок, що мають місце при вимірюванні частоти промислової мережі підтверджує, що окрім систематичної має місце і випадкова складова похибки. Для даного експерименту середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 0.0056 \text{ [Гц]}$ .

Якщо за результат багаторазових вимірювань взяти середнє арифметичне

$$f = \bar{f} = 50.0321 \text{ [Гц]} \quad (5.10)$$

то випадкова складова похибки буде зменшена в 10 разів.

$$\frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0.0056}{\sqrt{100}} \quad (5.11)$$

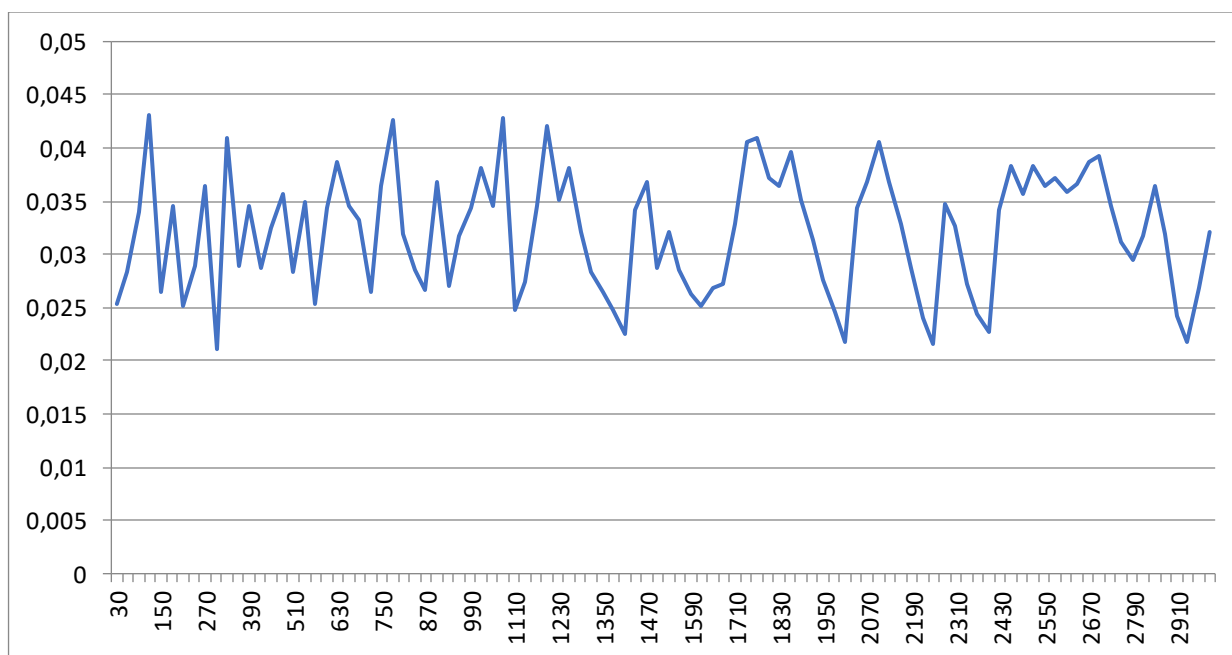


Рисунок 5.3– Реалізація абсолютних випадкових похибок

На рисунок 5.4 наведено статистичні характеристики абсолютної випадкової похибки і нормальний її закон розподілу.

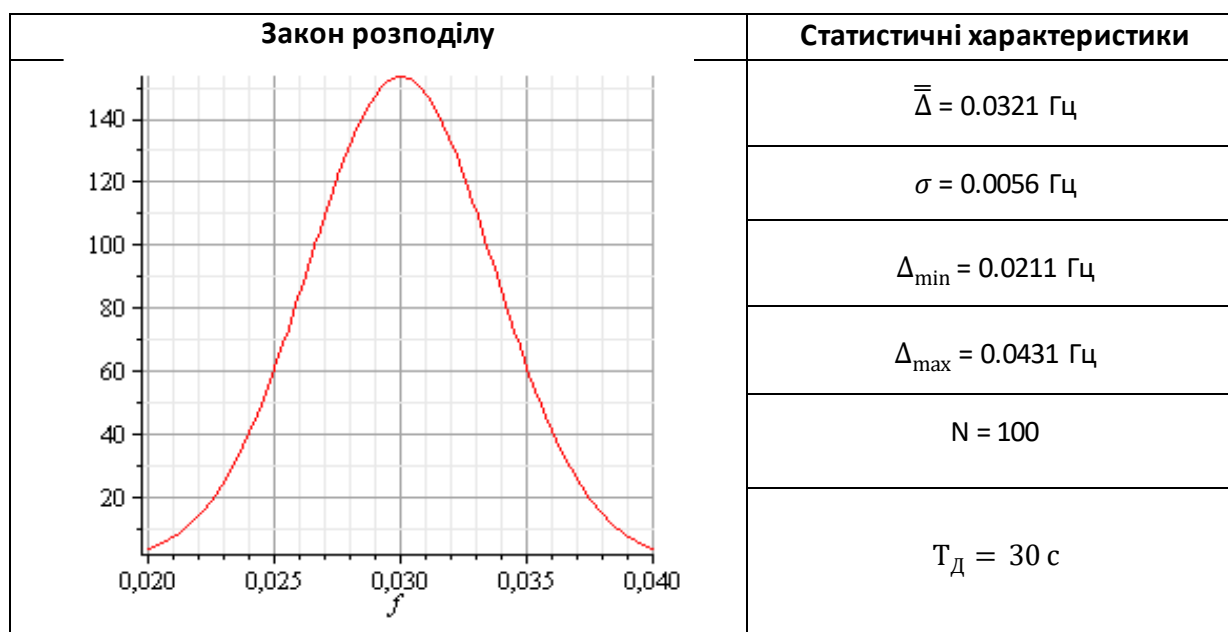


Рисунок 5.4 – Закон розподілу абсолютних випадкових похибок

Особливо багаторазові вимірювання частоти промислової мережі актуальні, коли її відхилення близькі до  $\pm 0.2$  Гц. Тоді максимальна відносна похибка може досягати

$$\delta_f = \frac{\pm \Delta_f}{f_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% = \frac{\pm 0.2}{50} \cdot 100\% = \pm 0.4 \%,$$

а відносна похибка вимірювання ковзання 60%.

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ

В цьому розділі розглянуті заходи та засоби з охорони праці та цивільного захисту під час дослідження ковзання асинхронних машин в досліді холостого ходу. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які впливають на електротехнічний персонал, що виконує дослідження визначені за Гігієнічною класифікацією [7,8].

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо). Хімічні фактори: речовини хімічного походження, в основному аерозолі фіброгенної дії (органічний пи́л). Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

### 6.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

#### 6.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Живлення системи електропостачання та системи освітлення виробничого приміщення здійснюється від п/ст 10/0,4 кВ кабельними лініями, що прокладені в траншеях. Для живлення використовується трифазна чотирьохпровідна мережа із заземленою нейтраллю напругою 380/220 В.

Категорія умов по небезпеці електротравматизму, відповідно до ПБЕ [10,11], залежить від наявності факторів підвищеної або особливої небезпеки. При наявності таких факторів як підвищена вологість, струмопровідний пи́л,

контакт обслуговуючого персоналу з струмоведучими частинами в різних приміщеннях підприємства, їх можна віднести до категорії підвищеної небезпеки.

Роботи в електроустановках стосовно заходів безпеки поділяються на три категорії: зі зняттям напруги; без зняття напруги на струмопровідних частинах та поблизу них; без зняття напруги віддалік від струмопровідних частин, що перебувають під напругою.

До робіт, які виконуються без зняття напруги на струмопровідних частинах та поблизу них, належать роботи, що проводяться безпосередньо на цих частинах. Роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах та поблизу них слід виконувати не менше як двом працівникам, з яких керівник робіт повинен мати групу IV, інші – групу III.

Роботою без зняття напруги віддалік від струмопровідних частин, що перебувають під напругою, вважається робота, під час якої є неможливим випадкове наближення працівників і ремонтного оснащення та інструменту, що застосовуються ними, до струмопровідних частин на відстань, меншу від допустимих, проведення технічних або організаційних заходів для запобігання такому наближенню не потрібно.

Під час роботи в електроустановках напругою до 1000 В без зняття напруги на струмопровідних частинах чи поблизу від них необхідно: обгородити розташовані поблизу робочого місця інші струмопровідні частини, що перебувають під напругою, і до яких можливий випадковий дотик; працювати в діелектричному взутті чи стоячи на ізолювальній підставці або на діелектричному килимі; застосовувати інструмент із ізолювальними руків'ями (у викруток, крім того, має бути ізольований стрижень); за відсутності такого інструменту слід користуватися діелектричними рукавичками.

Під час виконання робіт без зняття напруги на струмопровідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно: тримати ізолювальні частини засобів захисту за руків'я до обмежувального кільця; розміщувати ізолювальні частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття



по поверхні ізоляції між струмопровідними частинами двох фаз чи замикання на землю; користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям. В разі виявленні порушень лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту, користування ними забороняється.

В процесі роботи із застосуванням електрозахисних засобів (ізолювальні штанги та кліщі, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги) допускається наближення працівника до струмопровідних частин на відстань, яка визначається довжиною ізолювальної частини цих засобів. Без застосування електрозахисних засобів забороняється торкатися ізоляторів електроустановки, що перебуває під напругою.

В електроустановках забороняється працювати у зігнутому стані, якщо в разі випрямлення відстань до струмопровідних частин буде меншою від допустимих. В процесі виконання робіт біля необгороджених струмопровідних частин забороняється розташовуватися таким чином, щоб ці частини знаходилися позаду чи з двох боків.

Роботу із застосуванням драбин виконують два працівники, один з яких перебуває знизу. Стоячи на ящиках та інших сторонніх предметах виконувати роботи забороняється.

Роботи на кінцевих опорах ПЛ, що перебувають на території відкритих розподільчих пристроїв (ВРП), слід виконувати за правилами роботи на ВРП. Ремонтні працівники ліній перед тим, як зайти у ВРП, повинні бути проінструктовані і заходити до місця робіт у супроводі оперативного працівника з групою III; виходити з ВРПУ після закінчення роботи чи під час перерви працівникам дозволяється під наглядом керівника робіт.

Категорія умов по небезпеці електротравматизму залежить від наявності факторів підвищеної або особливої небезпеки. При наявності таких факторів як підвищена вологість, струмопровідний пил, контакт обслуговуючого персоналу з струмоведучими частинами, - приміщення можна віднести до категорії підвищеної небезпеки.

### 6.1.2 Електробезпека

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [10,11]: для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, потрібно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги; електрозахисні засоби захисту (до 1000В) поділяються на основні (ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками) та допоміжні (діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки).

## 6.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

### 6.2.1 Мікроклімат

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні [12] встановлюють допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення.

Таблиця 6.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт Па.

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості Па	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний		17-23	До 75%	не більше 0,3

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено [13]: температури внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони та зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні параметрів мікроклімату не повинні значно відрізнятись (не більше ніж на 2°C за діапазон норм); якщо температура поверхонь вище або нижче температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше 1 м; для забезпечення нормованих значень руху кисню проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

### 6.2.2 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт – середньої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [14] розряд зорової роботи IV, підрозряд «б». Нормовані значення освітленості наведені в таблиці 6.2.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 4,5 метра.

Таблиця 6.2 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Характер зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	б	малий	світлий	500	200	4	2,4

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

### 6.2.3 Виробничий шум

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки» [9]. Нормовані значення виробничого шуму наведені в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі.
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

### 6.2.4 Виробнича вібрація

У нашому виробничому приміщенні присутня вібрація типу – За [16]. Тобто технологічна вібрація, яка діє на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання.

Джерелами вібрацій в умовах, що розглядаються в проекті, являються вентиляційне обладнання, транспортери, транспорт тощо, які відносяться до типу загальної вібрації.

Основні параметри вібрації, такі як середньоквадратичне значення віброприскорення та віброшвидкості, логарифмічні рівні приведені у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Середньоквадратичні значення віброприскорення та віброшвидкості

Категорія вібрації по санітарним нормам	Напрямок дії	Нормативні, корекційовані по частоті та еквівалентні корекційовані значення			
		Віброприскорення		Віброшвидкість	
		$m \cdot c^{-2}$	ДБ	$m \cdot c^{-2} \cdot 10^{-2}$	ДБ
Загальна	Zo, Yo, Xo	0,1	100	0,2	92

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено: динамічне погашення вібрації – приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи; зміна конструктивних елементів машин; застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

### 6.2.5 Фактори трудового процесу

Робота електротехнічного персоналу є достатньо складною і потребує різних навичок та характеристик працюючого, тому і впливи від робіт різні і визначаються за Державними санітарними нормами та правилами «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» [7].

Важкість праці визначається за дод. 15 [7], звідки видно, що даний вид робіт за показниками важкості умов праці характеризується як допустимі умови праці.

- енергозатрати організму: при регіональному навантаженні (з переважною участю м'язів рук та плечового суглоба) – до 7800;

- загальні енергозатрати організму, Вт – до 290;

- робоча поза: періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) та/або фіксованій позі (неможливість зміни взаєморозташування різних частин тіла відносно одна одної);

- нахили тулуба (вимушені, більше 30°), кількість за зміну: 51-100;

Напруженість праці визначається за дод. 16 [7], робота відноситься до інтелектуальної, і має наступні характеристики:

- зміст роботи: відсутня необхідність прийняття рішення;

- сенсорні навантаження : 51-75;

- розмір об'єкта розрізнення (при відстані від очей працюючого до об'єкта розрізнення не більше 0,5 м), мм, % часу зміни: 5,0-1,1 мм більше 50% часу;

- тривалість робочого дня, год. – 8 годин;

- змінність роботи - однозмінна робота (без нічної зміни).

Дані характеристики вказуються на те, що за напруженістю робота інженера-проектувальника (цивільне будівництво), який здійснює чисельне моделювання перерозподілу зусиль між елементами кушового пального фундаменту в залежності від кількості палів відноситься до другого класу з допустимими умовами напруженості праці (напруженість праці середнього ступеня).

### **6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи асинхронних машин в умовах впливу загрозливих чинників надзвичайних ситуацій**

Система керування може використовуватись як у мирний час так і в особливий період. На неї можуть справляти значний вплив надзвичайні ситуації різного типу. До таких НС можна віднести: стихійні лиха (повені, шторми, блискавка, урагани, зливи, ожеледиця), іонізуючі випромінювання, ЕМІ та

багато інших. Тому при забезпеченні роботи даної системи керування слід використати найвищий рівень захисту від тої чи іншої НС, оскільки кожна НС справляє свій вплив на дану систему керування барабанної сушарки.

В апаратурі системи керування радіація викликає зворотні та незворотні процеси, внаслідок яких можуть бути порушення роботи елементів схеми, що приведе до пошкодження вузлів. В елементній базі системи внаслідок дії іонізуючих випромінювань можлива зміна всіх електричних та експлуатаційних характеристик.

Ступінь ураження ЕМІ залежить в основному від амплітуди наведеного імпульсу напруги чи струму та електричної міцності обладнання. ЕМІ пробиває ізоляцію, випалює елементи електросхем, викликає коротке замикання в пристроях. Найчастіше отримують пошкодження вхідні кола електронних блоків. Всі ці пошкодження можуть призвести до виходу з ладу вузлів і елементів системи керування барабанної сушарки. Також, проходячи через елементи, потік електронів створює в них вільні носії електричних зарядів, в результаті переміщення яких виникає помилковий імпульс, який призводить до помилкового спрацювання системи.

Таким чином, в даній частині розділу необхідно виконати дослідження безпеки роботи та провести розробку заходів по підвищенню безпеки роботи системи керування в умовах дії іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу.

### **6.3.1 Дослідження безпеки роботи системи керування в умовах впливу іонізуючого випромінювання**

В електронній апаратурі застосовують елементи, до складу яких входять такі матеріали: метали, неорганічні метали, (в основному діелектрики), провідники і різноманітні сполуки (діелектрики, смоли і т.д. ) серед цих матеріалів метали найбільш чутливі до впливу іонізуючих випромінювань, оскільки їм властива концентрація вільних носіїв.

Робота та експлуатація системи керування барабанної сушарки умовах іонізуючих випромінювань може призвести до втрат працездатності при визначених рівнях випромінювання. Автоматизована система керування барабанної сушарки складається з багатьох компонентів основними з яких є: транзистори, резистори, конденсатори, мікросхеми. Приймаючи до уваги елементну базу блоків, що використовується, складаємо таблицю 6.5 максимально допустимих потужностей доз гамма-випромінювання [16].

Таблиця 6.5 – Максимально допустимі потужні дози гамма випромінювання для елементів системи керування

Блоки системи керування	Елементи блоків системи керування	$P_{ЗВ}, P/\text{год}$	$P_{ЗВ}, P/c$
Драйвер та блок вводу-виводу	Оптрон	$10^5$	$10^4$
	Транзистор	$10^6$	
	Транзистор	$10^6$	
Блок живлення	Транзистор	$10^6$	
	Мікросхема	$10^5$	
	Мікросхема	$10^6$	
Сенсори	Сенсор температури	$10^4$	
	Сенсор швидкості	$10^4$	
Мікросхеми	Мікросхема	$10^5$	

Аналізуючи дані таблиці 6.5, визначаємо найбільш вразливі елементи системи керування, в яких початок зворотних змін виникає при інтенсивності випромінювання  $P_{ЗВ} = 10^4 P/\text{год}$ .

Граничне значення рівня радіації, при якому система керування барабанної сушарки буде працювати, визначається по формулі:

$$P_{гр} = K \cdot P_{ЗВ} \cdot K_{посл}, \quad (6.1)$$

де  $P_{ЗВ}$  – рівень радіації, що відповідає початку зворотних змін у найуразливішому елементі схеми;

$K$  – коефіцієнт надійності ( $K=0,9$ );



$K_{\text{осл}}$  – коефіцієнт ослаблення виробничого приміщення ( $K_{\text{посл}} = 1$ ).

$$P_{\text{гр}} = 0,9 \cdot 3,98 \cdot 1 = 3,85 \text{ (Р / год)}.$$

Отже, система керування, що розробляється, буде безпечно працювати при рівні радіації, який не перевищує 3,85 Р/год.

6.3.2 Дослідження безпеки роботи системи керування в умовах дії електромагнітного імпульсу

Безпека роботи системи керування барабанної сушарки в умовах дії електромагнітного імпульсу характеризується коефіцієнтом безпечної роботи  $K_6$ , який визначається за формулою:

$$K_6 = 20 \lg \frac{U_{\text{д}}}{U_{\text{в(г)}}} \geq 40 \text{ [дБ]}, \quad (6.2)$$

де  $U_{\text{д}}$  – допустиме коливання напруги живлення, В;

$U_{\text{в(г)}}$  – напруга наведення за рахунок електромагнітного імпульсу у вертикальних (горизонтальних) струмопровідних частинах, В.

$$U_{\text{д}} = U_{\text{ж}} + \frac{U_{\text{ж}}}{100} \cdot N \text{ [В]}, \quad (6.3)$$

де  $U_{\text{ж}} = 30 \text{ В}$  – напруга живлення;

$N$  – допустимі коливання, 5%.

$$U_{\text{д}} = 30 + \frac{30}{100} \cdot 5 = 31,5 \text{ (В)}.$$

Визначимо напругу наведену у горизонтальних струмопровідних частинах:

$$U_1 = \frac{U_{\text{д}}}{10^2}, \text{ (В)}, \quad (6.4)$$

$$U_1 = \frac{31,5}{10^2} = 0,315 \text{ (В)}.$$

Визначимо вертикальну складову напруженості електричного поля:

$$E_{\text{вер}} = \frac{U_{\text{г}}}{l_{\text{г}}} \text{ (В / м)}, \quad (6.5)$$

де  $l_1$  – довжина вертикальних струмоведучих частин ( $l_1 = 2,13 \text{ м}$ ).

$$E_{\text{вер}} = \frac{0,315}{2,13} = 0,148 \text{ (кВ / м)}.$$

Отже, система керування барабанної сушарки буде безпечно працювати при умові, що вертикальна складова напруженості електричного поля не буде перевищувати його граничне значення  $E_{\text{вер}} = 148 \text{ (В/м)}$ .

### **6.3.3 Розробка заходів по підвищенню безпеки роботи системи керування в умовах надзвичайних ситуацій**

На безпеку роботи системи керування можуть впливати такі надзвичайні ситуації як повені, буревії, обледеніння. Для захисту системи від небезпечних чинників надзвичайних ситуацій необхідно проводити профілактичні ремонтні роботи по підвищенню надійності електронних блоків і сенсорів. Для підвищення безпеки роботи системи керування барабанної сушарки від дії вище наведених небезпечних чинників, потрібно дотримуватись правил техніки безпеки, а для зменшення ймовірності збоїв необхідно використовувати програмну та апаратну надлишковість.

Для боротьби з впливом іонізуючого опромінення використовують алюмінієві сплави, леговані елементами з високим атомним номером (лантаноїдами і рідкоземельними елементами), сплави на основі тугоплавких і рідкоземельних елементів і багатошарові матеріали. Також для боротьби з впливом іонізуючого випромінювання можна використати метод, що полягає в захисному покритті радіоелектронної апаратури, які піддаються впливу іонізуючого випромінювання захисне покриття виконане у вигляді наноструктури, яка включає сукупність атомів рідкоземельних елементів, введених в структуру армованої атомно-молекулярної металічної матриці, або утворює її захисний шар.

З попередніх розрахунків видно що система керування барабанної сушарки може поводити себе не стійко за умов ЕМІ, або під дією іонізуючого випромінювання. В такому випадку необхідно виконати заходи по підвищенню

безпеки роботи системи, зокрема провести екранування усієї системи або окремих її блоків критичних до впливу ЕМІ.

Було встановлено, що система керування в умовах дії іонізуючих випромінювань буде безпечно працювати при рівні радіації, який не перевищує 3,85 Р/год. А в умовах дії електромагнітного імпульсу система керування барабанної сушарки буде надійно працювати, якщо вертикальна складова напруженості електричного поля не буде перевищувати його граничне значення  $E_{\text{вер}}=148$  (В/м).

## 7 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

### 7.1 Технічне обґрунтування вибору двигуна

При проведенні дослідів холостого ходу та, відповідно, дослідженні перехідних режимів його роботи, в асинхронних машинах, не використовується ніяка система керування. Тобто, дослідження проводиться тільки на пускових характеристиках без навантаження.

Тому, при виборі двигуна, мова про систему керування йти не може, так само як і про самий двигун. Дослід проводиться саме на асинхронних машинах, тому використовується асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (АД-КЗ).

Якщо говорити про тип двигуна, то досліджуваний двигун має в собі синхронну швидкість обертання в 3000 об/хв., та має тип 4АМ100S2.

### 7.2 Техніко-економічний розрахунок вибраного двигуна

Розрахуємо техніко-економічні показники вибраного двигуна.

Загальні витрати визначаються за формулою:

$$Z = E_n \cdot K + C, \quad (7.1)$$

де  $E_n$  - нормативний коефіцієнт економічної ефективності (приймається  $E_n = 0,17$  1/рік для усіх галузей промисловості);

$K$  – капітальні затрати, грн;

$C$  – загальні відрахування, грн/рік.

Капітальні затрати, визначаються, як сума двигуна та системи керування:

$$K = D + СК, \quad (7.2)$$

де  $D$  – ціна на двигун ( $D = 5000$  грн);

$СК$  – ціна на систему керування ( $СК = 0$  грн).

$$K = D = 5000$$

Загальні відрахування – це сума усіх відрахувань, які складаються з наступних частин:

$$C = C_A + C_p + C_D + C_o, \quad (7.3)$$

де  $C_A$  - відрахування на амортизацію, грн/рік;

$C_p$  - відрахування на ремонт, грн/рік;

$C_D$  - додаткові відрахування, грн/рік;

$C_o$  - відрахування на обслуговування, грн/рік.

Відрахування на амортизацію, визначаються, як частка від капітальних затрат. Береться в середньому 10%, від капітальних витрат:

$$C_A = 0,1 \cdot K, \quad (7.4)$$

$$C_A = 0,1 \cdot 5000 = 500 \text{ (грн/рік)}.$$

Ремонт, та відрахування на цю справу, приймають, також, як частку від капітальних затрат. Беруть 2% від капітальних затрат для відрахувань на ремонт:

$$C_p = 0,02 \cdot K, \quad (7.5)$$

$$C_p = 0,02 \cdot 5000 = 100 \text{ (грн/рік)}.$$

Додаткові відрахування, включають в себе витрати на електроенергію, та перехідні режими роботи двигуна:

$$C_D = C_{D1} + C_{D2}, \quad (7.6)$$

де  $C_{D1}$  - витрати електроенергії на двигун за рік:

$$C_{D1} = \Delta W_D \cdot c, \quad (7.7)$$

$\Delta W_D$  - кількість втраченої електроенергії в двигуні за рік;

$c$  – вартість електроенергії для промисловості, одного кіловату потужності за годину (для лабораторії:  $c = 2,64$  грн/кВт · год).

$$\Delta W_D = (\Delta P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{пер}}) \cdot K_z \cdot \Phi, \quad (7.8)$$

де  $\Delta P_{\text{НОМ}}$  - втрати потужності двигуна, при номінальному режимі роботи двигуна, кВт;

$\Delta P_{\text{пер}}$  - втрати потужності двигуна, при перехідних режимах роботи двигуна, кВт;

$k_3$  - коефіцієнт завантаження по потужності (приймається рівним 0.8);

$\Phi$  – дійсний фонд часу роботи системи електропривода за рік.

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}}, \quad (7.9)$$

де  $P_{\text{НОМ}}$  - номінальна потужність вибраного двигуна ( $P_{\text{НОМ}} = 1 \text{ кВт}$ );

$\eta_{\text{НОМ}}$  - номінальний коефіцієнт корисної дії ( $\eta_{\text{НОМ}} = 0,77$ )

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = 1 \cdot \frac{1 - 0,77}{0,77} = 0,298 \text{ (кВт)}.$$

Витрати двигуна на перехідні процеси, приймають за стандартами, як 10% від витрат при номінальному режимі роботи двигуна:

$$\Delta P_{\text{пер}} = 0,1 \cdot \Delta P_{\text{НОМ}}, \quad (7.10)$$

$$\Delta P_{\text{пер}} = 0,1 \cdot 0,298 = 0,0298 \text{ (кВт)}.$$

Дійсний фонд часу роботи системи електропривода, визначається за наступною формулою:

$$\Phi = \frac{\text{ТВ}\%}{100\%} \cdot Z_{\text{рд}} \cdot Z_{\text{рз}} \cdot t_{\text{рз}}, \quad (7.11)$$

де ТВ% - тривалість ввімкнення електродвигуна (береться за стандартним рядом 40%);

$Z_{\text{рд}}$  - кількість робочих днів за рік ( $Z_{\text{рд}} = 250$ );

$Z_{\text{рз}}$  - кількість робочих змін ( $Z_{\text{рз}} = 1$ );

$t_{\text{рз}}$  - тривалість робочої зміни ( $t_{\text{рз}} = 8 \text{ год}$ ).

$$\Phi = \frac{40}{100\%} \cdot 250 \cdot 1 \cdot 8 = 800 \text{ (год)}.$$

$$\Delta W_{\text{Д}} = (0,298 + 0,0298) \cdot 0,8 \cdot 800 = 209,792 \text{ (кВт)}.$$

$$C_{Д1} = 209,792 \cdot 2,64 = 553,85 \text{ (грн/рік)}.$$

$C_{Д2}$  - втрати в системі керування (оскільки системи керування немає, то приймається рівним 0):

$$C_{Д} = 553,85 + 0 = 416,365 \text{ (грн/рік)}.$$

Обслуговування є важливою частиною в циклі роботи кожного електричного апарату. Відрахування на обслуговування, зазвичай виділяють, з суми відрахувань на амортизацію, ремонт та додаткових відрахувань, в вигляді 5% від суми:

$$C_o = 0,05 \cdot (C_A + C_{Д} + C_p), \quad (7.12)$$

$$C_o = 0,05 \cdot (500 + 416,365 + 100) = 50,81 \text{ (грн/рік)}.$$

З усього цього, можна підрахувати загальні відрахування за формулою (5.3):

$$C = 500 + 100 + 416,365 + 50,81 = 1067,175 \text{ (грн/рік)}.$$

Та відповідно, загальні витрати будуть становити, по (5.1):

$$Z = 0,17 \cdot 5000 + 1067,175 = 1917,175 \text{ (грн/рік)}.$$

## **Висновок**

За техніко-економічним обрахунком, обґрунтовано вибір асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, типу 4AM100S2, та обраховано загальні витрати на нього, разом з вартістю самого двигуна.

## ВИСНОВОК

В даній роботі було проаналізовано залежність зміни ковзання асинхронного двигуна в досліді холостого ходу, при допустимих відхиленнях частоти мережі .

Було проведено розрахунки вимірювання з використанням енкодера і з використанням тахогенератора .

Була представлена структурна схема цифрового тахометра для вимірювання ковзання асинхронного двигуна під час виходу на номінальні оберти

Згідно розрахунків була визначена похибка ковзання яка склала 60 % при зниженні частоти що суттєво впливає на час розгону двигуна

Графічні матеріали представлені на рисунках 2.1, 4.1.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький, В. Ф. Граняк, «Вимірювання параметрів обертального руху електромеханічних перетворювачів енергії в перехідних режимах роботи» Монографія, Вінниця ВНТУ 2018 р.
1. Векторне керування синхронними двигунами без вимірювання струмів статора. [Електронний ресурс] – Режим доступу - [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/56824/1/Voloshynenko\\_magistr.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/56824/1/Voloshynenko_magistr.pdf)
  2. Експоненційна модель кутової швидкості. [Електронний ресурс] – Режим доступу - <https://org2.knuba.edu.ua/mod/book/tool/print/index.php?id=23040>
  3. М. М. Кацман, «Справочник по електричним машинам» Академія 2005 р.
  4. О. Г. Архипов, Ю. П. Горбатенко, О. П. Мариношенко, Н. І. Галабурда, «Муфти» навч. посіб. для студ. Київ 2021.
  5. Методи вимірювання частоти обертання [Електронний ресурс] – Режим доступу - <https://jak.koshachek.com/articles/metodi-vimirjuvannja-chastoti-obertannja.html>
  6. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014. [Чинний від 2014-05-30]. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=58073](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58073).
  7. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. [Чинний від 2007-12-01]. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.
  8. ДБН А.3.2-2-2009. ССБП. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. [Чинний від 2009-01-27]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2009. 116 с.

9. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
10. НПАОП 40.1-1.32-01. (ДНАОП 0.00-1.32-01). Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. [Чинний від 2002-01-01]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.
11. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Постанова МОЗ № 42 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.
12. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.
13. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. [Чинний від 2019-03-01]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2018. 133 с.
14. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Постанова МОЗ № 37 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.
15. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. Постанова МОЗ № 39 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.
16. . Кодекс цивільного захисту України. К.: ВР України, 2012. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>.

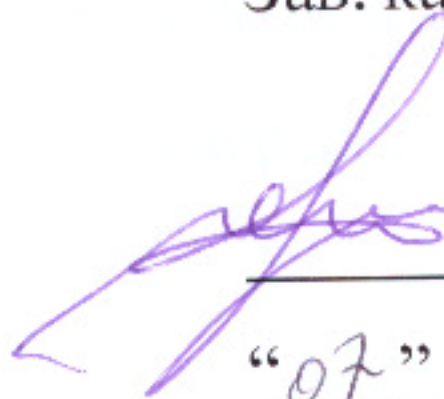
Додаток А

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

 Микола МОШНОРИЗ

«07» 11 20\_\_р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

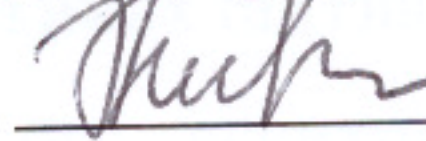
**Дослідження ковзання асинхронних машин**

**в досліді холостого ходу**

08-24.МКР.04.00.000 ТЗ

Керівник роботи

д.т.н., проф.

 Василь КУХАРЧУК

«07» 11 2023 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-22м

 Дмитро ГЛУХ

«07» 11 2023 р.

Вінниця ВНТУ 2023

## **1 Загальні відомості**

Повне найменування розробки «Дослідження ковзання асинхронних машин в досліді холостого ходу».

Замовник – Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

## **2 Підстави для розробки**

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем магістерських кваліфікаційних робіт.

## **3 Призначення розробки і галузь використання**

Досліджування ковзання в перехідному режимі роботи асинхронних машин в досліді холостого ходу є лабораторним дослідженням, покладеним на підвищення якості електричних машин. Мікропроцесорні засоби вимірювання забезпечують відповідний показник по похибці квантування за допомогою розробленого алгоритму.

## **4 Вимоги до розробки**

Дослід холостого ходу асинхронних машин, встановлює вимоги та критерії до оцінки АМ, як в статичних режимах так і на усьому динамічному режимі роботи АМ. Відповідно до цього, асинхронні машини мають нормуватись та вибірково перевірятись на досліді холостого ходу, з метою підвищення якості АМ.

## **5 Комплектація роботи**

Мікропроцесорні засоби вимірювання включають в себе: енкодер для перетворення кутової швидкості АМ в двійковий код; кварцовий резонатор;

АД-КЗ – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором; муфта на двигуні.

## **6 Джерела розробки**

1. В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький, В. Ф. Граняк, «Вимірювання параметрів обертального руху електромеханічних перетворювачів енергії в перехідних режимах роботи» Монографія, Вінниця ВНТУ 2018 р.
2. Ю. В. Степанковський «Перетворюючі пристрої приладів» Ч.2 «Інформаційні електричні мікромашини» Навчальний посібник, Київ 2014 р.
3. В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко, «Основи метрології та електричних вимірювань» ВНТУ, Україна – 2020 р – 538 с.
4. Г. А. Саранча «Метрологія, стандартизація, відповідність, акредитація та управління якістю» Київ – 2006 р. 673 с.

## **7 Технічні характеристики**

Тип двигуна 4А71А2У3; Параметри двигуна:  $p = 2$ ,  $m = 3$ ,  $R_s = 16,39$   
 $R_r = 15,08$ ,  $L_m = 0,624$ ,  $L_s = 0,663$ ,  $L_r = 0,7015$ ,  $J = 0,0097$ .

## **8 Етапи виконання**

Основна частина	
Графічна частина	

## **9 Елемент база**

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, енкодер, мікропроцесор, диск енкодера, кварцовий резонатор.

## **10 Конструктивне виконання**

Дослід холостого ходу проводиться у відповідності до вимог електробезпеки у пило-вологозахищеному виконанні.

### **11 Показники технологічності**

Енкодер, мікропроцесорний засіб вимірювання, диск до енкодеру та кварцовий резонатор, виконуються на сучасній елементній базі, їх монтаж, заземлення, струмопровід повинні відповідати правилам улаштування електроустановок.

### **12 Технічне обслуговування і ремонт**

До оперативного обслуговування електроустановками допускаються працівники, які знають їхні схеми, інструкції з експлуатації, особливості конструкції та роботи обладнання і пройшли навчання та перевірку знань.

### **13 Живлення системи**

Живлення електромеханічного комплексу повинно бути виконано: величина напруги постійного струму – це, як правило, 12, 24 або 48, а змінного струму 220 В – в однофазному і 380 В – в трифазному виконанні.

### **13 Порядок контролю та прийняття**

Виконання етапів графічної та розрахункової документації магістерської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

# **ДОДАТОК Б**

## **ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ КОВЗАННЯ АСИНХРОННИХ МАШИН В ДОСЛІДІ ХОЛОСТОГО ХОДУ**



Актуальність роботи: Сучасний розвиток технологій і автоматизації виробництва неможливо уявити без застосування електричних двигунів, які виступають ключовими елементами в системах приводу. Асинхронні двигуни, завдяки своїй простоті у будові та надійності, широко використовуються в промислових, побутових та транспортних системах. На сьогоднішній день при розрахунках частота мережі вказується як стала 50 Гц. Але частота мережі суттєво впливає на перехідний процес асинхронного двигуна.

Об'єкт дослідження: Це вплив коливань частоти мережі на розгін двигуна

Завдання: Промоделювати запуск асинхронного двигуна за допомогою математичних моделей, зробити виміри частоти мережі і визначити похибки



**Об'єктом дослідження** є засоби динамічних вимірювань ковзання асинхронних машин в перехідних режимах роботи.

**Предметом дослідження** є математичні моделі динамічних вимірювання ковзання асинхронних машин адаптивних до частоти промислової мережі.

**Мета** даного дослідження полягає в підвищенні точності динамічних вимірювань ковзання асинхронної машини шляхом зменшення систематичної і випадкової складових похибок, що спричинені відхилення промислової мережі від номінального значення .

**Новизна роботи** полягає в вимірюванні ковзання в динаміці і врахуванні похибки при використанні асинхронних двигунів

Для досягнення поставленої мети були виконані наступні задачі:

- Здійснено огляд відомих сенсорів кутової швидкості для динамічних вимірювань ковзання;
- Проаналізовано відомі методи та цифрові засоби вимірювання ковзання асинхронних машин;
- Здійснене моделювання зміни ковзання АМ в часі скориставшись експоненціальною математичною моделлю;
- Проведено експериментальні дослідження частоти промислової мережі;
- Розроблено алгоритми для зменшення впливу відхилень частоти промислової мережі від номінального значення на результати динамічних вимірювань ковзання;
- Розроблено мікропроцесорний засіб динамічних вимірювань ковзання асинхронних машин з тахогенератором.

Методи дослідження:

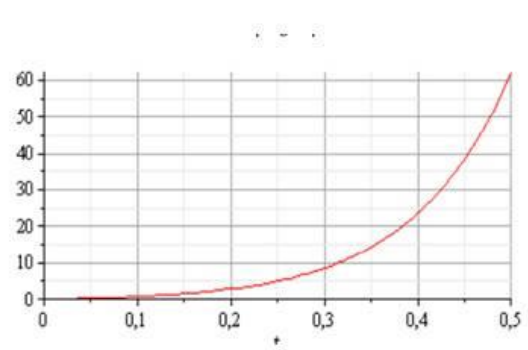
1. Емпіричні методи експериментальних досліджень частоти
2. Метод імітації моделювання кутової швидкості асинхронної машини і кутової частоти
3. Методи оцінювання систематичної і випадкової похибок

Ковзання визначають за формулою

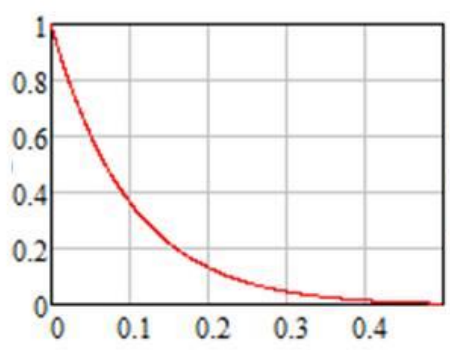
$$S = \frac{\omega_M - \omega_p}{\omega_M}$$

Нормально **допустиме відхилення частоти**  $\pm 0,2\%$ . Гранично **допустиме відхилення частоти**  $\pm 0,4\%$ . (EN 50160 50 Гц  $\pm 0,2\%$  49,8...50,2 Гц)

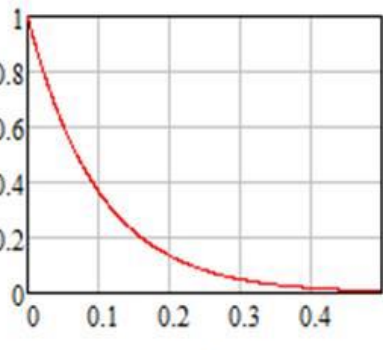
Для цих значень було виконано математичне моделювання моделювання



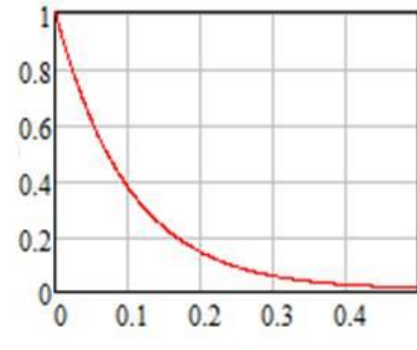
Зміна відносної похибки



Ковзання при частоті мережі 49,8

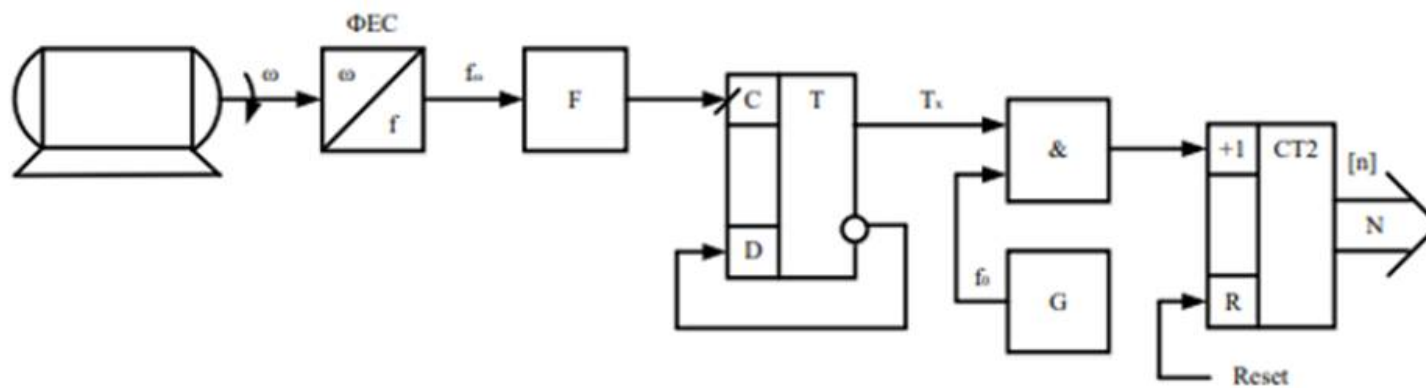


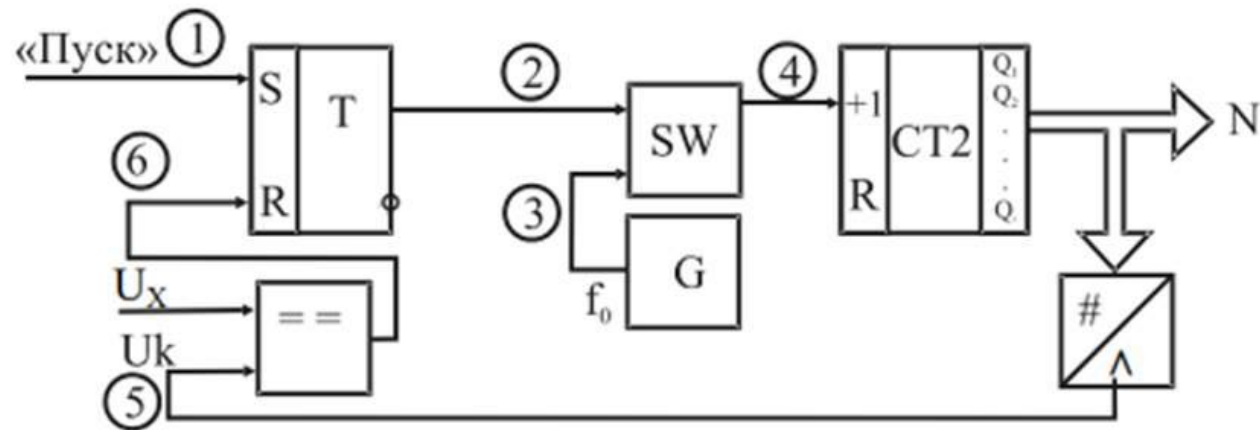
50,



50,2

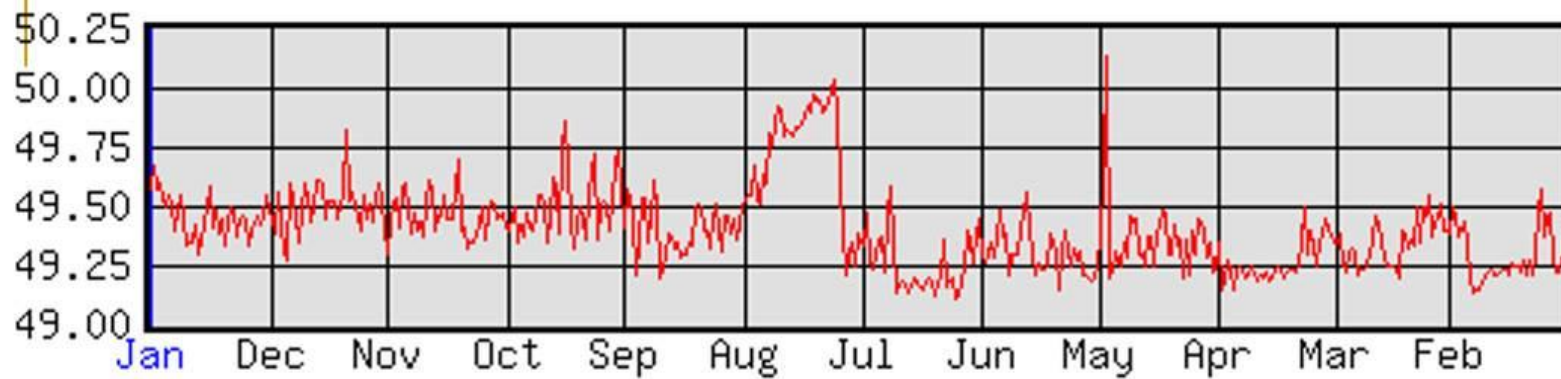
Структурна схема цифровий тахометр миттєвих значень з енкодером



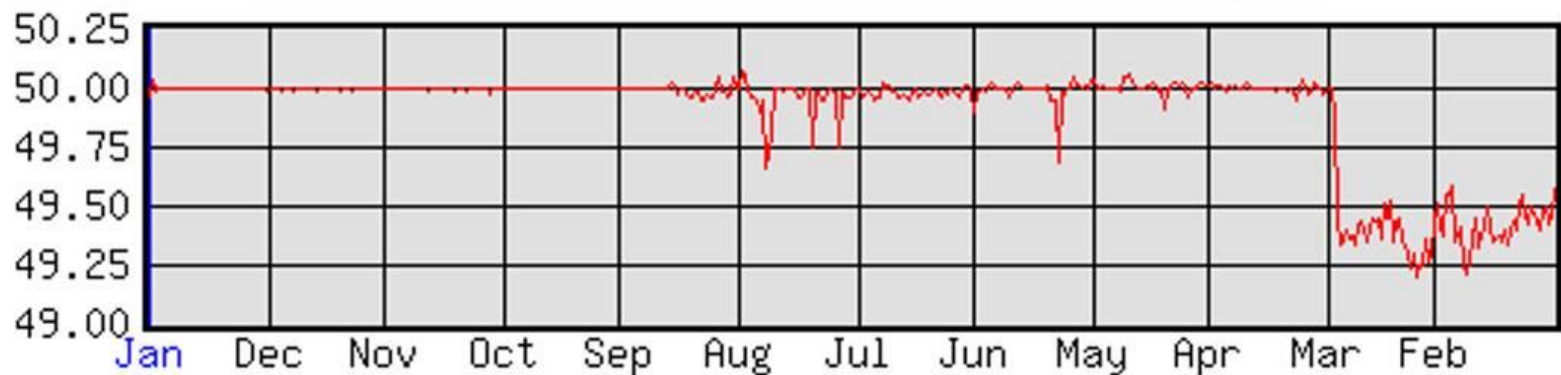


Структурна схема мікропроцесорний засіб динамічних вимірювань ковзання асинхронних машин з тахогенератором

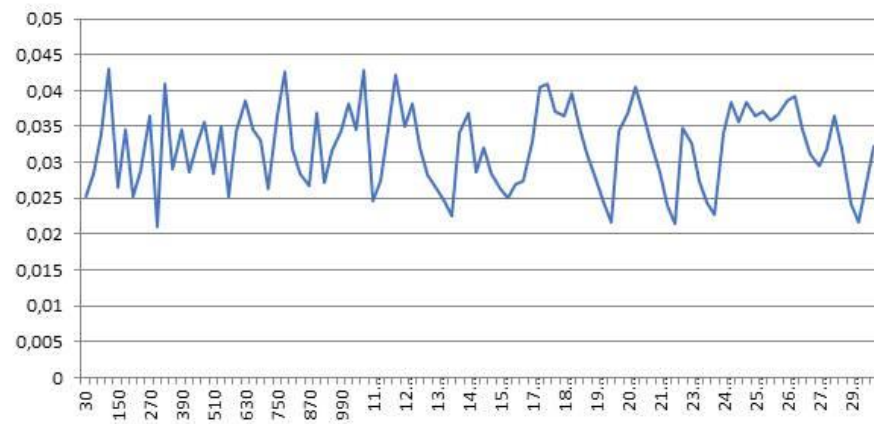
## ЧАСТОТА



Середньодобові значення частоти мережі в 2000 році.

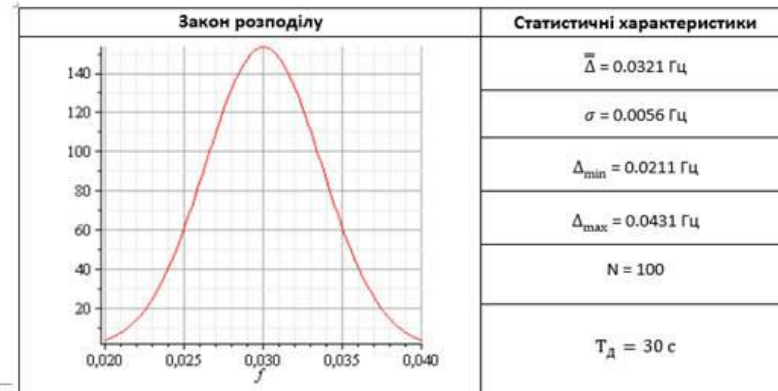


Середньодобові значення частоти мережі в 2001 році.



F

Найменування характеристики	Умове позначення	Числове значення	Одиниця вимірювання
Середнє арифметичне значення	$\bar{f}$	50.0321	Гц
Середнє квадратичне значення	$S_f$	0.00560	Гц
Мінімальне значення	$f_{\min}$	50.0211	Гц
Максимальне значення	$f_{\max}$	50.0431	Гц
Вибірка	$n$	100	
Крок дискретизації	$T_d$	30	с





# Висновок

Для підвищення точності опосередкованого вимірювання ковзання асинхронних машин протягом їхнього перехідного процесу запропоновано:

Квантувати періоди  $TP$  частоти  $fP$  з виходу енодера в «примикаючи» інтервалах, що забезпечить динамічні вимірювання їхніх миттєвих значень з нормованим значенням похибки квантування  $\delta_{KH} \leq 0.5\%$  ( $f_0 = 107$  Гц,  $Z=1000$ ).

Здійснювати багаторазові вимірювання частоти промислової мережі за час перехідного процесу асинхронної машини також в «примикаючи» інтервалах, прийнявши за результат вимірювання середнє арифметичне.

При оцінюванні ковзання використання середнього арифметичного замість номінального значення частоти дозволить суттєво зменшити систематичну похибку і в  $\sqrt{n}$  разів випадкову.

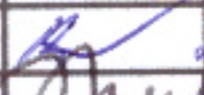
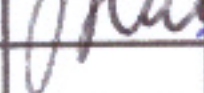



Такий підхід дозволяє виконувати динамічні вимірювання ковзання асинхронних машин з класом точності, який регламентовано для статичних вимірювань

**Публікації.** За темою дослідження опубліковано 1 тези доповідей матеріалів конференцій :

Особливості динамічних вимірювань ковзання асинхронних машин з енодером / В. В. Кухарчук, Ю. М. Остапюк, Д. О. Глух – Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)»,



08-24.МКР.004.00.000

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Дослідження ковзання асинхронних машин в досліді холостого ходу	Літ.	Маса	Висота
Розробив:		Глух Д. О.		21.11.23				
Перевірив		Кухарчук В. В.		27.11.23				
Т. контр.								
Реценз.		Кравець		11.12.23				
Норм.кон.		Глух Д. О.		28.11.23				
Затверд.		Мошноріз М.М.		28.11.23				

ВНТУ, гр. ЕПА-23



Додаток Б

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ**

Назва роботи: Дослідження ковзання асинхронних машин в досліді холостого ходу

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-22м

Науковий керівник: д.т.н., проф. Кухарчук В.В.  
(прізвище, ініціали, посада)

**Показники звіту подібності Unicheck**

Оригінальність	82,5%
Схожість	17,5 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.

Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи

(підпис)

Глух Д.О.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Кухарчук В.В.

(прізвище, ініціали)