

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Модернізація автоматизованої системи керування пристроєм  
для вимірювання обертів двигуна мобільного робота

(тема)

Виконав:

здобувач 2 року, групи КІТПВМ-23-2

Санєєв Д. В.

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 174 Автоматизація,

комп'ютерно-інтегровані технології та

робототехніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані  
технологічні процеси і виробництва

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Аллахверанов Р. Ю.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАР

\_\_\_\_\_

(підпис)

Невлюдов І. Ш.

(прізвище, ініціали)

2025р.

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачеві \_\_\_\_\_ *Сансєву Денису Вікторовичу*  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Модернізація автоматизованої системи керування пристроєм для вимірювання обертів двигуна мобільного робота*

затверджена наказом по університету від *“ 25 ” жовтня 2024р. № 1231 Ст.*

2. Термін подання студентом роботи *“ 28 ” січня 2025р.*

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

3.1 *Електромеханічні аналогії, рівняння Лагранжа 2-го роду;*

3.2 *Перетворення Лапласа та передаточна функція;*

3.3 *Частотні характеристики динамічної ланки;*

3.4 *Комп'ютерна система Scilab та графічне середовище моделювання Xcos.*

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі *4.1 Вступ;*

4.2 *Аналіз видів тахометрів та їхнє використання;*

4.3 *Моделювання електромагнітних тахометрів;*

4.4 *Комп'ютерне моделювання процесів в електромагнітному тахометрі;*

4.5 *Охорона праці;*

4.6 *Висновки.*

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (\*.ppt) – 20 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз видів тахометрів та їхнє використання</i>	25.11 – 30.11.24	<i>виконано</i>
2	<i>Моделювання електромагнітних тахометрів</i>	01.12 – 12.12.24	<i>виконано</i>
3	<i>Ком'ютерне моделювання процесів в електромагнітному тахометрі</i>	13.12 – 31.12.24	<i>виконано</i>
4	<i>Охорона праці</i>	01.01 – 06.01.25	<i>виконано</i>
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	07.01 – 10.01.25	<i>виконано</i>
6	<i>Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk</i>	11.01 – 15.01.25	<i>виконано</i>
7	<i>Подання роботи на рецензію</i>	16.01 – 19.01.25	<i>виконано</i>
8	<i>Подання роботи на підпис зав. кафедри</i>	20.01 – 24.01.25	<i>виконано</i>
9	<i>Подання кваліфікаційної роботи в ЕК</i>	28.01.25	<i>виконано</i>

Дата видачі завдання 25.10.2024р.

Здобувач \_\_\_\_\_ Санєєв Д. В.  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доц. Аллахверанов Р. Ю.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«25» січня 2025 р.



Санєєв Д. В.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 77 с., 3 табл., 32 рис., 4 дод., 20 джерел.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ТАХОМЕТР, ВИМІРЮВАННЯ, КОЛИВАЛЬНІ РУХИ, КУТОВА ШВИДКІСТЬ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ, МОДЕЛЮВАННЯ, ЧАСТОТА, ВПЛИВ, ПРОЦЕСИ.

Мета роботи – підвищення точності вимірювання оборотів двигуна, за рахунок модернізації системи керування.

Об'єкт розробки – пристрій для вимірювання обертів двигунів мобільного робота.

Предмет розробки – процеси які відбуваються у тахометрах.

На основі електромеханічних аналогій та рівнянь Лагранжа 2-го роду побудовано математичну модель електромагнітного тахометра у вигляді диференціального рівняння першого порядку із відповідною початковою умовою, що дозволяють визначати вимірювальну електричну напругу, яка формується тахометром при вимірюванні кутової швидкості. Виконане комп'ютерне моделювання процесів в електромагнітному тахометр показало досить малий час перехідних процесів при вимірюванні кутової швидкості. Також показано, що при вимірюванні кутової швидкості із високочастотною гармонійною складовою електромагнітний тахометр не забезпечує належну точність визначення миттєвого значення кутової швидкості через зсув фаз сигналів, але така похибка є незначною через малий проміжок часу відповідний зсуву фаз при високочастотних процесах. Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

## ABSTRACT

Explanatory note: 77 pp., 3 tab., 32 fig., 4 appendices, 20 sources.

ELECTROMAGNETIC TACHOMETER, MEASUREMENT, OSCILLATORY MOVEMENTS, ANGULAR VELOCITY, MATHEMATICAL MODEL, COMPUTER MODEL, SIMULATION, FREQUENCY, IMPACT, PROCESSES.

Purpose – to improve the accuracy of engine speed measurement by modernizing the control system.

The object of development is a device for measuring the engine speed of a mobile robot.

Subject of development – processes occurring in tachometers.

On the basis of electromechanical analogies and Lagrange's equations of the 2nd kind, a mathematical model of an electromagnetic tachometer was constructed in the form of a first-order differential equation with an appropriate initial condition, which allows determining the measuring electric voltage generated by the tachometer when measuring angular velocity. The computer modeling of processes in the electromagnetic tachometer showed a rather short time of transients when measuring angular velocity. It is also shown that when measuring the angular velocity with a high-frequency harmonic component, the electromagnetic tachometer does not provide adequate accuracy in determining the instantaneous value of the angular velocity due to the phase shift of the signals, but this error is insignificant due to the small time interval corresponding to the phase shift during high-frequency processes. The results of the work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 “Industry, Innovation and Infrastructure”, in particular to paragraph 9.4 “Development of high-tech engineering”.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	9
Вступ .....	10
1 Тахометри та їхнє використання .....	12
1.1 Загальні відомості про принципи дії тахометрів .....	12
1.2 Електрромагнітні тахометри .....	13
1.3 Використання тахометрів .....	22
1.4 Висновки до розділу .....	28
2 Моделювання електромагнітних тахометрів .....	29
2.1 Розрахункова схема електромагнітного тахометру .....	29
2.2 Математична модель процесів в електромагнітному тахометрі .....	35
2.3 Вимірювання за допомогою тахометра .....	41
2.4 Висновки до розділу .....	44
3 Ком'ютерне моделювання процесів в електромагнітному тахометрі ...	45
3.1 Процес вимірювання кутової швидкості .....	46
3.2 Статична ідентифікація електромагнітного тахометру .....	52
3.3 Вплив високочастотних складових на вимірювання .....	58
3.4 Висновки до розділу .....	67
4 Охорона праці .....	68
4.1 Аналіз умов праці на робочому місці програміста .....	68
4.2 Промислова безпека на робочому місці програміста .....	68
4.3 Виробнича санітарія у приміщенні де працює програміст .....	69
4.4 Пожежна безпека виробничого приміщення .....	71
Висновки .....	73
Перелік джерел посилання .....	75
Додаток А Сценарій автоматизованого форматування графіків .....	78

Додаток Б Базові сценарії дослідження процесів в електромагнітному тахометрі .....	79
Додаток В Сценарії щодо статичної ідентифікації електромагнітного тахометра .....	80
Додаток Г Публікації за темою досліджень .....	81
Додаток Д Демонстраційний матеріал .....	82

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЕРС – електрорушійна сила;

ЕТ – електромагнітний тахометр;

КМ – комп'ютерна модель;

КПО – коефіцієнт природної освітленості;

ММ – математична модель;

ПК – персональний комп'ютер.

## ВСТУП

В даний час використовуються засоби вимірювання, що оцінюють частоту обертання об'єкта щодо нерухомої осі за певний проміжок часу.

Обертальний рух широко використовується в техніці (різні вали двигунів, турбін і передавальних механізмів). Рівномірний обертальний рух має повторюваність у часі і за цією властивістю близький до періодичних коливальних процесів, які також широко поширені. Необхідність контролювати стани технічних пристроїв призвела до розвитку різних методів вимірювання частот і швидкостей тіл, що обертаються, і частотних характеристик коливальних систем.

Кутові частоти та швидкості обертання найчастіше визначають побічно – шляхом використання тих чи інших перетворювачів механічної величини в електричну. Кутові швидкості обертання можна вимірювати за допомогою абсолютного методу, визначивши повне число оборотів валу протягом відповідного проміжку часу, а також за допомогою вимірювальних засобів, що дозволяють застосувати метод порівняння кількості оборотів валу з відомою частотою будь-якого стійкого і незалежного періодичного процесу.

Більшість тахометрів мають приводний вал, що сприймає обертальний рух від пристрою, що випробовується, або дистанційний електричний датчик.

Тахометри широко використовуються в автомобільній промисловості для вимірювання швидкості обертання двигуна. Вони дозволяють водієві контролювати швидкість обертання двигуна та вибрати найбільш ефективний режим роботи.

Мета роботи – підвищення точності вимірювання оборотів двигуна, за рахунок модернізації системи керування.

Об'єкт розробки – пристрій для вимірювання обертів двигунів мобільного робота.

Предмет розробки – процеси які відбуваються у тахометрах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз вимог технічного завдання;
- розглянути відомості про принципи дії тахометрів;
- проаналізувати електромагнітні тахометри (ЕТ);
- виконати огляд використання ЕТ;
- визначити кутову швидкість обертання за допомогою ЕТ;
- розглянути розрахункову схему ЕТ;
- побудувати математичну модель (ММ) процесів у ЕТ;
- розглянути питання охорони праці.

Робота виконується згідно з [1-3], як складова наукових досліджень, які проводяться на кафедрі КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки, результати дослідження опубліковані у [4-6], отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

# 1 АНАЛІЗ ВИДІВ ТАХОМЕТРІВ ТА ЇХНЄ ВИКОРИСТАННЯ

## 1.1 Загальні відомості про принципи дії тахометрів

Концепція тахометрів є життєво важливою для багатьох галузей промисловості. Вони використовуються для вимірювання швидкості обертання двигунів, механізмів та інших обертових пристроїв. Тахометри можуть бути різних видів та функціонувати в різних умовах. У цій роботі ми розглянемо загальні принципи роботи різних видів тахометрів:

– механічні тахометри використовуються для вимірювання швидкості обертання двигунів та механізмів. Вони працюють на основі механічного контакту з обертовим пристроєм. Це може бути кабель, з'єднаний з пристроєм або механічний датчик, який виявляє обертання;

– електронні тахометри використовуються для вимірювання швидкості обертання двигунів та механізмів. Вони працюють на основі електронної обробки сигналів, які надходять від датчика швидкості. Електронні тахометри можуть бути аналоговими чи цифровими;

– оптичні тахометри використовуються для вимірювання швидкості обертання двигунів та механізмів. Вони працюють на основі оптичного контакту з обертовим пристроєм. Це може бути лазерний датчик, який виявляє відбите світло, або оптичний датчик, який виявляє зміни у світловому потоці;

– магнітні тахометри використовуються для вимірювання швидкості обертання двигунів та механізмів. Вони працюють на основі магнітного контакту з пристроєм, що обертається. Це може бути магнітний датчик, який виявляє магнітне поле або магнітний датчик, який виявляє зміни в магнітному полі;

– ультразвукові тахометри використовуються для вимірювання швидкості обертання двигунів та механізмів. Вони працюють на основі вимірювання часу,

необхідного для проходження ультразвукового сигналу через обертовий пристрій. Ультразвукові тахометри можуть бути портативними чи стаціонарними.

## 1.2 Принцип дії тахометрів

Принцип дії тахометрів заснований на перетворенні частоти обертання на механічні або електричні вихідні сигнали. Відповідно до цього набули поширення механічні та електричні тахометри. Механічний тахометр – це нескладний за конструкцією портативний прилад, який набув широкого поширення для вимірювання частоти обертання [5].

Фізична величина  $m$ , яка характеризує об'єкт вимірювань (температура, тиск тощо), називається величиною, що вимірюється. Сукупність операцій, вкладених у встановлення чисельного значення фізичної величини, становить процес виміру. Якщо під час вимірювання використовуються електронні засоби оброблення сигналу, то спершу необхідно перетворити параметр, який вимірюється, на еквівалентну електричну величину, причому якомога точніше. Це означає, що отримана електрична величина повинна містити всю інформацію про параметр, що вимірюється.

На рисунку 1.1 наведено приклад зміни в часі вимірюваної величини  $m$  і відповідної реакції датчика  $s$ .

Датчик – це пристрій, який, піддаючись впливу фізичної вимірюваної величини, видає еквівалентний сигнал, як правило, електричної природи (заряд, струм, напругу або імпеданс), що є функцією вимірюваної величини

$$s = F(m), \quad (1.1)$$

де  $s$  – вихідна величина датчика;

$m$  – вхідна величина.

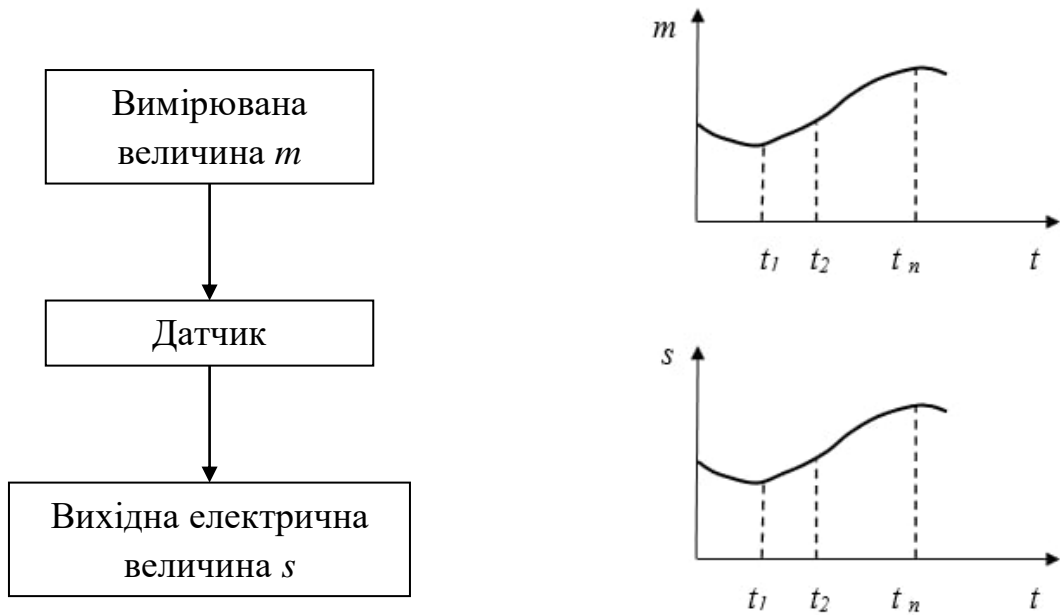
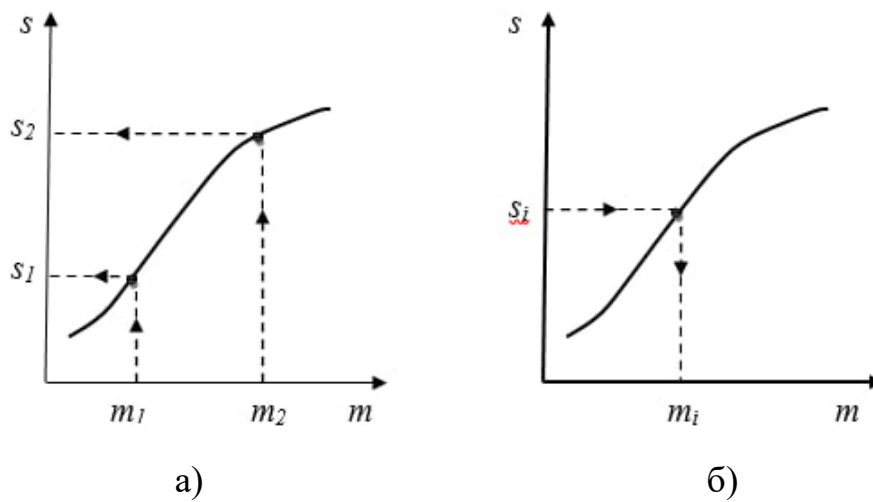


Рисунок 1.1 – Приклад зміни в часі вимірюваної величини  $m$  і відповідної реакції датчика  $s$

Вимірявши значення  $s$ , можна ним визначити значення  $m$  (рис. 1.2).



а – отримання градуювальної кривої за відомими значеннями вимірюваної величини  $m$ ; б – використання градуювальної кривої для визначення  $m$

Рисунок 1.2 – Градуювальні характеристики датчика

Співвідношення (1.1) виражає у загальній теоретичній формі фізичні закони, покладені за основу роботи датчиків. Будучи вираженими чисельно, ці закони визначають вибір конструкцій (геометрії та розмірів) та матеріалів для їхнього виготовлення, допустимі характеристики навколишнього середовища, при яких датчики можуть працювати, та умови застосування. Для всіх датчиків характеристика перетворення – співвідношення (1.1) – у чисельній формі визначається експериментально в результаті градуювання, під час проведення якої для низки точно відомих значень  $t$  вимірюють відповідні значення  $s$ , що дозволяє побудувати градуювальну криву (рис. 1.2, а). З цієї кривої для всіх отриманих у результаті вимірювання значень  $s$  можна знайти відповідні значення шуканої величини  $m$  (рис. 1.2, б) [5, 8].

Для зручності вимірювань намагаються побудувати датчик або, принаймні, використовувати його таким чином, щоб існувала лінійна залежність між малим збільшенням вихідних і вхідних величин:

$$\Delta s = S \Delta m, \quad (1.2)$$

де  $S$  – чутливість датчика.

Найважливішою проблемою під час проектування та використання датчика є забезпечення сталості чутливості, котра повинна якнайменше залежати від значень  $m$  (визначаючи лінійність характеристики перетворення) та частоти їхніх змін, від часу та від впливу інших фізичних величин, які характеризують не сам об'єкт, а його оточення (вони називаються величинами, що впливають на результати вимірювань) [5].

Датчик, з огляду на вид сигналу, на виході може бути устаткований активним генератором, який видає заряд, напругу чи струм, або пасивним – з вихідним опором, індуктивністю або ємністю, що змінюються відповідно до вхідної величини [6].

Відмінність між активними та пасивними датчиками обумовлена їхніми еквівалентними електричними схемами, що відображають фундаментальні відмінності в природі використовуваних у датчиках фізичних явищ [5, 8].

Електричний сигнал – це змінна складова струму або напруги, котра несе інформацію, пов'язану з величиною, що вимірюється; амплітуда і частота сигналу повинні бути безпосередньо пов'язані з амплітудою та частотою вимірюваної величини. Активний датчик є джерелом, безпосередньо, електричного сигналу, що видається, а вимірювання змін параметрів імпедансу пасивного датчика проводиться побічно, зміни струму або напруги в результаті його обов'язкового включення в схему із зовнішнім джерелом живлення. Електрична схема, безпосередньо, пов'язана з пасивним датчиком, вона формує його сигнал, і, таким чином, сукупність датчиків цієї електричної схеми є джерелом електричного сигналу [8].

У промисловості вимірювання швидкості зводиться в більшості випадків до вимірювання швидкостей обертання деталей, що крутяться, та вузлів, коли за ними доводиться спостерігати з метою безпеки або для створення умов їхньої роботи в бажаному режимі. У разі прямолінійного руху вимірювання швидкості часто може бути зведено до вимірювання швидкості обертання. Тому тахометричні датчики є переважно датчиками кутової швидкості [5, 8].

Промислові датчики, призначені спеціально для вимірювання швидкості, базуються на законі Фарадея:

$$e = -d\varphi / dt, \quad (1.3)$$

з якого випливає, що магнітний потік, який перетинає контур, описується функцією виду:

$$\varphi(x) = \varphi_0 F(x), \quad (1.4)$$

де  $x$  – змінна лінійного чи кутового становища.

Тому будь-яке відносне переміщення між джерелом потоку (індуктором) і контуром наводить в цьому останньому ЕРС, амплітуда якої пропорційна швидкості переміщення, внаслідок чого на виході такого датчика формується сигнал:

$$e = -\varphi_0 \left( \frac{dF(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \right). \quad (1.5)$$

Цей вид тахометрії називається електродинамічним.

Коли досліджуване тіло, що рухається, здійснює періодичний рух, наприклад, обертання, визначення його швидкості може бути замінено вимірюванням частоти: так, датчик близькості, розташований поруч з об'єктом, відстань до якого змінюється періодично, видає сигнал, частота якого дорівнює або кратна, в залежності від конфігурації об'єкта, частоті рухів. Так, для вимірювання кутової швидкості обертового валу можна використовувати насаджений на нього диск, забезпечений прозорими і непрозорими частинами, що чергуються, котрі під час обертання будуть переривати потік променів, які реєструються за допомогою оптичного детектора.

Таким чином, формуватиметься послідовність електричних імпульсів із частотою, пропорційною швидкості. Тахометри цього виду називають імпульсними [9].

У разі занадто повільного обертання, наприклад, менше одного градуса на годину, описані вище методи стають непридатними, і в цьому випадку вимірювання швидкості може бути ефективно здійснено лазерним гірометром [9].

Принцип його дії заснований на існуванні різниці ходу двох хвиль, випромінюваних одним лазером, які поширюються в протилежних напрямках в одному і тому ж середовищі, що обертається. Ця різниця ходу, пропорційна кутовій швидкості, виявляється за допомогою інтерферометра.

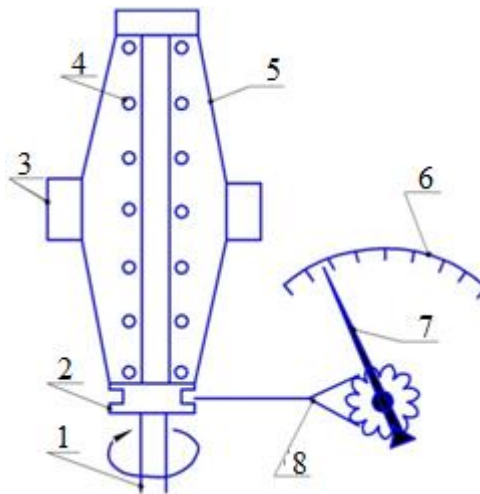
Зв'язки, що поєднують швидкість і положення, з одного боку, та швидкість і прискорення, з іншого, дозволяють визначати швидкість шляхом оброблення сигналів датчиків кожної з цих двох величин.

Похідна за часом сигналу аналогового датчика положення визначає величину швидкості. Однак цей метод пов'язаний з появою перешкод (наприклад, через дискретність потенціометра дроту) і збільшенням високочастотного шуму.

Інтегрування сигналу датчика прискорення є іншим методом визначення швидкості; використовуваний у навігації, він потребує складного обладнання (інерційної платформи).

### 1.2.1 Механічний тахометр

Два вантажі з однаковими масами розташовані на плоских пружинах, які з одного кінця прикріплюються до валу, що обертається, а з іншого – до ковзної втулки (рис. 1.3).



- 1 – приводний валик; 2 – ковзна муфта; 3 – вантаж; 4 – циліндрична пружина;  
5 – плоска пружина; 6 – шкала; 7 – стрілка; 8 – механізм приводу

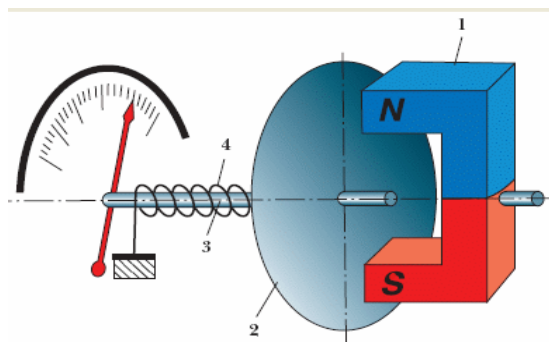
Рисунок 1.3 – Механічний тахометр

Ковзна втулка через зубчастий сектор з'єднується зі стрілкою приладу, що показує. Зміна частоти обертання валу викликає зміну відцентрової сили

вантажів, яка врівноважується силою підтискання циліндричної та плоскої пружин під час переміщення ковзної втулки. Переміщення ковзної втулки пропорційне зміні частоти обертання та реєструється за шкалою приладу, котра відградує в одиницях частоти обертання.

### 1.2.2 Датчики Фуко

Цей тип датчиків застосовується, коли тіло, що обертається, металеве, але не феромагнітне. Котушка, що є чутливим елементом, утворює індуктивність резонансного контуру синусоїдального генератора. При наближенні металевого провідника змінюються характеристики  $L$  і  $R$  котушки, внаслідок чого припиняється генерація.



1 – постійний магніт; 2 – диск із не магнітного матеріалу (алюміній);

3 – вісь зі стрілкою; 4 – поворотна пружина

Рисунок 1.4 – Магнітний тахометр

При проходженні кожного зуба шестерні, що обертається, перед котушкою відбувається переривання коливань, що виявляється, наприклад, за зміною струму живлення генератора. Частота відповідного сигналу пропорційна швидкості обертання, амплітуда якої залежить від останньої, оскільки визначається у даному разі не законом Фарадея. Звідси випливає, що цей тип датчика не має мертвої зони і тому придатний для вимірювання дуже малих швидкостей [9].

### 1.2.3 Оптичний тахометр

У найпростішій формі він складається з джерела світла та оптичного приймача – фотодіода або фототранзистора (рисунок 1.5).

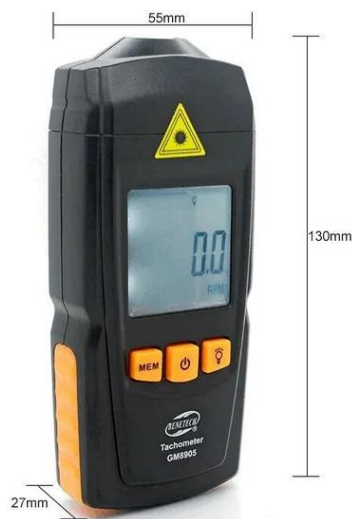


Рисунок 1.5 – Оптичний тахометр Venetech GM 8905

Тіло, що обертається, або забезпечують відбиваючими мітками, розташованими регулярно по колу, на котрі спрямовується світловий пучок, або з'єднують з диском, який має поперемінно прозорі і непрозорі сектори, що розташовують між джерелом і приймачем світла. Отримуючи модульований стрибкоподібними змінами відображення або пропускання потік, фотоприймач видає електричний сигнал з частотою, пропорційною швидкості обертання, і з амплітудою, котра не залежить від цієї швидкості. Діапазон вимірюваних швидкостей залежить, з одного боку, від числа стрибків оптичних властивостей (ризика, щілини, прозорі сектори, нанесені на диск або на тіло, що обертається), а з іншого – від смуги пропускання приймача і пов'язаних з ним електричних схем. Для вимірювань малих швидкостей, наприклад, використовуються диски з великою кількістю щілин (від 500 до декількох тисяч); у вимірах великих швидкостей у разі ультрацентрифуг, диск має тільки одну щілину, і максимальна швидкість вимірювання визначається верхньою

граничною частотою електричного ланцюга. Застосування диска з двома доріжками, зрушеними на чверть періоду простору (оптичний генератор прирощень, дозволяє визначати напрямок обертання).

#### 1.2.4 Цифровий тахометр

Цифрові тахометри – найточніші серед вимірювальних інструментів, вони дають змогу виміряти частоту обертання з точністю до 100 об/хв (рисунок 1.6). Принцип і робота тахометра зумовлені використанням високочутливих датчиків, інтегрованих у пристрій, що дає змогу з високою точністю фіксувати кількість обертів за секунду і негайно передавати отримані дані у вигляді цифрових сигналів у центральну частину приладу. У підсумку на приладовій панелі відображається поточна кількість обертів двигуна, яка відповідає реєстрованим даним.



Рисунок 1.6 – Цифровий тахометр

Дані вимірювань візуалізуються на екрані цифрового тахометра. У деяких пристроях інформація представлена у формі простих цифр, тоді як інші моделі можуть бути обладнані екраном, що імітує традиційний циферблат із вказівною стрілкою. Коли двигун вимкнений, екран тахометра стає невидимим, як чорна панель.

### 1.3 Електрормагнітні тахометри

ЕТ, який зображено на рисунку 1.7, є досить розповсюдженим вимірювальним приладом, який використовується в системах автоматизації для неперервного визначення поточної кутової швидкості обертання деталей навколо нерухомої осі. Визначення кутової швидкості обертання за допомогою ЕТ ґрунтується на взаємодії рухомих вільних електричних зарядів у провідниках із зовнішнім магнітним полем, отже, ЕТ насправді є електромеханічним або мікроелектромеханічним вимірювальним приладом [10].



Рисунок 1.7 – Електромагнітний тахометр

Елементами пристрою генератора ЕТ, є:

- статор (індуктор), що є феромагнітним каркасом, який несе 2 полюси, що направляють поле магнітної індукції, утворене струмом через котушки (електромагніти) або постійними магнітами;

- ротор (якір), який є багат шаровим циліндром з листового заліза, що обертається між полюсами статора, причому його вісь збігається з віссю статора; на його периферії паралельно осі розташовані у заглибленнях (пазах) мідних провідників; ці провідники, звані активними, з'єднані попарно своїми кінцями з іншими, які розташовані строго вздовж діаметра ротора називаються пасивними;

– колектор – циліндр з тією ж віссю, що до ротора, але значно меншого діаметра, що несе ізольовані між собою мідні пластинки, кожна з яких пов'язана з активним провідником;

– дві щітки, пов'язані з клемми генератора та притискані до колектора, які закріплюються на двох діаметрально протилежних пластинках; щітки розташовані вздовж середньої лінії перпендикулярно до напрямку індукції, так, щоб знімати максимальну ЕРС.

Розрахунок ЕРС що наводиться в активних провідниках. В  $j_m$  провіднику ( $0 \leq j \leq 2k-1$ ) внаслідок обертання виникає ЕРС величина якої визначається виразом:

$$e_j = -d\varphi_j / dt, \quad (1.6)$$

де  $d\varphi_j$  – магнітний потік, що перетинається провідником за інтервал часу  $dt$ ,

$$d\varphi_j = ds_C B_j = ds_C B_{jN}, \quad (1.7)$$

де  $ds_C$  – збільшення площі поверхні, що описується провідником, що рухається, за час  $dt$ ;

$B_{jN}$  – складова  $B$ , нормальна до  $ds_C$

Збільшення площі описуваної поверхні визначається виразом

$$ds_C = lvdt, \quad (1.8)$$

де  $l$  – довжина активного провідника;

$v$  – його лінійна швидкість.

$$v = \omega r,$$

де  $\omega$  – кутова швидкість ротора;

$r$  – його радіус.

Остаточно отримуємо:

$$e_j = -\omega r l B_{jN}. \quad (1.9)$$

У діаметрально протилежному активному провіднику внаслідок симетрії маємо:

$$e'_j = \omega r l B_{jN}. \quad (1.10)$$

Розрахунок ЕРС сукупності провідників, розташованих один бік від нейтральної лінії. У сукупності  $k$  провідників праворуч від нейтральної лінії наводиться сумарна ЕРС  $E_d$ :

$$E_d = - \sum_{j=0}^{j=k-1} \omega r l B_{jN} = - \frac{\omega}{2\pi} n \sum_{j=0}^{j=k-1} s B_{jN}, \quad (1.11)$$

де  $s = 2\pi r l / n$  – площа поверхні між двома сусідніми провідниками;

$\sum_{j=0}^{j=k-1} s B_{jN} = \Phi_0$  – потік, що виходить із полюса індуктора.

Для цих умов можна написати:

$$E_d = - \frac{\omega}{2\pi} n \Phi_0 = -N n \Phi_0, \quad (1.12)$$

де  $N$  – частота обертання ротора (кількість обертів на секунду).

Таким же чином у сукупності провідників зліва від нейтральної лінії наводиться ЕРС  $E_g$ :

$$E_g = \frac{\omega}{2\pi} n \Phi_0 = N n \Phi_0, \quad (1.13)$$

Ідея намотування полягає у з'єднанні між собою  $2k$  провідників так, щоб утворити два однакових комплекти по  $k$  послідовно з'єднаних провідників, у кожному з яких виникає ЕРС  $E$ , така, що:

$$E = \frac{\omega}{2\pi} n\varphi_0 = Nn\varphi_0, \quad (1.14)$$

Ця ЕРС надходить у зовнішній ланцюг через дві щітки, розташовані на колекторі вздовж нейтральної лінії діаметрально протилежно один до одного.

У загальному випадку, коли генератор має  $2\rho$  полюсів індукторів (кожен із потоком  $\Phi_0$ ),  $n$  провідників ротора, з'єднаних паралельно по  $2m$  гілкам обмотки, що індукується, ЕРС має величину:

$$E = \frac{\omega}{2\pi} \frac{\rho}{a} n\varphi_0 \quad (1.15)$$

Саме на цій пропорційності ЕРС  $E$  і кутовий швидкості  $\omega$  засноване використання генераторів постійного струму в тахометрії, і одна з їх переваг у порівнянні з іншими датчиками тахометрії полягає в тому, що одержуваний сигнал змінює знак одночасно зі зміною напрямку обертання [6, 9].

Реакція якоря. Якщо якір пов'язаний із зовнішнім контуром, то ЕРС викликає в ньому струм, що проходить через активні провідники з різних боків від нейтральної лінії в протилежних напрямках.

Зіставляючи попарно провідники, симетричні щодо нейтральної лінії, встановлюємо, що вони створюють індукцію, перпендикулярну до лінії полюсів і пропорційну  $l$ , ця поперечна індукція називається реакцією якоря.

Реакція якоря викликає викривлення силових ліній поля і призводить до усунення нейтральної лінії у напрямку руху. Оскільки ЕРС знімається з нерухомих щіток, встановлених спочатку нейтральній лінії ( $l=0$ ), її величина прискорено зменшується зі зростанням струму.

Реакція якоря залежить від напрямку обертання, оскільки вона призводить до усунення нейтральної лінії у напрямку обертання; для рівних, але протилежно спрямованих швидкостей обертання потоки, що діють на ротор, не однакові і таким чином відповідні ЕРС не точно симетричні.

Ротори бувають трьох видів – котушкові, дзвонові, дискоїдальні.

Генератор з котушковим ротором дозволяє виробляти відносно велику напругу в кілька вольт. Однак реакція якоря може спотворювати лінійність, а значна індуктивність обмотки  $L$  погіршує електричну швидкодію, що визначається постійної часу  $L/R$ , значною є й механічна інерція. Дзвоноподібний ротор утворюється дротяною обмоткою на пустотному немагнітному циліндрі, що обертається навколо фіксованого сердечника. Такий тип конструкції забезпечує значне зниження реакції ротора, індуктивності  $L$  та механічної інерції. Дискоїдальний ротор є ізольованим диском, на якому закріплені пластинчасті провідники; цей тип конструкції характеризується, зокрема, дуже малою величиною індуктивного опору, гарною захищеністю від сторонніх впливів і допускає відносно великі струми без викривлення лінійності.

Такий тип генераторів цікавий відсутністю колектора та щіток, що сприяє помітному збільшенню терміну служби, а також відсутності флуктуації падіння напруги на щітках та придушенню паразитних сигналів при комутаціях. Однак схеми включення таких генераторів зазвичай складніші, оскільки вимірювання амплітуди вимагає випрямлення і фільтрації вихідної напруги.

Синхронний генератор, невеликий генератор змінного струму. Ротор, пов'язаний з віссю, швидкість якої статор несе якірну обмотку (одно-або багатофазну), в якій виникає синусоїдальна ЕРС, є амплітуда і частота пропорційні швидкості обертання ротора, тобто:

$$e = E \sin \Omega t, \quad (1.16)$$

де  $E = k_1 \omega$ ,  $\Omega = k_2 \omega$ ,  $k_1, k_2$  – константи генератора.

Таким чином, величина  $\omega$  може бути визначена за амплітудою ЕРС або її частотою.

Вихідна напруга випрямляється та фільтрується для отримання постійної пропорційної напруги; воно залежить від напрямки обертання. Ефективність фільтра падає зі зменшенням частоти, тому ступінь биття напруги зростає при малих швидкостях обертання, визначаючи нижню межу застосування. Крім того, наявність фільтра вносить постійну час, що знижує швидкодію [6, 7].

Визначення швидкості частоти сигналу. Частотний вимір представляє інтерес, коли створюваний синхронним генератором сигнал необхідно передати на відстань; у цьому випадку втрати в лінії не впливають на вимірювання.

Як приклад опишемо тахометр з електричною передачею, що випускається фірмою Jaeger. Його генератор, що задає, – трифазний, причому кожна обмотка його ротора з'єднана з однією з обмоток синхронного двигуна. Тому в двигуні виникає поле, яке обертається з тією ж швидкістю, що ротор генератора, і синхронно захоплює ротор двигуна, що являє собою магніт. Ротор двигуна пов'язаний з другим магнітом (вимірювальним), який обертається перед металевим диском; в останньому виникають струми Фуко, пропорційні швидкості обертання вимірювального магніту, і момент, що обертає  $C_m$ , пропорційний швидкості. Цей момент, згідно з законом Ленца, прагне повернути диск у бік руху вимірювального магніту, він врівноважується протилежною парою сил спіральної пружини, отже відхилення  $a$  диска пропорційно швидкості обертання.

У разі малих переміщень датчик швидкості виготовляється з магніту та котушки. Оскільки один з цих елементів фіксований, а інший пов'язаний з деталлю, що рухається, їх відносне переміщення наводить в котушці ЕРС пропорційну швидкості. Коли рухома котушка, вона переміщається в радіальному полі індукції тороїдального ЕРС описується виразом:

$$e = 2\pi rnBv = lBv, \quad (1.17)$$

де  $r$  – радіус витків;

$n$  – число витків;

$l = 2\pi rn$  – довжина дроту котушки;

$B$  – величина індукції;

$v$  – швидкість руху.

Максимальне переміщення для таких конструкцій становить кілька міліметрів, чутливість – близько одного вольт на метр та секунду, а відхилення від лінійності – близько  $\pm 10\%$ .

Для переміщень більш значних (що досягають 0,5 м) використовують магніт, укріплений на деталі, що рухається, який переміщається вздовж осі тандему з двох котушок.

ЕРС наведена в котушці переміщенням магніту, пропорційна його швидкості. ЕРС котушок мають протилежний знак, оскільки в них переміщуються протилежні полюси; тому обидві котушки з'єднані послідовно і зустрічно за знаком, так що в цьому випадку виходить ненульова сумарна ЕРС

#### 1.4 Висновки до розділу

Проаналізовано та розглянуто загальні принципи функціонування та використання різних видів тахометрів. Кожен із видів має свої переваги та недоліки, а вибір тахометра залежить від конкретних умов використання. Важливо пам'ятати, що тахометри є необхідними інструментами для забезпечення безпеки та ефективності у різних галузях промисловості.

Показано, що найважливішою проблемою при проектуванні та використанні датчика є забезпечення сталості чутливості.

Вивчено принципи дії електромагнітних ЕТ.

## 2 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТАХОМЕТРІВ

Моделювання ЕТ вкрай потрібне для визначення похибок вимірювання кутової швидкості для різних режимів роботи приладів у системах автоматизації. Перевагою ММ порівняно із проведенням суто натурних випробувань тахометрів є можливості дослідження різноманітних режимів роботи приладу, відтворення яких під час проведення випробувань може бути досить складним. Характерним прикладом режимів роботи тахометрів, які досить складно відтворювати під час проведення випробувань, є високочастотні коливання кутової швидкості, що обумовлені, наприклад, крутильними коливаннями деталей, які обертаються навколо нерухомої осі [10]. Такі особливі режими роботи тахометрів, зазвичай, відповідають досить небезпечним режимам, у тому числі таким, які можуть призвести до руйнування деталей, або інших порушень умов нормальної експлуатації технічних систем. Отже, дослідження впливу режимів експлуатації на похибку вимірювання кутової швидкості електромагнітними тахометрами вкрай важливе для забезпечення безпечної експлуатації різноманітних технічних систем. Крім цього, перевагою ММ є можливість дослідження процесів в ЕТ, які ще не виготовлені, що, зрозуміло, є вкрай корисним на етапі проектування тахометрів, у тому числі для забезпечення можливостей щодо вимірювання кутової швидкості на особливих режимах обертання.

### 2.1 Розрахункова схема електромагнітного тахометра

Кутова швидкість – векторна фізична величина, що характеризує швидкість обертання матеріальної точки навколо центру обертання. Вектор кутової швидкості за величиною дорівнює куту повороту точки навколо центру обертання за одиницю часу. Сучасні прилади, що базуються на різноманітних

принципах, механічних, електричних, магнітних тощо застосовувалися та застосовуються для вимірювання середніх значень швидкостей. Поведінка цих приладів при режимі роботи, що не встановився, піддається виміру лише деякими методами. Так само багато приладів впливають на деталь, що обертається, або мають серйозні похибки і складності в установленні та налаштуванні, ще частіше ці проблеми зустрічаються всі разом [11, 12].

На рис. 2.1 наведено схематичну будову ЕТ.

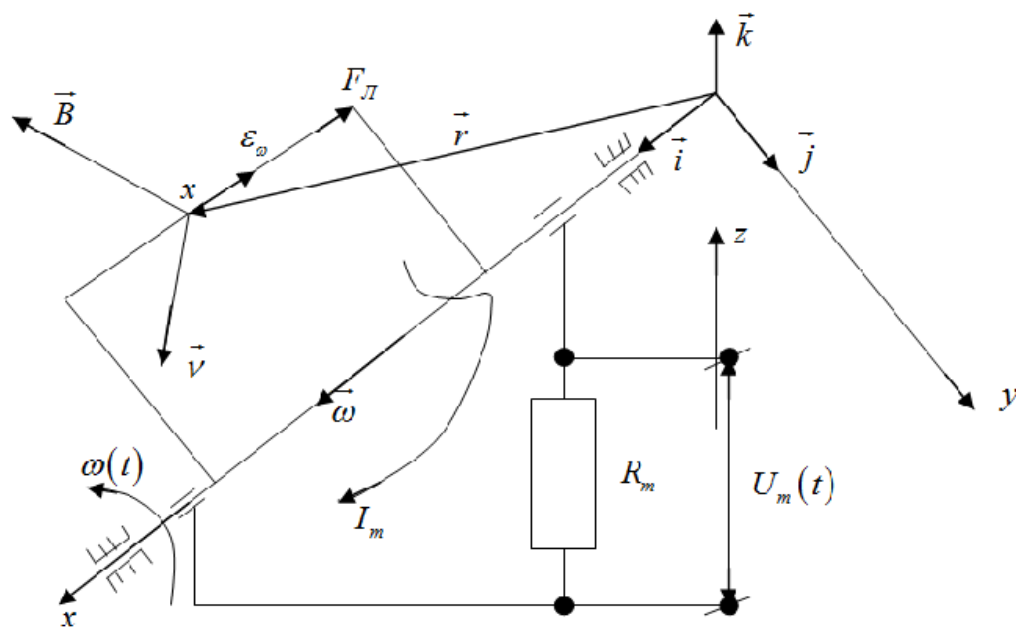


Рисунок 2.1 – Схематична будова ЕТ

Основним елементом ЕТ (рис. 2.1) є провідник електричного струму, котрий обертається в зовнішньому магнітному полі з індукцією  $\vec{B}$ . Як відомо із фізики, провідники електричного струму містять вільні електричні заряди (рис. 2.1) у вигляді електронів або іонів [12]. Під час обертання такого провідника із кутовою швидкістю  $\omega$  навколо нерухомої осі  $x$ , вільні електричні заряди, що містяться в ньому, зрозуміло, будуть переноситися разом із рухомих провідником (рис. 2.1). У результаті цього матимемо вільні електричні заряди, що переносяться провідником в зовнішньому в магнітному полі, на які, як відомо із фізики, діє сила Лоренца:

$$\vec{F}_L = x\vec{v}\vec{B} \quad (2.1)$$

де  $\vec{F}_L$  – сила Лоренца, з якою зовнішнє магнітне поле діє на рухомий електричний заряд;

$x$  – електричний заряд;

$\vec{v}$  – тривалість електричного заряду;

$\vec{B}$  – індукція магнітного поля.

Сила Лоренца дуже схожа за своїм принципом на силу Ампера, різниця полягає в тому, що остання діє на весь провідник, який загалом електрично нейтральний, а сила Лоренца описує вплив електромагнітного поля лише на одиничний заряд, що рухається. Вона характеризується тим, що не змінює швидкість переміщення зарядів, а лише впливає на вектор швидкості, тобто здатна змінювати напрямок руху заряджених частин [12].

Оскільки провідник електричного струму, передбачений в ЕТ, обертається навколо нерухомої осі (рис. 2.1), то, як відомо з механіки, швидкість вільного електричного заряду, що переноситься таким провідником, визначатиметься у наступному вигляді:

$$\vec{v} = \vec{\omega} \cdot \vec{r} \quad (2.2)$$

де  $\vec{\omega}$  – вектор кутової швидкості;

$\vec{r}$  – радіус-вектор точки, котра визначає положення рухомого електричного заряду.

Врахуємо швидкість (2.2) під час визначення сили Лоренца (2.1), та в результаті цього одержимо таке:

$$\vec{F}_L = x(\vec{\omega} \cdot \vec{r}) \cdot \vec{B} \quad (2.3)$$

Дію сили Лоренца (2.3) на вільні електричні заряди в провіднику можна уявляти як результат наявності електричного поля, що визначатиметься так:

$$\vec{E}_\omega = (\vec{\omega} \cdot \vec{r}) \cdot \vec{B} \quad (2.4)$$

де  $\vec{E}_\omega$  – енергія поля, котра утворюється електричним зарядом, який рухається в магнітному полі.

Уведемо до розгляду вектори кутової швидкості, індукції магнітного поля та визначимо положення рухомого вільного заряду провідника за допомогою декартових координат (рис. 2.1):

$$\vec{\omega} = \omega \vec{i}, \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = -B \vec{j}, \quad (2.6)$$

$$\vec{r} = x \vec{i} + y \vec{j} + z \vec{k}, \quad (2.7)$$

де  $\vec{\omega}$  – вектор кутової швидкості;

$\vec{B}$  – вектор індукції магнітного поля;

$\omega$  – проекція вектору кутової швидкості на вісь  $x$ ;

$B$  – модуль індукції магнітного поля;

$x, y, z$  – координати рухомого вільного електричного заряду;

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – орти нерухомих координатних вісей.

З урахуванням співвідношень (2.5) та (2.6) визначимо кутову швидкість (2) наступним чином:

$$\vec{v} = \vec{\omega} \cdot \vec{r} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \omega & 0 & 0 \\ x & y & z \end{vmatrix} = -z\omega\vec{j} + y\omega\vec{k} \quad (2.8)$$

Далі використаємо визначену у вигляді (2.8) кутову швидкість для обчислення електричного поля (2.4), що утворюється рухомим електричним зарядом у магнітному полі:

$$\vec{v} = (\vec{\omega} \cdot \vec{r}) \cdot \vec{B} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & -z\omega & y\omega \\ 0 & -B & 0 \end{vmatrix} = B\omega y\vec{i} \quad (2.9)$$

Отже, завдяки результату (2.9) матимемо такий вираз для електричного поля, що утворюється електричним зарядом, який рухається у магнітному полі (рис. 2.1):

$$\vec{E}_\omega = B\omega y\vec{i} \quad (2.10)$$

Одержаний вираз (2.10) визначає електричне поле, що утворюється вільним електричним зарядом провідника, що обертається навколо нерухомої осі та передбачений для визначення кутової швидкості. Обмотка ротора ЕТ насправді містить не один провідник, а багато провідників, які рухаються у зовнішньому магнітному полі [11, 12]. Отже, сумарний ефект великої кількості провідників (2.10) призводитиме до такого результату:

$$\vec{E}_\omega = B_e\omega, \quad (2.11)$$

де  $B_e$  – характеристика тахометра, що враховує наявність великої кількості провідників в обмотці.

Як підтверджує співвідношення (2.11), обертання ротора (рис. 2.1) ЕТ у спеціально створеному зовнішньому магнітному полі буде призводити до виникнення електрорушійної сили, величина якої пропорційна кутовій швидкості обертання ротора. Отже, якщо замкнути контакти обмотки ротора ЕТ за допомогою вимірювального резистора, то в результаті матимемо електричний струм  $I_m$  (рис. 2.1). При цьому, падіння напруги  $U_m$  на вимірювальному резисторі  $R_m$  (рис. 2.1) буде визначатися так:

$$U_m = I_T R_m, \quad (2.12)$$

де  $U_m$  – вимірювальна напруга тахометра, що містить інформацію про кутову швидкість;

$R_m$  – витривалий резистор тахометра;

$I_T$  – струм в еквівалентному ланцюзі тахометра.

Цілком зрозуміло, що падіння напруги (2.12) буде певними чином залежити від кутової швидкості:

$$U_m = U_m(\omega) \quad (2.13)$$

Як свідчить співвідношення (2.13), за величиною вимірювальної напруги (2.12) можемо встановлювати кутову швидкість. У загальному випадку маємо, вимірювану кутову швидкість, яка залежить від часу:

$$\omega = \omega(t), \quad (2.14)$$

де  $t$  – час.

Завдяки співвідношенням (2.13) та (2.14) матимемо, що вимірювальна напруга (2.12) буде представляти собою функцію часу:

$$U_m = U_m(t) \quad (2.15)$$

Саме у вигляді (2.15) маємо результати вимірювань кутової швидкості електромагнітним акселерометром.

## 2.2 Математична модель процесів в електромагнітному тахометрі

ММ не є самоціллю, а лише засобом для розв'язання певної проблеми. У зв'язку з цим необхідність створення ММ впливає з методології розв'язання проблеми, що обирається дослідником. Для вирішення складних проблем, зазвичай, застосовують так званий системний похід, де моделювання є основним методом дослідження. Залежно від предметної області, що вивчається, від розв'язуваної проблеми, від математичної підготовки дослідника і вимог замовника ММ можуть мати різні форми та способи представлення. У найпростішому випадку модель може бути однофакторною лінійною або нелінійною функцією з постійними числовими коефіцієнтами (параметрами моделі, що відображають внутрішній стан системи, котра вивчається) [12, 13].

Процеси, що відбуваються в ЕТ під час проведення вимірювань кутової швидкості, характеризуються певними фізичними величинами, що змінюються протягом часу. З урахуванням цієї обставини ММ процесів в ЕТ має бути представлена у вигляді звичайних диференціальних рівнянь з початковими умовами.

Як свідчить співвідношення (2.12), ММ процесів в ЕТ протягом вимірювання кутової швидкості має визначати електричний струм  $I_T$  (рис. 2.2), який утворюється внаслідок обертання ротора тахометра [12, 13]. Отже, шукана невідома має електричну природу, тому для моделювання процесів в ЕТ слід побудувати еквівалентну електричну схему тахометра. З урахуванням прийнятої схематизації (рис. 2.1) та співвідношень (2.11) – (2.15), еквівалентна

електрична схема тахометра може бути представлена, як показано на рис. 2.2. У запропонованій еквівалентній електричній схемі тахометра (рис. 2.2) враховано опір  $R_T$  обмотки ротора, індуктивність  $L_T$  обмотки ротора, наявність джерела електрорушійної сили  $E_\omega$ , котра відповідно до співвідношення (2.11) залежить від кутової швидкості (2.14) ротора, а також вимірювальний резистор  $R_m$ , на якому вимірюється електрична напруга (2.15), котра завдяки співвідношенню (2.12) містить інформацію (2.14) про вимірювану кутову швидкість. Саме за допомогою еквівалентної електричної схеми ЕТ, що запропонована відповідно до рисунку 2.2, досліджуватимемо електричні процеси, що відбуватимуться в тахометрі під час вимірювання кутової швидкості. Вплив вимірюваної кутової швидкості (2.14) на електричні процеси (рис. 2.2), що відбуваються в ЕТ, враховується через залежність (2.11), яка встановлює зв'язок електрорушійної сили з кутовою швидкістю (2.14) ротора.

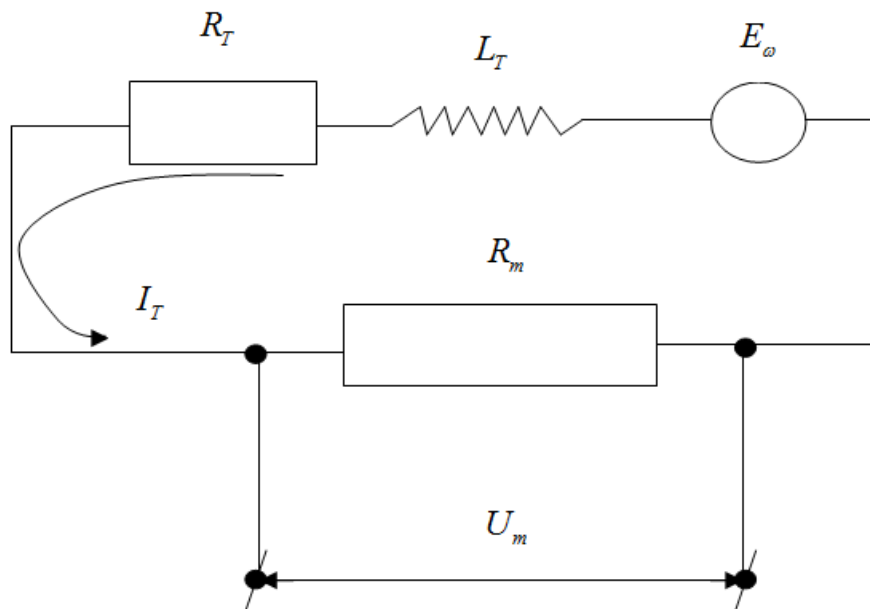


Рисунок 2.2 – Еквівалентна електрична схема ЕТ

Для побудови диференціального рівняння ММ еквівалентної електричної схеми (рис. 2.2) ЕТ використовуватимемо відомі електромеханічні аналогії (таб. 2.1) та рівняння Лагранжа 2-го роду:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L}{\partial q_k} = - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_k} + Q_k, k = 1, 2, \dots, n, \quad (2.16)$$

де  $n$  – кількість ступенів вільності системи;

$q_1, q_2, \dots, q_n$  – узагальнені координати досліджуваної системи;

$\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n$  – узагальнені швидкості досліджуваної системи;

$L$  – функція Лагранжа, що визначає різницю між кінетичною та потенційною енергією досліджуваної системи;

$R$  – дисипативна функція Релея, котра характеризує сили в'язкого опору та дорівнює половині потужності сили в'язкого опору, що постійно залежить від швидкості;

$Q_k$  – узагальнена сила, відповідає узагальненій координаті  $q_k$ .

Таблиця 2.1 – Електромагнітні аналогії

Механічна величина	Електрична величина
Переміщення, м	Заряд, К
Швидкість, м/с	Сила струму, А
Маса, кг	Індуктивність, Т <sub>н</sub>
В'язкий опір, Нс/м	Активний опір, Ом
Податливість, м/Н	Ємність, Ф
Сила, Н	Напруга, В

У випадку досліджуваної еквівалентної електричної схеми (рис. 2.2) ЕТ функція Лагранжа та дисипативна функція Релея із рівнянь Лагранжа 2-го роду

(2.16) з урахуванням електромеханічних аналогій (таб. 2.1) матимуть такий вигляд:

$$L = \frac{1}{2} L_T I_T^2, \quad (2.17)$$

$$R = \frac{1}{2} R_T I_T^2, \quad (2.18)$$

де  $L_T$  – індуктивність обмотки ротора тахометра;

$R_T$  – опір обмотки ротора тахометра;

$I_T$  – струм еквівалентного електричного ланцюга тахометра.

Використовувана під час моделювання процесів в ЕТ еквівалентна електрична схема (рис. 2.2) насправді є системою з одним ступенем вільності, оскільки стан відповідного електричного ланцюга визначається лише одним параметром, а саме – електричним струмом  $I_m$  (рис. 3.2). Отже, будемо використовувати далі узагальнену координату, що вводиться до розгляду наступним чином:

$$n = 1, q_1 = q = \int I_m dt, \quad (2.19)$$

де  $q_1 = q$  – узагальнена координата, що представляє електричний заряд еквівалентного електричного ланцюга тахометра.

Щоб визначити узагальнені сили, котрі містяться у рівняннях Лагранжа 2-го роду, обчислимо спочатку суму віртуальних робіт сил, які не є потенційними та дисипативними, або розглядаються окремо від них. У результаті матимемо:

$$\delta A = E_\omega \delta q_1, \quad (2.20)$$

де  $\delta q_1$  – варіація електричного заряду в еквівалентному ланцюзі тахометра.

Завдяки виразу (2.20) матимемо узагальнену силу еквівалентного електричного ланцюга ЕТ (рис. 2.2), котра відповідає узагальненій координаті (2.19), у такому вигляді:

$$Q_1 = E_\omega \quad (2.21)$$

З урахуванням прийнятої у вигляді (2.19) узагальненої координати функція Лагранжа (2.17) та дисипативна функція Релея (2.18) набудуть такого вигляду:

$$L = \frac{1}{2} L_T \dot{q}_1^2, \quad (2.22)$$

$$R = \frac{1}{2} R_T \dot{q}_1^2, \quad (2.23)$$

Таким чином, для прийнятої узагальненої координати (2.19) та відповідній їй узагальненій силі (2.20), з урахуванням виразу (2.22) функції Лагранжа, виразу (2.23) дисипативної функції Релея, та співвідношення (3.11) рівняння Лагранжа 2-го роду (2.16) приведуть до такого результату:

$$L_T \ddot{q}_1 = -R_T \dot{q}_1 + B_e \omega(t) \quad (2.24)$$

Отже, завдяки отриманому результату (2.24), матимемо математичну модель процесів в електромагнітному тахометрі (рис. 2.2), що відбуваються під час вимірювань кутової швидкості, у вигляді звичайного диференціального рівняння із початковою умовою

$$L_T \frac{dI_T}{dt} + R_T I_T = B_e \omega(t), \quad I_T(0) = 0 \quad (2.25)$$

У вихідній умові (2.25) передбачається, що у початковий момент часу електричний струм в еквівалентному електричному ланцюзі ЕТ дорівнював нулю, що дозволяє досліджувати перехідні процеси під час вмикання тахометра. Хоча ММ (2.25) дозволяє вичерпно вивчати процеси в ЕТ під час вимірювань кутової швидкості, але більш зручною є ММ, яка сформульована відносно вимірювальної напруги (2.15). Для отримання такої моделі використаємо співвідношення (2.12), що дозволить отримати наступне:

$$I_T(t) = \frac{U_m(t)}{R_m} \quad (2.26)$$

З урахуванням виразу (2.26) ММ процесів в ЕТ під час вимірювань кутової швидкості набуде такого найбільш зручного вигляду:

$$\frac{L_T}{R_m} \frac{dU_m}{dt} + \frac{R_T}{R_m} U_m = B_e \omega(t), U_m(0) = 0 \quad (2.27)$$

Як свідчить ММ (2.27), процеси, що відбуваються в ЕТ під час вимірювань кутової швидкості, можна представити у вигляді такого відображення:

$$\omega(t) \xrightarrow{\omega_T} U_m(t), \quad (2.28)$$

де  $\omega_T$  – відображення кутової швидкості у вимірювальну напругу тахометра.

Оскільки диференціальне рівняння ММ (2.27) є лінійним, то відображення (2.28) зручно представляти у вигляді динамічної ланки, як показано на рис. 2.3. Передаточна функція динамічної ланки (рис. 2.3), що зв'язує вимірювану кутову швидкість (2.14) та вимірювальне напруження (2.15) має такий вигляд:

$$\omega_T(S) = \frac{B_e R_m}{L_T S + R_T}, \quad (2.29)$$

де  $\omega_T(S)$  – передаточна функція ЕТ.

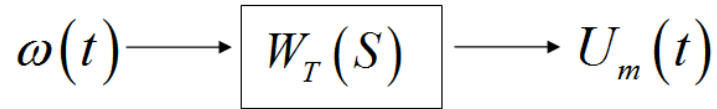


Рисунок 2.3 – Представлення ЕТ у вигляді динамічної ланки

Таким чином, у вигляді (2.27) маємо зручну ММ процесів, які відбуваються в ЕТ під час вимірювань кутової швидкості. Під час досліджень процесів в автоматизованих системах також зручно користуватися передаточною функцією (2.29), що узгоджується із підходами теорії автоматичного управління.

### 2.3 Вимірювання за допомогою тахометра

Як було показано вище, моделювання процесів в ЕТ зводиться до побудови відображення (2.28), в якому кутова швидкість (2.14) виступає як відома величина, а невідомою величиною є вимірювальна напруга (2.15). Водночас, процес вимірювання кутової швидкості ЕТ з точки зору користувача відрізняється від процесу моделювання тахометра. Дійсно, під час вимірювання за допомогою тахометра кутова швидкість (2.14) насправді є невідомою, а відомою є вимірювальна напруга (2.15). Отже, процес вимірювання кутової швидкості ЕТ з точки зору користувача представляє собою відображення вимірювальної напруги (2.15) у відповідну їй кутову швидкість (2.14), яке має такий вигляд:

$$v_m(t) \xrightarrow{W_m} \omega(t), \quad (2.30)$$

де  $W_m$  – відображення вимірюваної напруги в кутову швидкість.

Побудова відображення (2.30) вимірювальної напруги (2.15) у відповідну їй кутову швидкість (2.14) здійснюється за допомогою диференціального рівняння ММ (2.27), в якому невідому кутову швидкість (2.14) слід записати ліворуч, а відому вимірювальну напругу (2.15) – праворуч від знаку рівності:

$$\omega(t) = \frac{L_T}{B_e R_m} \frac{dv_m}{dt} + \frac{R_T}{B_e R_m} U_m \quad (2.31)$$

Відображення (2.28), що визначається співвідношенням (2.31), в деяких випадках зручно представляти у вигляді динамічної ланки (рис. 2.4), що має таку передаточну функцію:

$$W_m(s) = \frac{L_T s + R_T}{B_e R_m}, \quad (2.32)$$

де  $W_m(s)$  – передаточна функція вимірювання за допомогою ЕТ.

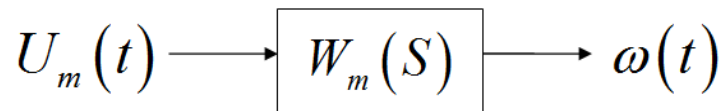


Рисунок 2.4 – Представлення вимірювань за допомогою ЕТ у вигляді динамічної ланки

Зрозуміло, що у випадку вимірювальної напруги (2.15), відомої у вигляді точно заданого аналітичного виразу залежності від часу визначення кутової швидкості за допомогою формули (2.31) не містить принципових труднощів та зводиться до диференціювання відомої функції. Водночас, під час вимірювань кутової швидкості за допомогою ЕТ не маємо точно заданого аналітичного виразу, котрий би визначав вимірювальну напругу (2.15), а маємо лише сигнал, який представляє таку напругу в аналоговій або цифровій формі. Зрозуміло, що такий сигнал природно міститиме похибки вимірювань, притаманні будь-якій

вимірювальній апаратурі, вимірювальним приладам та пристроям. Відомо, що диференціювання наближено представленої функції є некоректним за Адамаром, тобто незначні похибки визначення функції призводять до теоретично нескінченних похибок визначення її похідних. Завдяки цьому, доданок у формулі (2.31), який містить похідну вимірювальної напруги (2.15), буде збільшувати похибку, що містяться в сигналі (2.15) через обмежену точність вимірювань. З урахуванням цієї обставини, при визначенні кутової швидкості (2.14) за вимірювальною напругою (2.15), зазвичай, нехтують доданком у формулі (2.31), що містить похідну вимірювальної напруги (2.15), та визначення вимірюваної кутової швидкості здійснюють наближено у вигляді

$$\omega(t) \approx \bar{\omega}(t), \quad \bar{\omega}(t) = \frac{1}{B_e} \frac{R_r}{R_m} U_m(t), \quad (2.33)$$

де  $\bar{\omega}(t)$  – наближено визначена кутова швидкість.

Хоча формула (2.33) принципово є наближеною, на відміну від точної формули (2.31), але використання точної формули у випадку сигналу вимірювальної напруги (2.15), що містить похибки, буде призводити до більших похибок визначення кутової швидкості, ніж використання наближеної формули (2.33). Слід також зазначити, що оцінку кутової швидкості за наближеною формулою (2.33) зручно представляти у вигляді динамічної ланки (рис. 2.4) із наближено визначеною передаточною функцією

$$W_m(s) \approx \bar{W}_m(s), \quad \bar{W}_m(s) = \frac{1}{B_e} \frac{R_r}{R_m}, \quad (2.34)$$

де  $\bar{W}_m(s)$  – наближена передаточна функція вимірювання за допомогою ЕТ.

Бачимо, що використання наближеної формули (2.33) або динамічної ланки (рис. 2.4) із наближеною передаточною функцією (2.33) є досить зручним у практичному використанні, оскільки визначення кутової швидкості (2.13)

зводиться до звичайного множення вимірювальної напруги (2.15) на відповідний коефіцієнт, який залежить від параметрів еквівалентного електричного ланцюга (рис. 2.2), що представляє ЕТ відповідно прийнятої схематизації (рис. 2.1). Заразом, слід розуміти, що використання наближеної формули (2.33) призводитиме до похибки визначення кутової швидкості (2.14) таким чином, що абсолютне значення цієї похибки буде таким:

$$\varepsilon(t) = \left| \omega(t) - \frac{1}{B_e} \frac{R_T}{R_m} U_m(t) \right|, \quad (2.35)$$

де  $\varepsilon(t)$  – абсолютна похибка вимірювання кутової швидкості тахометром.

Завдяки результату (2.35) бачимо, що абсолютна похибка оцінювання кутової швидкості (2.14) за вимірювальною напругою (2.15) залежатиме від вигляду функціональної залежності кутової швидкості (2.14). Зрозуміло, що вигляд залежності від часу (2.14) кутової швидкості визначається режимом експлуатації та особливостями будови технічної системи, в якій передбачений досліджуваний ЕТ.

## 2.4 Висновки до розділу

Запропонована математична модель ЕТ у вигляді диференціального рівняння першого порядку відносно електричної напруги, що формується тахометром під час вимірювань кутової швидкості довільного вигляду, котра дозволяє виконувати дослідження характеристик ЕТ як складових складних автоматизованих систем.

Зазначена модель дозволяє досліджувати процеси під час вимірювання кутової швидкості з урахуванням перехідних процесів, які відбуваються.

### 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ТАХОМЕТРІ

Параметри ЕТ, певна річ, повинні бути підтвердженими результатами проведених випробувань виробів. Перефразуюмо: випробування передусім є обов'язковим елементом під час проєктування тахометрів. Водночас можливості випробувань можуть значно обмежуватись спроможністю реалізувати певні специфічні режими експлуатації, як-от наявність високочастотних складових кутової швидкості, котрі можуть обумовлюватись, зокрема, високочастотними крутильними коливаннями. Зважаючи на це КМ можна назвати найефективнішим способом дослідження специфічних режимів експлуатації ЕТ, бо такий підхід дозволяє відтворювати різноманітні режими експлуатації. Таким чином, розглянемо КМ процесів в ЕТ, в якому наявні певні характеристики (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Характеристики ЕТ

Характеристика	Значення
$R_T$	36 Ом
$L_T$	1,6 мГн
$B_e$	29 мВ·с
$R_m$	100 Ом

Для реалізації КМ процесів в ЕТ застосуємо середовище графічного моделювання Xcos комп'ютерної системи математичних обчислень разом із моделюванням Scilab.

### 3.1 Процес вимірювання кутової швидкості

Основним призначенням ЕТ передусім є вимірювання кутової швидкості. Таким чином, КМ електромагнітних тахометрів обов'язково повинно спиратися на моделювання процесів вимірювання саме кутової швидкості. Як було зазначено вище, вимірювання кутової швидкості ЕТ зводиться до вимірювання електричної напруги, котра генерується під час обертання ротора тахометра. Власне ММ такої електричної напруги, було одержано у вигляді (2.27), а процес утворення даної напруги (під час обертання ротора ЕТ) можна представити за допомогою динамічної ланки із передаточною функцією (2.29). Під час моделювання процесів в ЕТ разом із моделюванням вимірюваної напруги доцільно передбачити моделювання власне процесу вимірювання, іншими словами, визначення кутової швидкості через вимірювану електричну напругу, що, як було подано раніше, визначається співвідношенням (2.33). Водночас для оцінки параметрів ЕТ слід передбачити обчислення абсолютної похибки вимірювання кутової швидкості, котра визначається співвідношенням (2.35). Комп'ютерну модель процесів в ЕТ, в якій враховано зазначені вище обставини, доцільно розробити за допомогою інструментів графічного середовища Xcos – комп'ютерної системи математичних обчислень, а також моделювання Scilab, що продемонстровано на рисунку 3.1.

У розробленій комп'ютерній моделі (рисунок 3.1) передбачено дослідження процесів в електромагнітному тахометрі під час вимірювання сталої кутової швидкості. Це важливо для обґрунтування коректності такої моделі шляхом підтвердження відомих параметрів тахометра. Таким чином, на прикладі цієї моделі (рисунок 3.1) ми повинні продемонструвати, що досліджуваний ЕТ насправді забезпечує належне вимірювання кутової швидкості. Крім того, необхідно дослідити певні властивості перехідних та усталених процесів в ЕТ під час вимірювання сталої кутової швидкості, котру миттєво отримав нерухомий ротор тахометра.

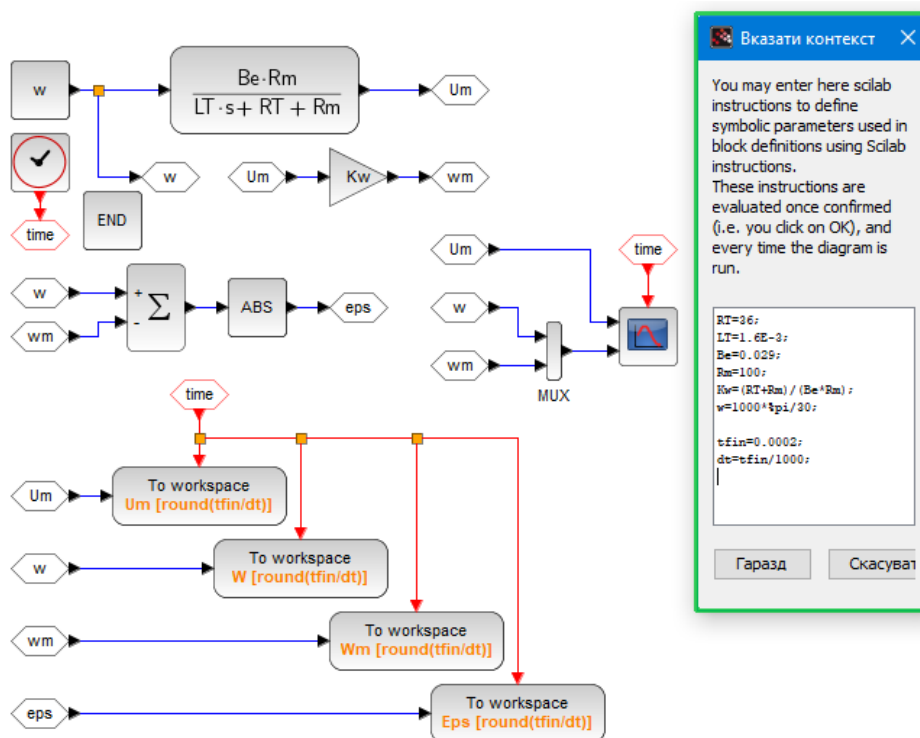


Рисунок 3.1 – КМ процесів в ЕТ, котра побудована інструментами графічного середовища Xcos комп'ютерної системи математичних обчислень та моделювання Scilab

До того ж під час виконання досліджень за допомогою запропонованої моделі ЕТ (рисунок 3.1) реалізуємо сценарії виконання досліджень за допомогою автоматизованої побудови, а також форматування (додаток А) їхніх результатів через відповідні графіки для подальшого застосування таких сценаріїв під час дослідження специфічних режимів експлуатації ЕТ. Сценарії досліджень оформлені як програми-скрипти (додаток Б), які написані спеціалізованою мовою програмування комп'ютерної системи математичних обчислень та моделювання Scilab, до того ж забезпечують автоматизацію моделювання процесіву досліджуваному електромагнітному тахометрі за різної кутової швидкості разом із автоматичною побудовою та форматуванням графіків залежності від часу одержуваної вимірювальної напруги, фактичної та вимірюваної кутової швидкості й абсолютної похибки вимірювання кутової швидкості.

Результати моделювання вимірюваної напруги, котра формується ЕТ під час вимірювання сталої кутової швидкості, котру первинно нерухомий ротор тахометра отримує миттєво, продемонстровані на рисунку 3.2.

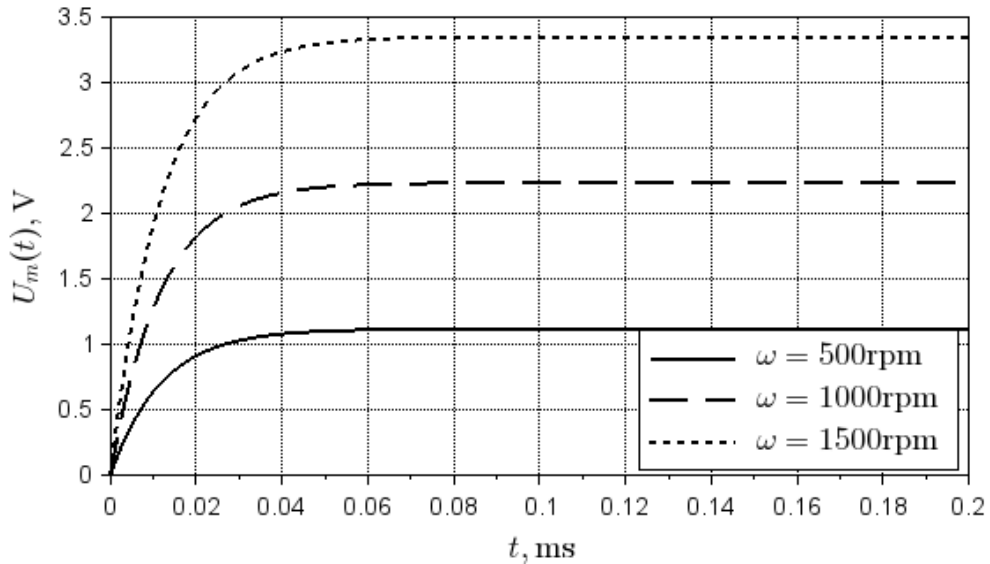


Рисунок 3.2 – Результати моделювання вимірюваної напруги ЕТ для різної сталої кутової швидкості, котру миттєво отримав первинно нерухомий ротор тахометра

Одержані результати (рисунок 3.2) свідчать про те, що у разі миттєвого отримання нерухомим ротором ЕТ сталої кутової швидкості, маємо перехідний процес, який триває протягом незначного часу  $t \approx 0,05$  мс, а після завершення даного перехідного процесу маємо усталене значення вимірюваної напруги, що відповідає вимірюваній кутовій швидкості. Зрозуміло що кожному значенню кутової швидкості відповідає своє значення вимірюваної напруги, яка формується ЕТ, що саме і забезпечує можливість вимірювання кутової швидкості. Таким чином, одержані результати підтверджують коректність розробленої математичної та комп'ютерної моделі процесів вимірювання кутової швидкості в ЕТ.

Невідмінно оцінка кутової швидкості за вимірюваною напругою, котра формується ЕТ, повинна узгоджуватись із фактичною кутовою швидкістю,

водночас одержані результати (рисунок 3.3 – 3.5) якраз свідчать про таку узгодженість для різних значень вимірюваної сталої кутової швидкості. Крім того, встановлення сталою значення вимірюваної напруги, що відповідає вимірюваній кутовій швидкості, зрозуміло, потребує певного часу через індуктивність природно притаманну ротору ЕТ, втім за результатами розрахунків бачимо, що цей час є занадто незначний і становить досить мале значення  $t \approx 0,05$  мс для випадку, коли первинно нерухомий ротор тахометра миттєво отримує сталу кутову швидкість (рисунок 3.3 – 3.5). Таким чином, одержані результати свідчать про коректність розробленої ММ та КМ процесів у тахометрі. Водночас демонструють, що ЕТ вважається досить досконалим вимірювальним приладом.

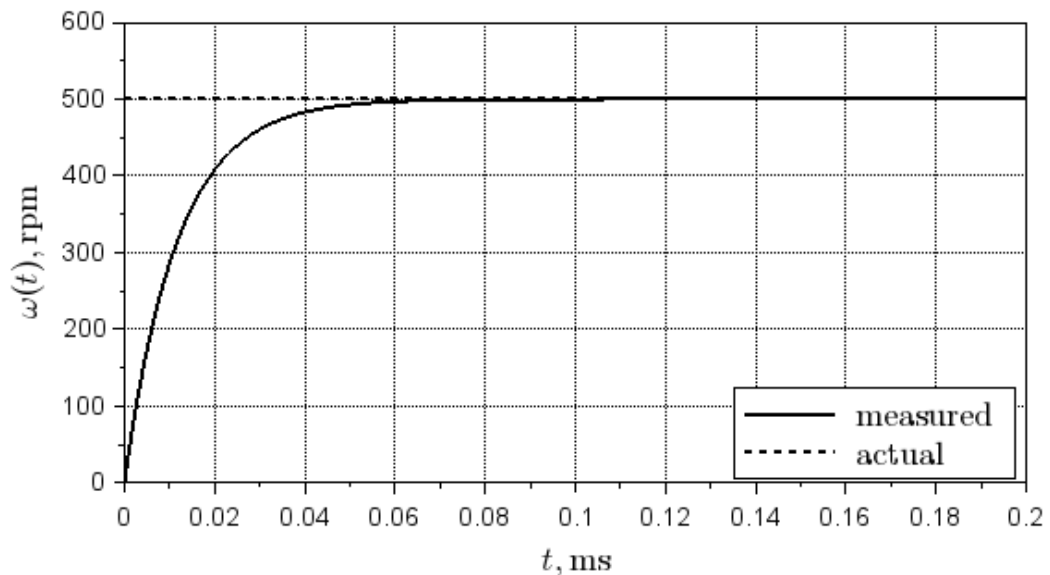


Рисунок 3.3 – Результати моделювання процесу вимірювання кутової швидкості за вимірюваною напругою ЕТ для сталої кутової швидкості  $\omega = 500$  rpm, яку миттєво отримав первинно нерухомий ротор тахометра

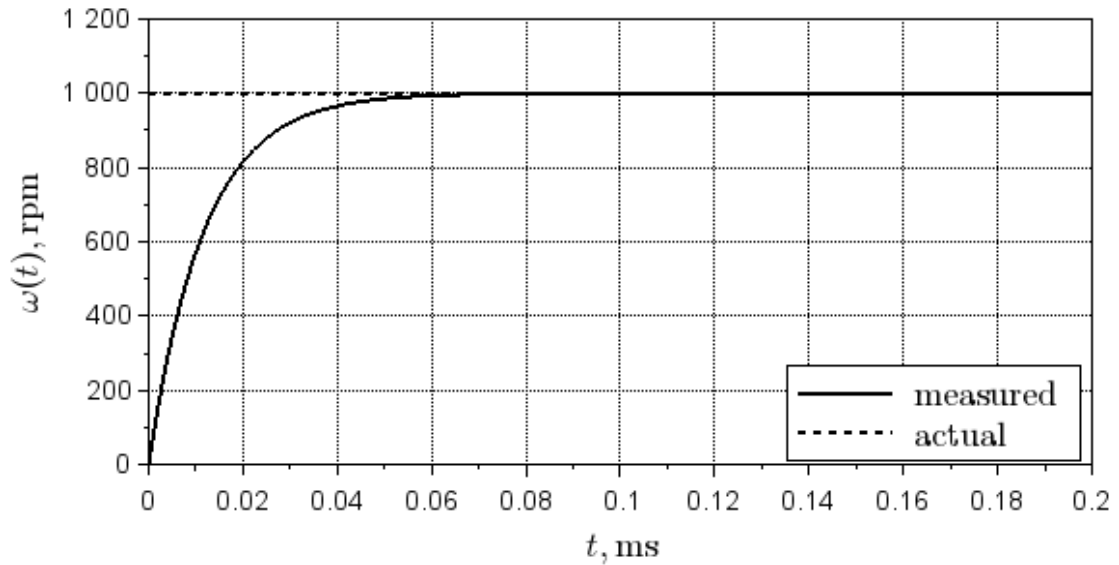


Рисунок 3.4 – Результати моделювання процесу вимірювання кутової швидкості за вимірюваною напругою ЕТ для сталої кутової швидкості  $\omega = 1000$  rpm, яку миттєво отримав первинно нерухомий ротор тахометра

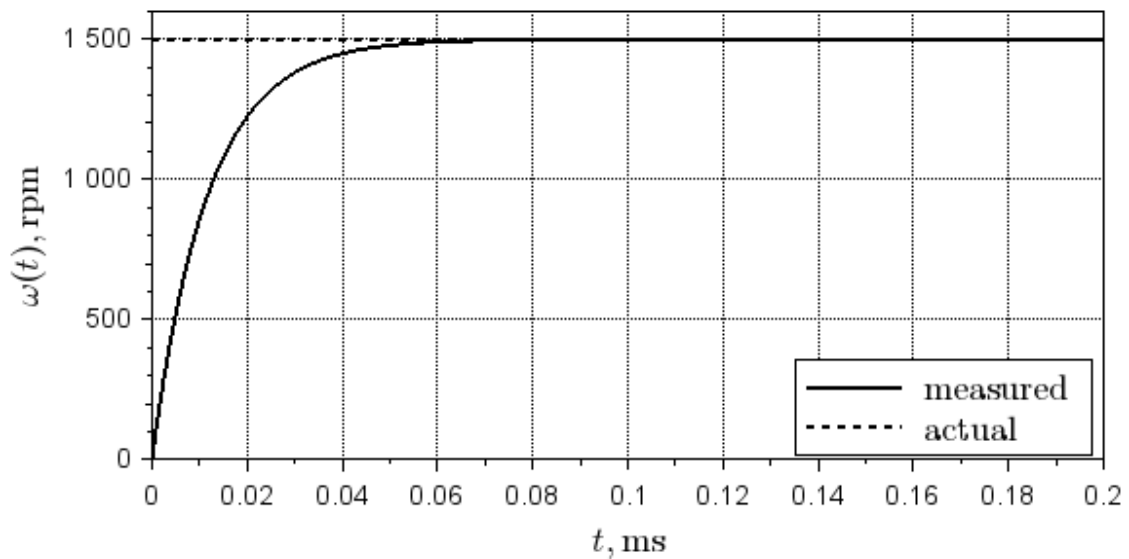


Рисунок 3.5 – Результати моделювання процесу вимірювання кутової швидкості за вимірюваною напругою ЕТ для сталої кутової швидкості  $\omega = 1500$  rpm, яку миттєво отримав первинно нерухомий ротор тахометра

Закономірно, що нехтування перехідними процесами під час оцінювання кутової швидкості за вимірюваною напругою, котра формується ЕТ, призводить до певної похибки результату вимірювання кутової швидкості. Результати

оцінки такої похибки продемонстровано на рисунку 3.6. Безперечно, отримані результати певним чином відображають специфічні умови проведених досліджень, в яких передбачено, що первинно нерухомий ротор ЕТ отримає сталу кутову швидкість миттєво. За цих обставин зрозуміло, що абсолютна похибка у початковий момент часу дорівнює вимірюванню кутової швидкості, протеспостерігаємо, що протягом часу ця похибка зменшується, а значення абсолютної похибки становиться досить малимвже через досить незначний час (рисунок 3.6).

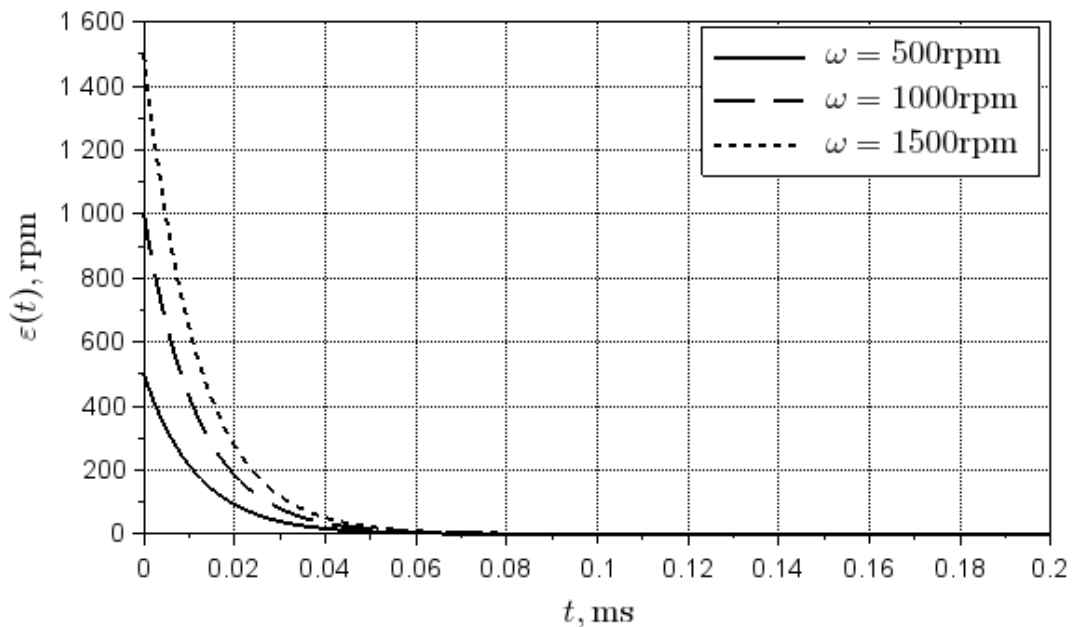


Рисунок 3.6 – Результати оцінки абсолютної похибки вимірювання ЕТ сталої кутової швидкості, котру миттєво отримав первинно нерухомий ротор тахометра

Зауважимо, що час, протягом якого початкова похибка зменшується майже до нуля, є досить малим і становить значення  $t \approx 0,1$  мс. Отже, таке значення є досить малим у порівнянні із характерним часом процесів, які реалізуються в механічних частинах об'єктів автоматизації. Втім отримані результати (рисунок 3.6) підкреслюють, що ЕТ для більшості режимів його експлуатації може сприйматися як безінерційний елемент.

### 3.2 Статична ідентифікація ЕТ

Зважаючи на те (рисунок 3.5), що ЕТ для більшості режимів його експлуатації може сприйматися як безінерційний елемент, то під час математичного моделювання процесів в ЕТ можемо нехтувати перехідними процесами. Це дозволить значно спростити ММ тахометра. Таким чином, замість диференціального рівняння (2.27) матимемо таке співвідношення:

$$U_m(t) = a_T \omega(t), \quad (3.1)$$

де  $a_T$  – параметр, який характеризує ЕТ.

Параметр  $a_T$  ЕТ визначити можна суто теоретично. Справді, завдяки співвідношенню (2.33) матимемо наступний результат:

$$a_T = B_e \frac{R_m}{R_T + R_m}. \quad (3.2)$$

Підкреслимо, що співвідношення (3.2) відповідає спрощеній моделі ЕТ, в якій функціонують лише основні процеси, котрі реалізуються під час вимірювання кутової швидкості, водночас не враховано багато тонкощів. Зважаючи на це більш коректною стає оцінка параметра  $a_T$  шляхом статичної ідентифікації ЕТ за даними, котрі сформувалися під час його випробування. Так, випробування, що необхідні для статичної ідентифікації ЕТ, повинні сприяти вимірюванню напруги, що формуються тахометром для різних значень сталої кутової швидкості:

$$\omega(t) = \omega_{(k)}, \quad U_m(t) = U_{m(k)}, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (3.3)$$

де  $\omega_{(k)}$  та  $U_{m(k)}$  – кутова швидкість, яка забезпечується під час проведення випробування з номером  $k$ , та відповідне їй значення вимірюваної напруги, що формується ЕТ;

$N$  – кількість випробувань.

Фактично, визначити один параметр  $a_T$  можна за одне випробування, тобто  $N=1$ , утім для уникнення похибок, які притаманні вимірюванням, бажано виконати декілька випробувань, тобто  $N > 1$ . Крім того, для визначення значення параметра  $a_T$  доцільно послуговуватись методом найменших квадратів. Згідно з методом найменших квадратів визначимо похибку виконання співвідношення (3.1) для результатів вимірювань (3.3) у такому вигляді:

$$S = \sum_{k=1}^N \left( a_T \omega_{(k)} - U_{m(k)} \right)^2. \quad (3.4)$$

Зрозуміло, що похибка (3.4) – це функція шуканого параметра  $a_T$ :

$$S = S(a_T). \quad (3.5)$$

Згідно з методом найменших квадратів параметр  $a_T$  визначимо таким чином, щоб похибка (3.4) стала мінімальною. Отже, функція (3.5) повинна досягти мінімуму. Як відомо, умова мінімуму функції (3.5) має вигляд:

$$\frac{dS}{da_T} = 0. \quad (3.6)$$

Умова (3.6) міститиме рівняння для визначення шуканого параметра  $a_T$ , котрий буде характеризувати досліджуваний ЕТ. Для одержання такого рівняння обчислимо відповідну похідну похибки вигляду (3.4):

$$\frac{dS}{da_T} = \sum_{k=1}^N 2(a_T \omega_{(k)} - U_{m(k)}) \omega_{(k)}. \quad (3.7)$$

З урахуванням одержаного виразу (3.7), рівняння (3.6) матиме такий вигляд:

$$\sum_{k=1}^N (a_T \omega_{(k)} - U_{m(k)}) \omega_{(k)} = 0. \quad (3.8)$$

Таким чином, за допомогою фіксації результатів випробувань (3.3) ЕТ, використовуючи формулу (3.8), можемо визначити параметр  $a_T$ , який характеризуватиме досліджуваний ЕТ. Зауважимо, що математична модель (3.1) ЕТ є значно простішою за модель вигляду (2.27), а похибка, котра додається через нехтування перехідними процесами, буде незначною у зв'язку із незначною тривалістю перехідних процесів у порівнянні із основними процесами, котрі реалізуються в механічних частинах об'єктів автоматизації про що свідчать результати, наведені на рисунках 3.3 – 3.6.

Для проведення ідентифікації ЕТ замість реалізації натурних експериментів можемо обмежитись обчислювальними експериментами, що засновані на комп'ютерному моделюванні, котре виконаємо на базі моделі (2.27), а похибки вимірювань змоделюємо шляхом додавання випадкової складової до вимірюваного сигналу, як це продемонстровано на рисунку 3.7. З урахуванням запропонованої комп'ютерної моделі (рисунок 3.7) одержані результати щодо вимірюваної напруги продемонстровано на рисунку 3.8. Наочно на рисунку 3.8 зафіксовано, що наявність похибок вимірювань спричиняю появу певних відхилень вимірюваної напруги від усталеного значення, що має відповідати сталій кутовій швидкості.

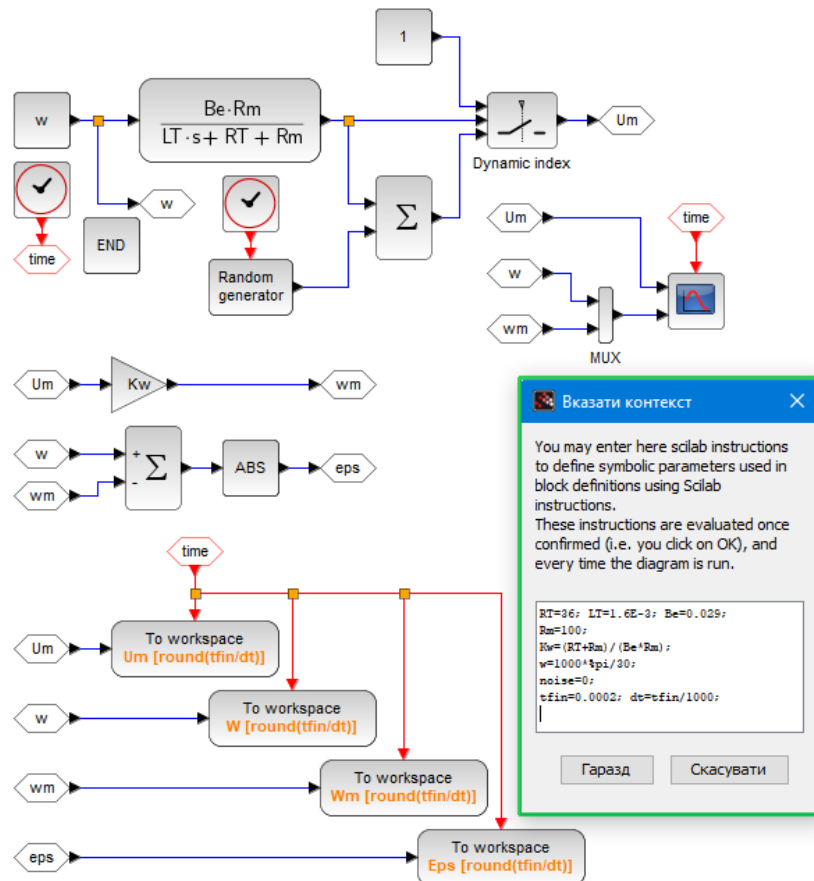


Рисунок 3.7 – ММ КМ випробувань ЕТ щодо його статичної ідентифікації

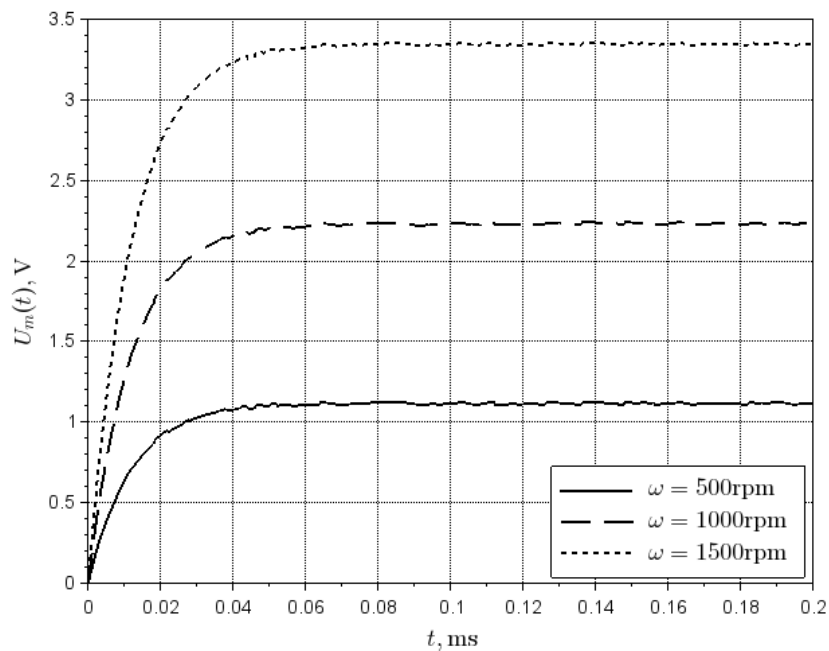


Рисунок 3.8 – Результати комп'ютерного моделювання випробувань ЕТ щодо його ідентифікації

Текст програми-сценарію статичної ідентифікації ЕТ разом із запропонованою КМ (рисунок 3.7) наведено в додатку Б (рисунок Б.1). За підсумками виконання шляхом статичної ідентифікації (рисунок 3.7 та рисунок Б.1) було отримано такий результат:

$$a_T \cong 0,0213138. \quad (3.9)$$

Результат (3.12) можна порівняти із відповідним, який було отримано за допомогою формули (3.1), теоретичним значенням

$$a_T \cong 0,0213235. \quad (3.10)$$

Зрозуміло, що значення (3.9) та (3.10) є досить близькими, проте, навіть незначні похибки вимірювань (рисунок 3.8) все ж таки призвели до певних відмінностей. Отже, статична ідентифікація, що відповідає результату (3.9), буде призводити до трохи менших значень вимірюваної напруги (3.1).

За допомогою уточненої ММ (2.27) реалізуємо КМ процесів, які відбуваються в електромагнітному тахометрі під час вимірювання кутової швидкості, а також порівняємо одержані таким чином результати із відповідними їм результатами, котрі отримані шляхом залучення максимально спрощеної ММ (3.1). Таке порівняння дасть можливість оцінити похибки, що породжується застосуванням спрощеної моделі (3.1) ЕТ. Для цього будемо послуговуватися КМ, що продемонстрована на рисунку 3.9, в якій одночасно подано уточнену модель (2.27) та спрощену модель (3.1), (3.10) процесів в ЕТ.

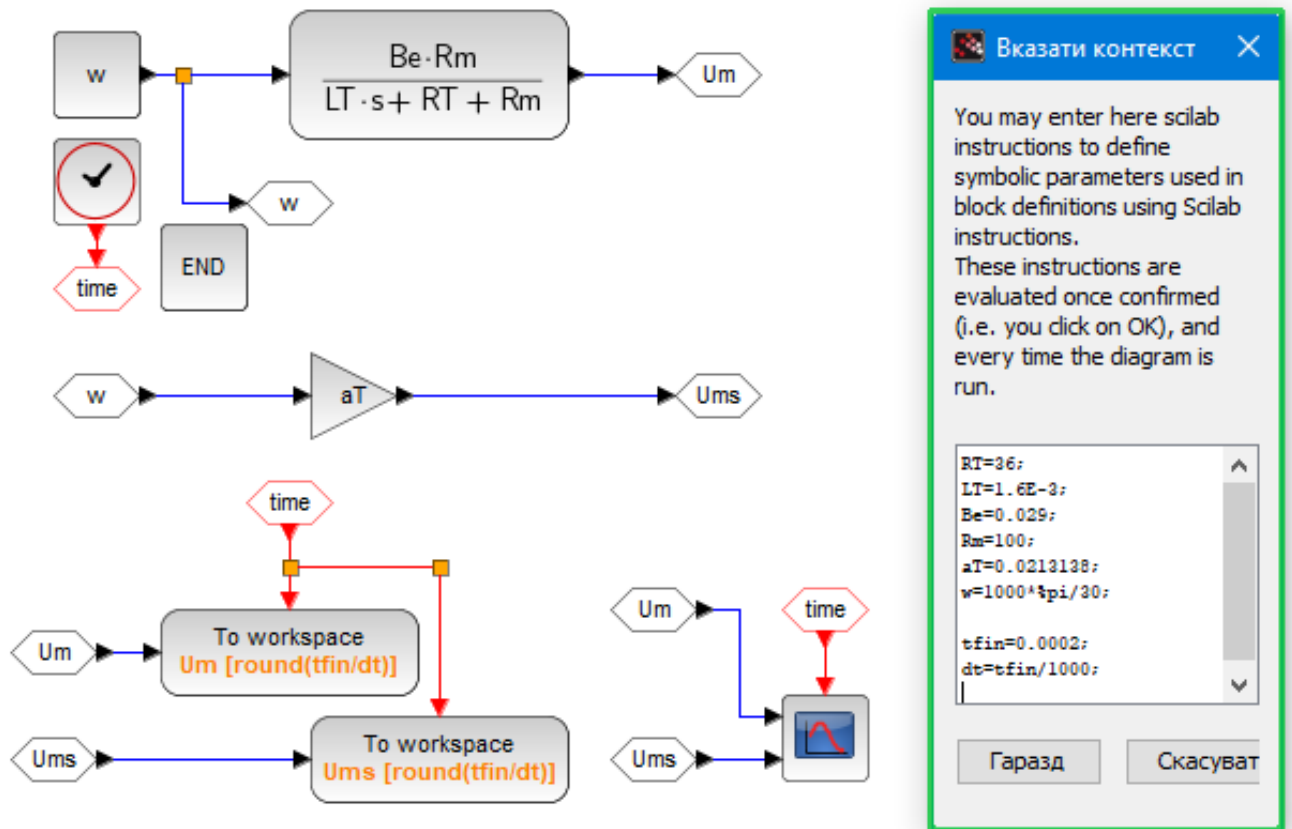


Рисунок 3.9 – КМ для порівняння результатів, отриманих за допомогою уточненої та спрощених ММ процесів в ЕТ

У додатку Б на рисунку Б.2. подано текст програми-сценарію, в якому за допомогою розробленої КМ (рисунок 3.9) реалізується порівняння результатів щодо вимірюваної напруги ЕТ, котрі отримані за допомогою як уточненої моделі (2.27), так і спрощеної (3.1). (3.10) на базі статичної ідентифікації. Отримані результати (рисунок 3.10) підкреслюють, що похибки моделювання процесів вимірювання кутової швидкості в ЕТ під час використання спрощеної моделі (3.1). (3.10), очікувано, зводяться лише до нехтування перехідними процесами, водночас усталені процеси визначаються доволі точно.

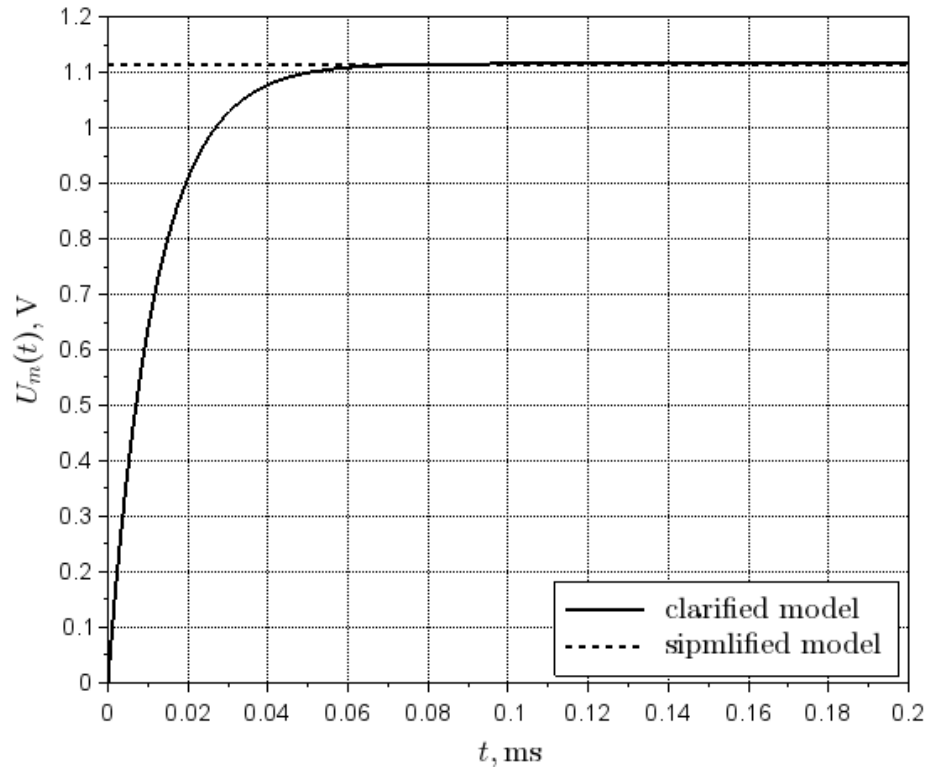


Рисунок 3.10 – Результати моделювання вимірюваної напруги з використанням уточненої моделі та спрощеної моделі на основі статичної ідентифікації

### 3.3 Вплив високочастотних складових на вимірювання

За попередньо отриманими результатами можна зауважити, що ЕТ в цілому, та його окремий випадок, який характеризується параметрами (таблиця 3.1), – це досить досконалий вимірювальний прилад, який під час вимірювання сталої кутової швидкості забезпечує досить малий час перехідних процесів, отже, може бути представленим за допомогою спрощеної моделі (3.1), (3.10), яка надає результат статичної ідентифікації. Водночас слід пам'ятати, що результати та висновки щодо властивостей ЕТ, одержані раніше, є чинними тільки у разі вимірювання сталої кутової швидкості. Таким чином, питання щодо характеристик ЕТ під час вимірювання кутової швидкості, котра залежить від часу, є досить важливим. Зауважимо, що найбільш небезпечним з точки зору виникнення перехідних процесів під час вимірювання кутової швидкості є

випадки, у разі яких кутова швидкість містить гармонійні високочастотні складові:

$$\omega(t) = \omega_m + \omega_a \sin(\Omega t + \varphi), \quad (3.11)$$

де  $\omega_m$  – середнє значення кутової швидкості;

$\omega_a$  – амплітудне значення кутової швидкості;

$\Omega$  та  $\varphi$  – частота та фаза гармонійної складової кутової швидкості.

Звертаємо увагу, що випадок вимірювання сталої кутової швидкості, для якого власне раніше були одержані результати щодо властивостей ЕТ, відповідають окремому випадку кутової швидкості загального вигляду (3.11), де значення  $\omega_a = 0$ . Із співвідношення (3.11) спостерігаємо, що у випадку кутової швидкості зі значенням  $\omega_a \neq 0$  на результат вимірювання разом із власним значенням  $\omega_a$  можуть впливати також і значення  $\Omega$  та  $\varphi$  – частота та фаза гармонійної складової кутової швидкості. Таким чином, у випадку  $\omega_a \neq 0$  спостерігаємо досить складний вплив на результати досліджень декількох параметрів, які окреслюють закон зміни у часі кутової швидкості (3.11). Щоб розглянути вплив зазначених параметрів на процеси в ЕТ під час вимірювання кутової швидкості, доцільно застосувати амплітудно-частотні характеристики ЕТ. Так, у передатній функції (2.29) ЕТ приймемо  $s = i\Omega$ , де в результаті отримаємо:

$$W_T(i\Omega) = \frac{B_e R_m}{R_T + R_m + iL_T \Omega}. \quad (3.12)$$

Перетворимо співвідношення (3.17) так:

$$W_T(i\Omega) = \frac{B_e R_m}{(R_T + R_m)^2 + L_T^2 \Omega^2} (R_T + R_m - iL_T \Omega). \quad (3.13)$$

Завдяки співвідношенню (3.13) застосуємо такі результати для амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристики ЕТ:

$$A(\Omega) = \frac{B_e R_m}{\sqrt{(R_T + R_m)^2 + L_T^2 \Omega^2}}, \quad \varphi(\Omega) = -\operatorname{arctg} \frac{L_T \Omega}{R_T + R_m}. \quad (3.14)$$

З урахуванням отриманих співвідношень (3.14) додатково введемо таку величину:

$$K(\Omega) = \frac{L_T \Omega}{R_T + R_m}. \quad (3.15)$$

Зважаючи на співвідношення (3.15) та раніше отриманий результат (3.2), частотні характеристики (3.14) набудуть такого вигляду:

$$A(\Omega) = \frac{a_T}{\sqrt{1 + K^2(\Omega)}}, \quad \varphi(\Omega) = -\operatorname{arctg}(K(\Omega)). \quad (3.16)$$

Таким чином, співвідношення (3.16) свідчать, що параметр (3.15) реально визначає вплив гармонійної складової кутової швидкості (3.11) на процеси в електромагнітному тахометрі під час вимірювання кутової швидкості, де у разі  $K(\Omega) = 0$  гармонійна складова кутової швидкості не впливає на процеси в тахометрі. Функцію (3.15), котра побудована для ЕТ із параметрами (таблиця 3.1), наведено на рисунку 3.11. Отже, на рисунку 3.11 ми бачимо, що для досліджуваного ЕТ з параметрами (3.1) значення параметра (3.15) буде досить великим для частот  $\Omega > 4\text{кГц}$ .

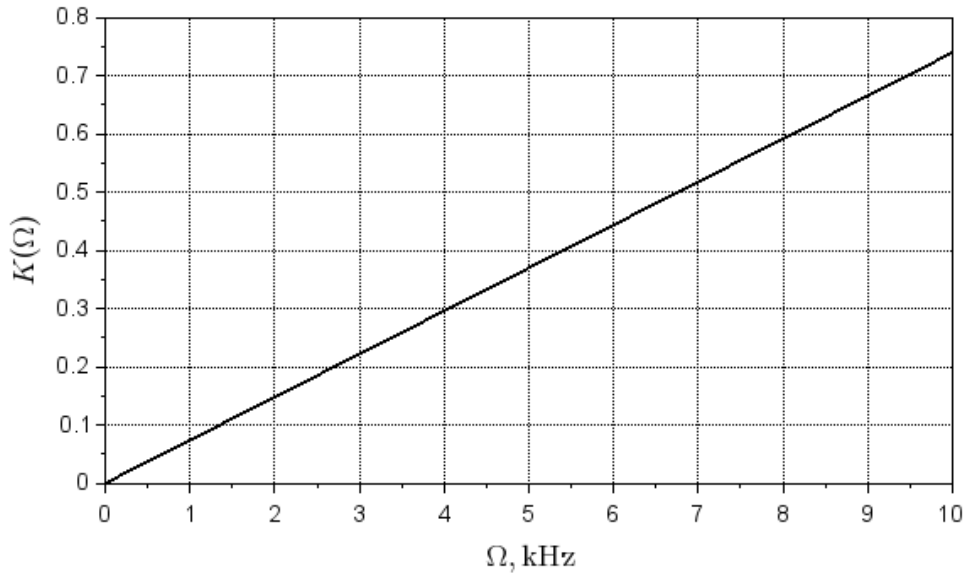


Рисунок 3.11 – Вплив частоти вимірюваної кутової швидкості на процеси в ЕТ

Частотні характеристики (3.16) ЕТ з параметрами (3.1) продемонстровані на рисунку 3.12 – 3.13.

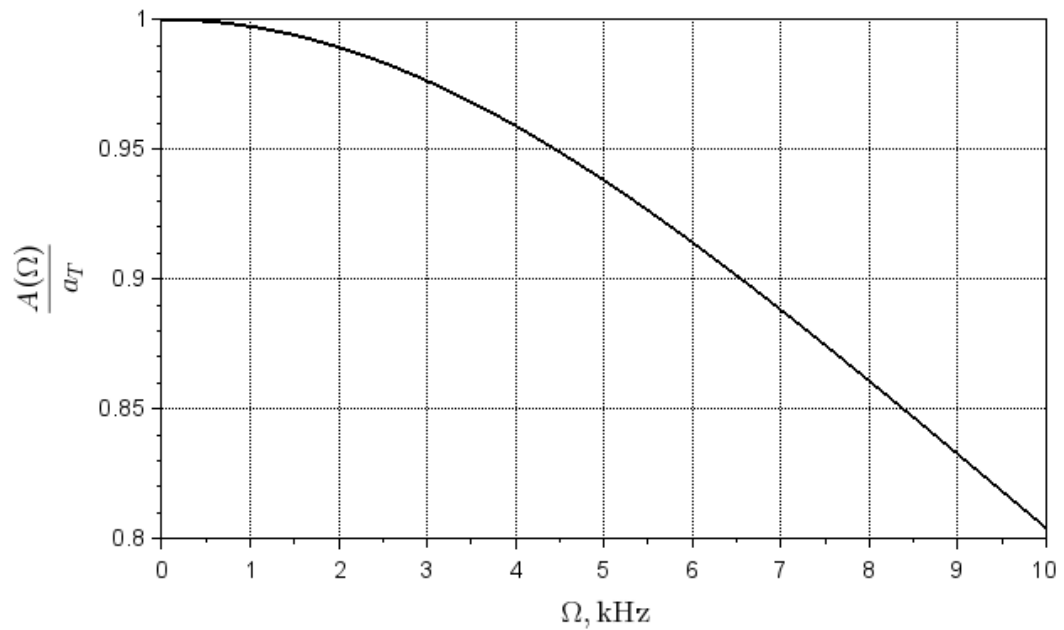


Рисунок 3.12 – Амплітудно-частотна характеристика ЕТ

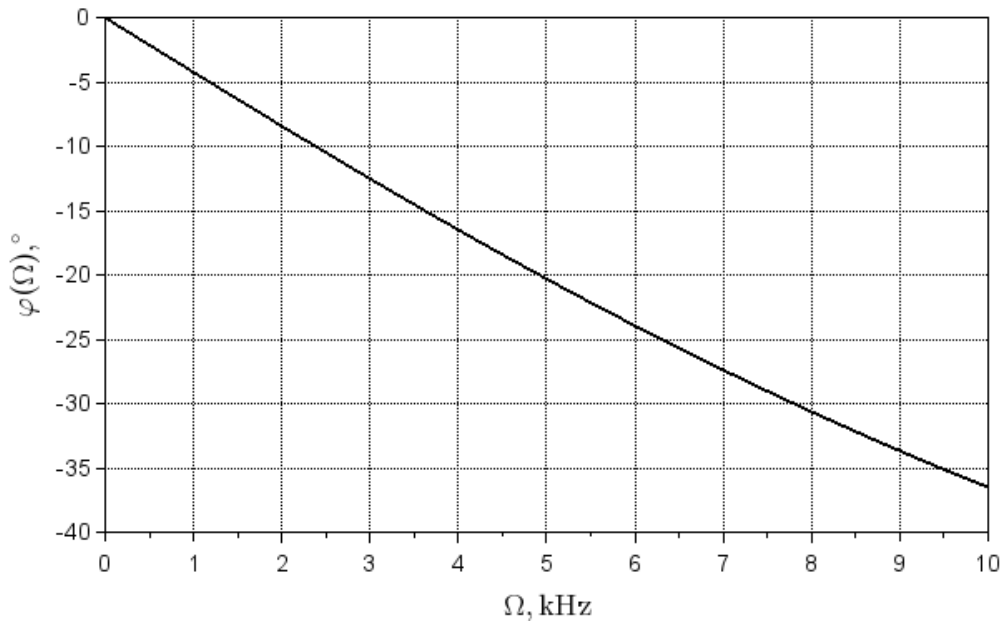


Рисунок 3.13 – Фазо-частотна характеристика ЕТ

Із наочної інформації бачимо, що амплітудно-частотна характеристика (рисунок 3.12) ЕТ для частот  $\Omega < 5\text{кГц}$  змінюється досить мало, тобто за таких частот будемо спостерігати відносно невеликі помилки у визначенні величини вимірювальної напруги ЕТ з використанням спрощеної моделі (3.1), (3.13). Водночас для частот  $\Omega < 5\text{кГц}$  маємо помітні зсуви фаз (рисунок 3.9), які призводитимуть до відповідних помилок під час використання спрощеної моделі (3.1), (3.9).

Щоб продемонструвати вплив високочастотної складової кутової швидкості (3.11), активізуємо моделювання процесів в ЕТ із параметрами (таблиця 3.1) для таких даних щодо вимірюваної кутової швидкості:

$$\omega_m = 500\text{rpm}, \quad \omega_m = 25\text{rpm}, \quad \varphi = 0. \quad (3.17)$$

Для моделювання процесів в ЕТі із параметрами (таблиця 3.1) під час вимірювання змінної у часі кутової швидкості вигляду (3.11), (3.17) послуговуватимемось спеціально розробленою КМ, котру наведено на рисунку

3.14. У даній моделі, на відміну від моделі (рисунок 3.1), передбачено обчислення кутової швидкості (3.11), (3.17).

Результати комп'ютерного моделювання вимірюваної напруги, котра формується ЕТ під час вимірювання кутової швидкості із гармонійною складовою (3.15), продемонстровано на рисунку 3.15. Наочно показано, що на рисунку 3.15 частота коливань вимірюваної кутової швидкості дуже помітно впливає на вимірювану напругу, котра формується ЕТ під час вимірювання. До того ж частота коливань вимірюваної кутової швидкості майже не впливає на максимальне та мінімальне значення вимірюваної напруги. Отже, це повністю узгоджується із дослідженою раніше амплітудно-частотною характеристикою (рисунок 3.12). Підсумуємо, що ЕТ зможе забезпечувати досить точні оцінки величини під час вимірювання кутової швидкості, котра містить гармонійні складові із високими частотами.

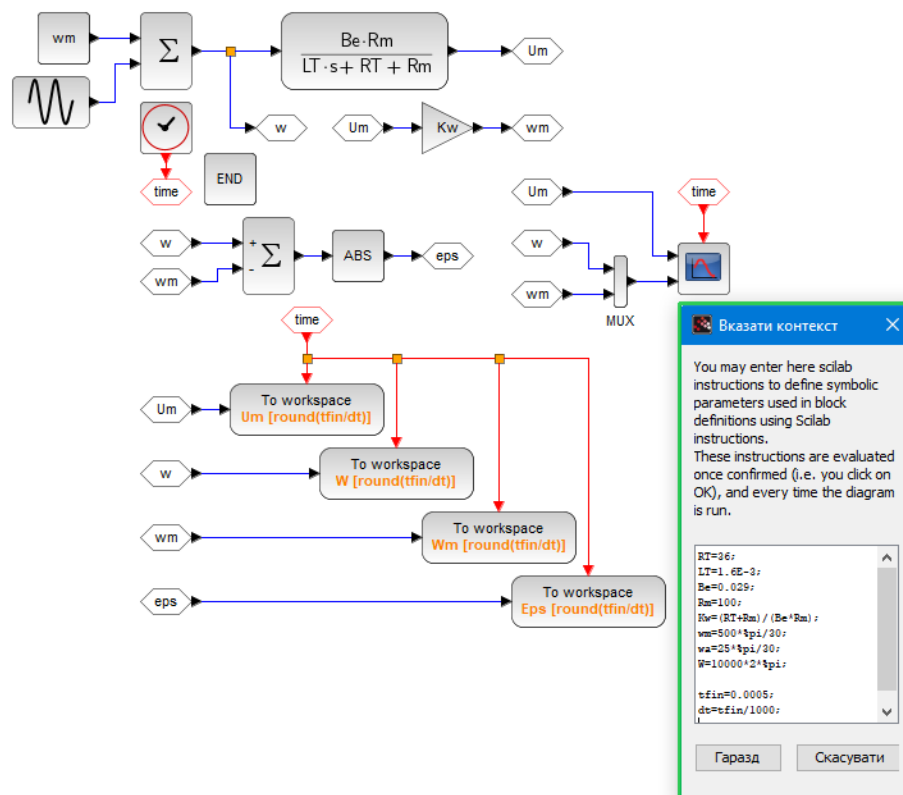


Рисунок 3.14 – КМ процесів в ЕТ під час вимірювання залежної від часу кутової швидкості, котра містить гармонійний додток

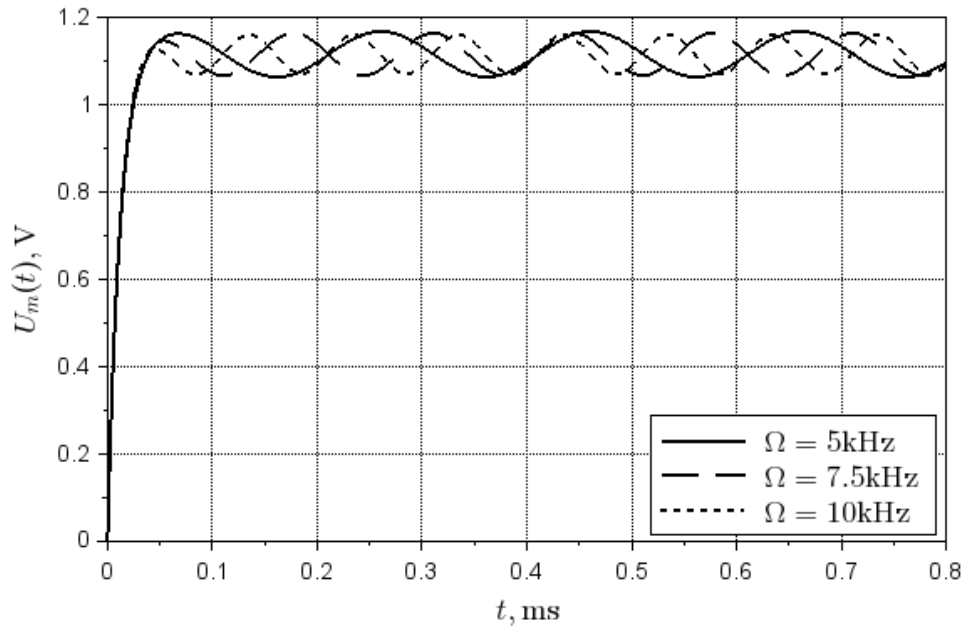


Рисунок 3.15 – Результати моделювання вимірюваної напруги ЕТ для різної частоти гармонійної складової кутової швидкості, котрі миттєво отримав первинно нерухомий ротор тахометра

Результати комп'ютерного моделювання процесу вимірювання ЕТ кутової швидкості із гармонійною високочастотною складовою із відносно невеликою частотою  $\Omega = 5$  кГц подано на рисунку 3.16. З рисунка 3.16 бачимо, що вимірювані результати кутової швидкості досить близькі до її фактичного значення після завершення перехідного процесу. У разі збільшення частоти гармонійної високочастотної складової вимірюваної кутової швидкості різниця між фактичним значенням та оцінкою кутової швидкості ЕТ збільшиться, про що свідчать данні, продемонстровані на рисунках 3.17 – 3.18. Причина збільшення такої різниці полягає у збільшенні зсуву фаз сигналів, які притаманні фазо-частотній характеристиці ЕТ (рисунок 3.13).

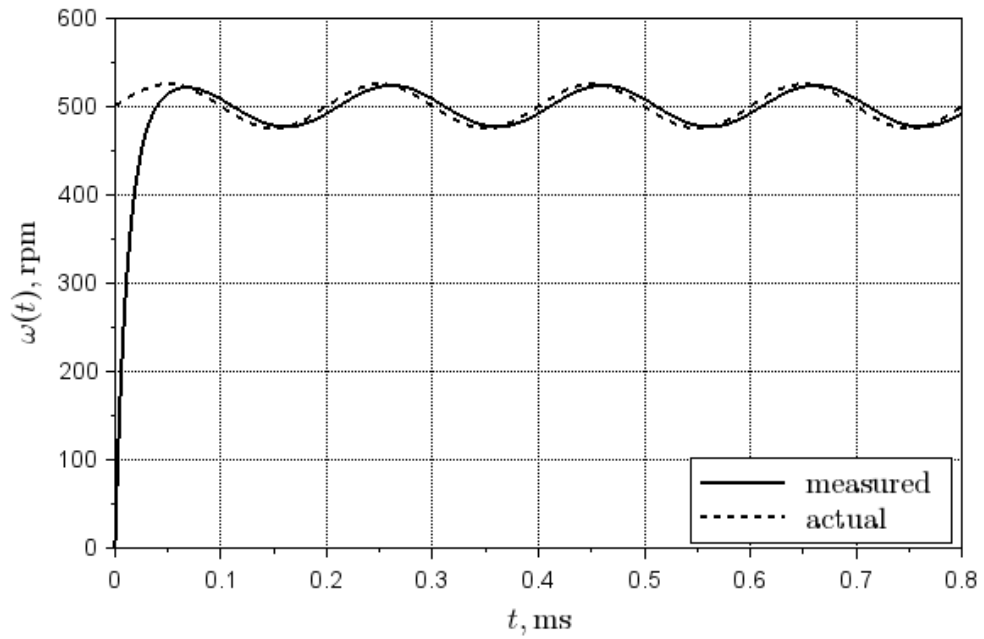


Рисунок 3.16 – Результати моделювання процесу вимірювання кутової швидкості за вимірюваною напругою ЕТ для кутової швидкості із гармонійною складовою частоти  $\Omega = 5$  кГц

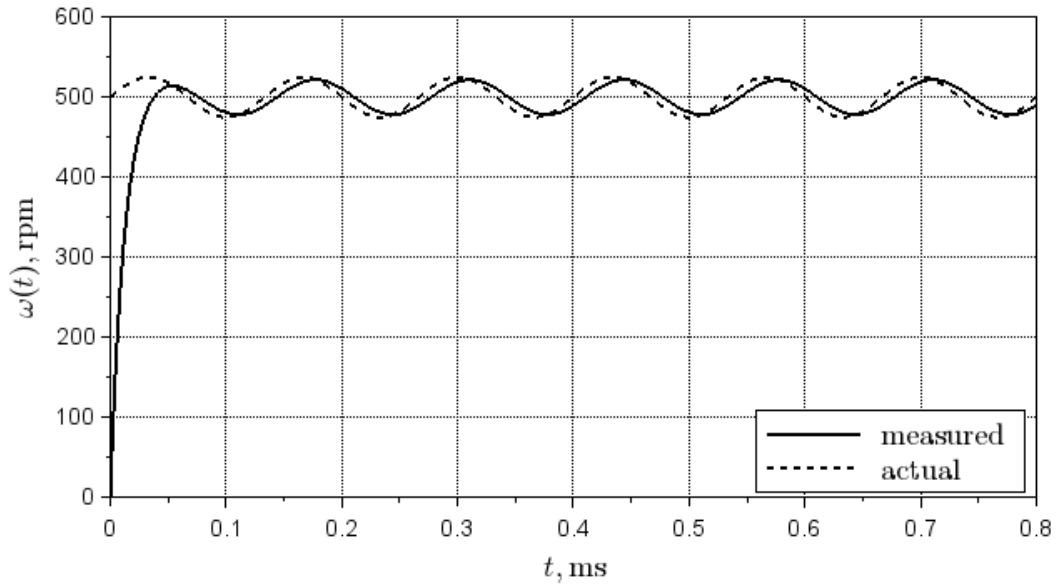


Рисунок 3.17 – Результати моделювання процесу вимірювання кутової швидкості за вимірюваною напругою ЕТ для кутової швидкості із гармонійною складовою частоти  $\Omega = 7,5$  кГц

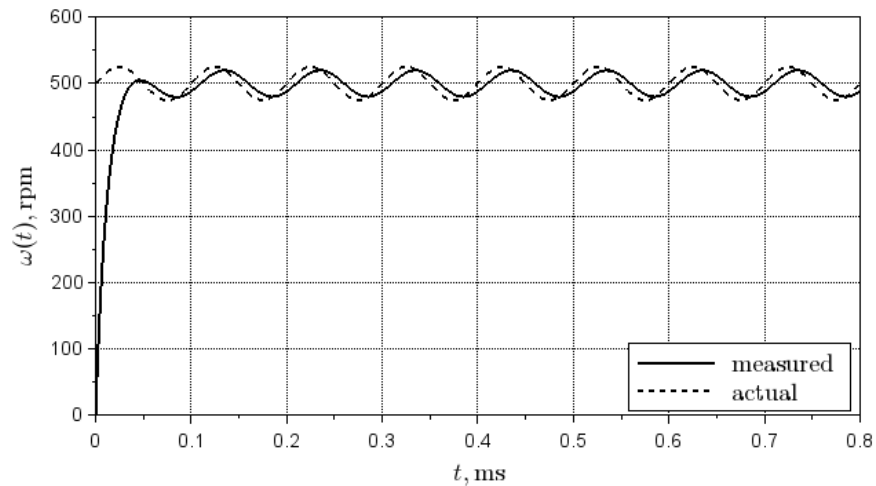


Рисунок 3.18 – Результати моделювання процесу вимірювання кутової швидкості за вимірюваною напругою ЕТ для кутової швидкості із гармонійною складовою частоти  $\Omega = 10$  кГц

На відміну від випадку вимірювання сталої кутової швидкості, що було розглянуто вище (рисунок 3.6), наявність у вимірюваній кутовій швидкості гармонійного доданку спричиняє появу похибки вимірювання миттєвого значення кутової швидкості, як це наведено на рисунку 3.19.

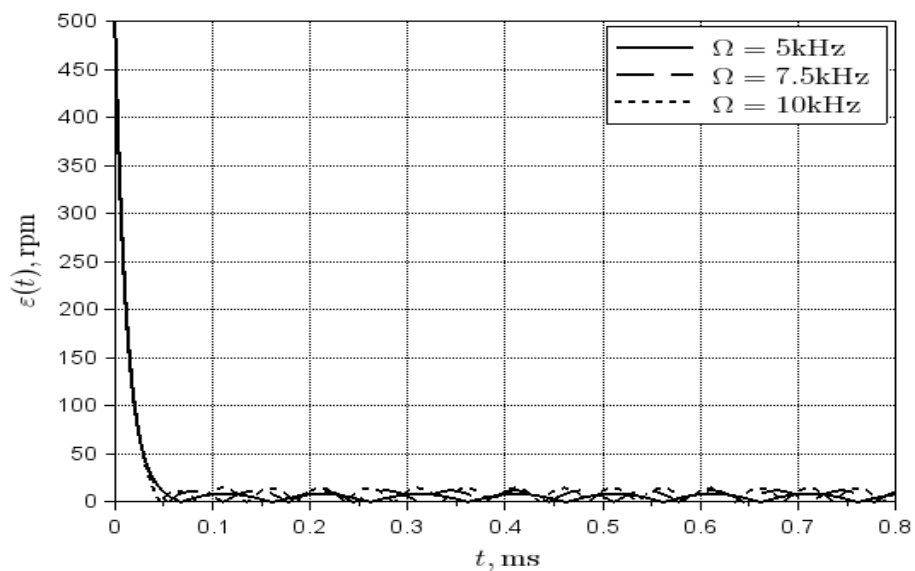


Рисунок 3.19 – Результати оцінки абсолютної похибки вимірювання ЕТ нестационарної кутової швидкості, котру миттєво отримав первинно нерухомий ротор тахометру

Така похибка вважається досить значною, якщо розглядати власне миттєве значення кутової швидкості, втім оціночне значення кутової швидкості є досить точним, про що свідчать результати на рисунку 3.16 – 3.18. Таким чином, похибка визначення ЕТ миттєвого значення кутової швидкості з гармонійною складовою обумовлена виключно зсувом фаз сигналів згідно з фазо-частотною характеристикою (рисунок 3.13) ЕТ.

### 3.4 Висновки до розділу

Виконане комп'ютерне моделювання процесів в ЕТ показало досить малий час перехідних процесів при вимірюванні кутової швидкості.

Також показано, що при вимірюванні кутової швидкості із високочастотною гармонійною складовою ЕТ не забезпечує належну точність визначення миттєвого значення кутової швидкості через зсув фаз сигналів, але така похибка є незначною через малий проміжок часу відповідний зсуву фаз при високочастотних процесах.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Аналіз умов праці на робочому місці програміста

На робочому місці програміста згідно виникають небезпечні та шкідливі фактори: підвищений рівень шуму, несприятливі мікрокліматичні умови, недостатній рівень освітленості, шкідливі речовини, підвищений рівень електромагнітних випромінювань радіочастот, висока напруга електричної мережі, статична електрика та інші. Робота з ПК супроводжується також підвищеним ступенем напруженості трудового процесу. При систематичному впливі виробничих факторів, які не відповідають нормативним показникам, зростає рівень професійно зумовленої захворюваності працюючих та можуть виникнути професійні захворювання органів зору, руху, нервової системи. Таким чином, вивчення умов праці на робочому місці програміста є необхідною умовою запобігання негативних наслідків впливу небезпечних та шкідливих факторів.

Організація робочого місця. Приміщення, в якому знаходиться робоче місце програміста, загальною площею 48 м<sup>2</sup>, і висотою стелі 3,5 м. У приміщенні знаходиться 6 робочих місць з ПК. Кожне робоче місце обладнане робочим столом, стільцем та ПК, що складається з монітора, системного блоку, клавіатури та миші.

### 4.2 Промислова безпека на робочому місці програміста

Живлення ПК здійснюється від трифазної чотирих електричної мережі змінного струму з глухо-заземленою нейтраллю і напругою 220 В, частотою 50 Гц. Згідно НПАОП 40.1-1.21-98 приміщення можна віднести до категорії без

підвищеної небезпеки, так як в приміщенні відсутні чинники, які викликають підвищену або особливу небезпеку.

Для створення безпечних умов праці необхідно провести ряд організаційних і технічних заходів. Згідно НПАОП 40.1-1.32-01 для запобігання ураження людини електричним струмом в приміщенні застосовується система занулення.

#### 4.3 Виробнича санітарія у приміщенні де працює програміст

Робота оператора ПК за енерговитратами відноситься до категорії легких робіт. В таблиці 4.1 наведені оптимальні параметри мікроклімату в приміщеннях, де виконуються роботи операторського типу [13].

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату для приміщень з ПК

Період року	Параметр мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	22 – 24 °С; 40 – 60 %; до 0,1 м/с
Теплий	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	23 – 25 °С; 40 – 60 %; 0,1 – 0,2 м/с

Виміряні за допомогою приладів температура та вологість у лабораторії відповідають вказаним у таблиці для теплого періоду року. Слід зазначити, що для нормалізації параметрів мікроклімату слід використовувати у приміщеннях кондиціонування повітря, або забезпечити подачу свіжого повітря системами вентиляції.

Лабораторія, де виконується розробка конструкції модуля, має наступні характеристики:

- площа приміщення  $48 \text{ м}^2$  ( $8 \text{ м} \times 6 \text{ м}$ );
- висота  $3,5 \text{ м}$ ;
- кількість робочих місць – 6 шт.;
- обладнання – стіл з ПК і периферією – 6 шт.

Приміщення, відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99, має забезпечувати  $6 \text{ м}^2$  площі та  $20 \text{ м}^3$  обсягу на одне окреме робоче місце з ПК [13]. Площа приміщення  $48 \text{ м}^2$  та об'єм  $168 \text{ м}^3$ , на кожне робоче місце приходиться  $8 \text{ м}^2$  площі і об'єм  $28 \text{ м}^3$ , тобто вимога виконана.

Приміщення з ПК повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче  $1,5 \%$ .

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності, викладеної в [13].

Розрахункова формула методу:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (4.1)$$

де  $W$  – питома потужність,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$S$  – площа приміщення,  $\text{м}^2$ ;

$W_{\Sigma}$  – загальна потужність освітлювальної установки  $\text{Вт}$ , яка розраховується за формулою:

$$W_{\Sigma} = W_{ce} \cdot n_{ce}, \quad (4.2)$$

де  $W_{ce}$  – потужність одного світильника, Вт;

$n_{ce}$  – кількість світильників в приміщенні.

$$W_{\Sigma} = 100 \cdot 4 = 400 \text{ Вт}, \quad (4.3)$$

$$W = \frac{400}{48} = 8,33 \text{ Вт/м}^2. \quad (4.4)$$

Питомої потужності 8,33 Вт/м<sup>2</sup> по таблиці Б.3 із [19] відповідає освітленість в 250 лк при мінімальній допустимій освітленості 300 лк.

Отже, для створення сприятливих зорових умов в лабораторії необхідно збільшити кількість світильників або замінити лампи в світильниках на більш потужні.

#### 4.4 Пожежна безпека виробничого приміщення

Пожежна безпека – стан об'єкта, при якому виключається можливість пожежі, а у випадку його виникнення запобігає вплив на людей небезпечних факторів пожежі й забезпечується захист матеріальних цінностей.

Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі й системою пожежного захисту. У всіх службових приміщеннях обов'язково повинен бути «План евакуації людей при пожежі», що регламентує дії персоналу у випадку виникнення вогнища загоряння, що й указує місця розташування пожежної техніки.

Горючими компонентами у виробничому приміщенні є: перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів і ін.

Протипожежний захист – це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, на запобігання пожежі, обмеження його поширення, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі.

Джерелами запалювання у виробничому приміщенні можуть бути електронні схеми від ПК, прилади, застосовувані для технічного обслуговування, пристрою електроживлення, кондиціонування повітря, де в результаті різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри й дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів.

У сучасних ПК дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості друг від друга розташовуються сполучні проведення, кабелі. При протіканні по них електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливо оплавлення ізоляції. Для відводу надлишкової теплоти від ПК служать системи вентиляції й кондиціонування повітря. При постійній дії ці системи являють собою додаткову пожежну небезпеку.

Енергопостачання виробничого приміщення здійснюється за допомогою трансформаторної станції та за допомогою двигун-генераторних агрегатів. На трансформаторних підстанціях особливу небезпеку представляють трансформатори які мають масляне охолодження. У зв'язку із цим перевагу слід віддавати сухим трансформаторам.

## ВИСНОВКИ

Під час виконання досліджень були одержані результати, що дозволяють зробити такі висновки щодо використання тахометрів як вимірювальних приладів в автоматизованих системах.

Запропонована математична модель ЕТ у вигляді диференціального рівняння першого порядку відносно електричної напруги, що формується тахометром під час вимірювань кутової швидкості довільного вигляду, котра дозволяє виконувати дослідження характеристик ЕТ як складових складних автоматизованих систем. Зазначена модель дозволяє досліджувати процеси під час вимірювання кутової швидкості з урахуванням перехідних процесів, які відбуваються.

Дослідження процесів вимірювання сталої кутової швидкості, котрі миттєво отримує початково нерухомий ротор тахометра, підтвердило, що час перехідних процесів в ЕТ є досить малим та значно меншим за характерний час процесів, які реалізуються в механічних частинах об'єктів автоматизації. Зважаючи на це ЕТ стає досить досконалим вимірювальним приладом. Крім того, його можна рекомендувати для застосування в системах автоматизації різного призначення для вимірювання миттєвої кутової швидкості.

Незначний характерний час перехідних процесів під час вимірювань кутової швидкості в ЕТ дозволяє використовувати для їхнього моделювання спрощену ММ, яка ґрунтується на статичній ідентифікації. Так, для статичної ідентифікації ЕТ рекомендується застосовувати метод найменших квадратів, який, як було продемонстровано результатами комп'ютерного моделювання, дозволяє визначити параметр ЕТ із досить високою точністю навіть у разі наявності помітних похибок вимірювань під час проведення натурних випробувань.

Наявність гармонійних складових у вимірюванні кутової швидкості спричиняє появу похибок у вимірюваннях кутової швидкості ЕТ. Водночас похибка оцінки величини кутової швидкості є незначною для досить широкого інтервалу частоти гармонійних складових у вимірюваній кутовій швидкості, що узгоджується із амплітудно-частотною характеристикою ЕТ. Наявність доволі високої похибки оцінки миттєвого значення кутової швидкості під час вимірювання кутової швидкості із гармонійними складовими досить високої частоти, що притаманна ЕТ, обумовлена значним зсувом фаз відповідних сигналів згідно з фазо-частотною характеристикою ЕТ.

Під час виконання розділу «Охорона праці» були визначені небезпечні та шкідливі виробничі чинники. Зважаючи на це були розроблені заходи і технічні засоби щодо забезпечення безпеки праці персоналу. Дотримання цих заходів дасть змогу максимально знизити ймовірність отримання травм під час роботи, а також поліпшити умови роботи персоналу лабораторії, де проводилась робота над дослідженнями.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В.В.Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2023. – 49 с.

2. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація «Звіти у сфері науки і техніки». Структура та правила оформлювання. / В. Земцева; Ю. Поліщук, канд. фіз.-мат. наук; Р. Санченко, канд. техн. наук; Л. Шрамко; А. Ямчук (науковий керівник) ДП «УкрНДНЦ» від 22 червня 2015р. № 61 з 2017-07-01.

3. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. No 143. – Режим доступу: [https://nure.ua/wpcontent/uploads/Main\\_Docs\\_NURE/143-vid-06.05.2021-provvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi-universitetu.pdf](https://nure.ua/wpcontent/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-provvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi-universitetu.pdf)

4. Аллахверанов Р.Ю., Фролов А.В., Санєєв Д.В., Трифонов О.М. Моделювання електромагнітних тахометрів для визначення похибок вимірювання кутової швидкості // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука", № 8, 2024. с. 69-76.

5. Sanieiev Denys, Allakhveranov Rauf. Study of information and parametric model of asynchronous motors // VI International scientific and practical conference “Perspectives of contemporary science: theory and practice” – SPC “Sci-conf.com.ua”, Lviv, Ukraine. 2024. pp. 123-125.

6. Sanieiev Denys, Allakhveranov Rauf. General information about the principles of tachometers // VII International scientific and practical conference “Perspectives of contemporary science: theory and practice” – SPC “Sci-conf.com.ua”, Lviv, Ukraine. 2024. pp. 166-174.

7. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.

8. A. H. Mohamed. “LQR and PID controllers” performance on a half car active suspension system / Mohamed A. H., Abidou D., Maged S. A. // International mobile, intelligent and ubiquitous, computing conference, IEEE. – 2021.– P. 48-53.

9. Zeghloul S. Advances in Service and Industrial Robotics / S. Zeghloul, M. A. Laribi, J. S. Sandoval Arevalo // Mechanisms and Machine Science Book Series; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. – 2020. – Vol. 84 – P. 134-146.

10. Tatiya Padang Tunggal, Lailicia Anggi Kirana, Afif Zuhri Arfianto, Elsayed T.Helmy, Farhad Waseel. The Design of Tachometer Contact and Non-Contact Using Microcontroller // Journal of Robotics and Control (JRC), Volume 1, №3 (2020) pp. 972 – 981.

11. L.V. Gopala Rao. Optimal response of half car vehicle model with sky-hook damper based on LQR control / Gopala Rao L.V., Narayanan S. // Int. J. Dynam. Control. – 2020. – Vol. 8 №2 – P. 488-496.

12. Banerjee S. Mathematical Modeling: Models, Analysis and Applications (2nd ed.) // Chapman and Hall/CRC, Taylor & Francis Group, 2021. – 120 p.

13. Sandip Banerjee, Boka Raton. Mathematical Modeling: Models, Analysis and Applications, 2nd Edition / FL: Chapman and Hall/CRC Press, Taylor & Francis Group, 2022. – 433 pp.

14. Кухарчук В.В. Основи метрології та електричних вимірювань: Підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.

15. Бабак В. П. Обробка сигналів: Підручник // В. П. Бабак, В. С. Хандецький, Е. Шрюфер. – К.: Либідь, 1999. – 392 с.
16. Zhiguo Zhao. Optimal control of mode transition for four-wheel-drive hybrid electric vehicle with dry dual-clutch transmission / Zhao Zhiguo, Lei Dan, Chen Jiayi, Li Hangyu // Mechanical Systems and Signal Processing – 2018. – Vol. 105 – P. 68-89.
17. Xiangyang Xu. Optimized control of engine start assisted by the disconnect clutch in a P2 hybrid automatic transmission / Xu Xiangyang, Liang Yinghua, Jordan Mick, Tenberge Peter, Dong Peng // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – Vol. 124 – P. 313-329,
18. Feng Wang. Torsional oscillation-considered mode transition coordinated control for a power-split PHEV based on action dependent heuristic dynamic programming / Wang Feng, Zhang Jian, Xu Xing, Cai Yingfeng, Ni Shaoyong, Que Hongbo // ISA Transactions. – 2022. – Vol. 126 – P. 597-616.
19. S. Das. Contactless Speed Monitoring and Displaying // International Research Journal of Engineering and Technology, Volume 3, 2016. – P. 153-166.
20. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Організація керування умовами праці» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т.Є. Стиценко, Г.В. Пронюк, Н.М. Сердюк. – Харків, 2017. – 108 с.