

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій
(повне найменування інституту, факультету)

Мікро – та наноелектроніки
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему «Розробка методики ідентифікації кругового вогню
для інформаційно-вимірювальної системи двигуна постійного струму»

Виконала: студентка Ікурсу, групи РТЗ-419м

Спеціальності

152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
«Якість, стандартизація та сертифікація»

Василенко О.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Погосов В.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Манукян О.А.

(прізвище та ініціали)

2020р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут Інформатики та радіоелектроніки
 Факультет Радіоелектроніки та телекомунікацій
 Кафедра Мікро- та наноелектроніки
 Ступінь вищої освіти (освітній ступінь) магістр
 Спеціальність 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»
 (код і назва)
 Напрямок підготовки _____
 (код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Мікро- та наноелектроніки
 _____/Погосов В.В./

“ _____ ” _____ 2020 року

1. ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Василенко Ольга Валентинівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка методики ідентифікації кругового вогню для інформаційно-вимірвальної системи двигуна постійного струму

керівник проекту (роботи) Погосов Валентин Вальтерович, к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “13” листопаду 2020 року №332

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 15 грудня 2020

3. Вихідні дані до проекту (роботи) тягові електродвигуни (ТЕД) постійного струму, експериментальні дані по ТЕД НБ-418К6 та генераторів ТВФ-120 і ТВВ-320 в умовах іскріння різної бальності, вимірвальне обладнання (цифровий осцилограф, датчик Холла); тривалість досліджень – не більше 70 днів;

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, 1 Діагностика несправностей ДПС, 2 Вимірювання параметрів ДПС, 3 Математичне та методичне забезпечення ІВС, 4 Економічна частина, 5 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях, Висновки, Перелік посилань, Додаток.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3	Погосов В.В., зав. каф. МіНЕ, проф.		
4	Севастьянов Р.В. доцент. каф. ПТБД		
5	Якімцов Ю.В., доцент каф. ОПіНС		
Нормоконтр.	Коротун А.В., доц. каф. МіНЕ, к.ф.-м.н.		

7. Дата видачі завдання 15 вересня 2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/П	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<i>Аналіз літературних джерел, пошук аналогів</i>	15.09.20	вик.
2	<i>Розробка концептуальної моделі ІВС</i>	20.09. 20	вик.
3	<i>Дослідження теорії небезпечних явищ в ДПС</i>	25.09. 20	вик.
4	<i>Вибір вимірювальної апаратури</i>	01.10. 20	вик.
5	<i>Отримання експериментальних даних</i>	05.10. 20	вик.
6	<i>Дослідження експериментальних даних</i>	10.10. 20	вик.
7	<i>Дослідження математичного апарату для спектрального аналізу</i>	15.10. 20	вик.
8	<i>Спектральний аналіз експериментальних даних</i>	20.10. 20	вик.
9	<i>Розробка моделей іскріння</i>	01.11. 20	вик.
10	<i>Розробка методичної частини ІВС</i>	05.11. 20	вик.
11	<i>Розрахунок економічних показників</i>	10.11. 20	вик.
12	<i>Розробка заходів з техніки безпеки та охорони</i>	20.11. 20	вик.
13	<i>Формування пояснювальної записки</i>	25.11. 20	вик.
14	<i>Підготовка презентації</i>	05.12. 20	вик.
15	<i>Захист дипломної магістерської роботи</i>	15.12. 20	вик.

Студент
(підпис)Василенко О.В.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник проекту (роботи)
(прізвище та ініціали)Погосов В.В.

АНОТАЦІЯ

ПЗ: 125 с., 90 рис., 20 табл., 49 джерел.

Мета: розробка методики ідентифікації кругового вогню для інформаційно-вимірювальної системи машини постійного струму.

Об'єкт: інформаційно-вимірювальна система ідентифікації іскріння та кругового вогню в ДПС.

Предмет: математичне та методичне забезпечення системи ідентифікації іскріння та кругового вогню в ДПС.

В магістерській роботі проведено аналіз вимірювання параметрів комутаційних процесів та кругового вогню в електродвигунах постійного струму, досліджено принципи ідентифікації небезпечних явищ в ДПС та способи захисту від них.

Розглянуто методи ідентифікації кругового вогню та визначення бальності іскріння, проведено експеримент для визначення впливу іскріння на струм якіра, для чого підібране відповідне вимірювальне обладнання та запропонована схема інформаційно-вимірювальної системи.

Розроблено математичне та забезпечення ІВС для визначення умов аварійного відключення ДПС на основі спектрального аналізу його струму в середовищі математичних процесорів: методику використання вейвлет-перетворення в CAS системі MatLab та швидкого перетворення Фур'є в ECAD програмі MicroCap.

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, ДПС, КОМУТАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ, ІСКРІННЯ, КРУГОВИЙ ВОГОНЬ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ, ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ, ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, ОХОРОНА ПРАЦІ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ДІАГНОСТИКА НЕСПРАВНОСТЕЙ ДПС.....	10
1.1 Іскріння в ДПС	10
1.2 Діагностика ДПС.....	18
1.3 Аналіз методів і способів боротьби з причинами іскріння.....	21
1.4 Способи боротьби з наслідками іскріння.....	23
1.5 Круговий вогонь на колекторі.....	26
1.6 Безпечні параметри ДПС.....	30
1.7 Дослідження кругового вогню.....	31
2 ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДПС.....	33
2.1 Методи ідентифікації іскріння та кругового вогню в ДПС.....	33
2.2 Технічні вимоги проведення вимірювань в ІВС.....	38
2.3 Вимірювальне обладнання	41
2.3.1 Застосування датчику Холла в експерименті.....	41
2.4 Результати експерименту	45
3 МАТЕМАТИЧНЕ ТА МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІВС.....	48
3.1 Можливості спектрального аналізу в MatLab.....	48
3.2 Вейвлет – аналіз в CAS.....	50
3.2.1 Методика одновимірного безперервного вейвлет–аналізу в MatLab.....	59
3.2.2 Методика порівняння (оцінки) сигналів за допомогою одновимірного вейвлет перетворення.....	70
3.3 Спектральний аналіз в ECAD.....	73
3.3.1 Розробка моделі процесу іскріння (комутаційного) в процесі MC11.....	76
3.4 Ідентифікація і аналіз процесів ДПС в ECAD.....	80
3.4.1 Методика ідентифікації процесу іскріння в програмі MC11.....	88
3.5 Структура та алгоритм системи моніторингу.....	89

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	91
4.1 Актуальність теми з позиції маркетингу.....	91
4.2 Визначення трудомісткості та тривалості робіт.....	93
4.3 Побудова мережного графіка.....	95
4.4 Розрахунок кошторису витрат на проведення НДР.....	98
4.4.1 Розрахунок вартості матеріалів.....	98
4.4.2 Розрахунок вартості енергоресурсів.....	98
4.4.3 Спеціальне устаткування для науково - експериментальних робіт.....	99
4.4.4 Розрахунок заробітної плати.....	99
4.4.5 Відрахування на соціальні заходи.....	100
4.4.6 Накладні витрати.....	100
4.4.7 Бальна оцінка економічної ефективності науково-дослідної роботи.....	100
4.5 Висновки	102
 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	103
5.1 Аналіз потенційних небезпек.....	104
5.2 Заходи з забезпечення безпеки.....	107
5.4 Заходи з пожежної безпеки.....	111
5.5 Заходи з забезпечення безпеки у надзвичайні ситуації.....	113
 ВИСНОВКИ	117
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	119
Додаток А. Методика програмування електронного осцилографа для системи моніторингу.....	124

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРЕЧЕНЬ

CAD – ComputerAidedDesign

CAS – ComputerAlgebraSystem

FFT – FastFourierTransform

HMI – Human-MachineInterface(людино-машинний інтерфейс)

ВКФ – Взаємнокореляційна функція

ВС – Вимірювальна система

ДПС – Двигун постійного струму

ЕМВ – Електромагнітне випромінювання

ЕОМ–Електронна обчислювальна машина

ЕРС – Електрорушійна сила

ІВТ – Інформаційно-вимірювальна техніка

ІВС – Інформаційно-вимірювальна система

КЦП – Колекторно–щітковий пристрій

МС11 – Програма MicroCap 11

МПС – Машини постійного струму

МРС –Магнітнорушійна сила

ПКІ – Пристрій контролю іскріння

САК – Система автоматичного керування

ТЕД – Тяговий електродвигун

ТУ – Технічні умови

ШВЦ –Шунт вимірювальний цифровий

ВСТУП

Засоби інформаційно-вимірювальної техніки (ІВТ) є необхідною складовою більшості систем автоматизації та моніторингу об'єктів[1,2]. В останніх, ІВТ дозволяють більш точно та оперативно виявляти несправності, повідомляти за вихід контрольованих параметрів за допустимі межі. Інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) мають в своєму складі апаратне та програмне забезпечення, останнє має бути підтримано математичним та інформаційним забезпеченням. При проектування ІВС зазвичай використовують також методичне забезпечення[2].

Чим більш складний і дорогий об'єкт моніторингу, тим нагальніше стоїть необхідність автоматизації, оскільки своєчасне виявлення проблем дозволяє суттєво знизити витрати на ремонт, ба навіть запобігти аварійній ситуації. Одним з таких об'єктів моніторингу є потужні електродвигуни постійного струму (ДПС)[3-5] загальнопромислового і спеціального виконань, які широко застосовуються в промисловості та на транспорті.

Велика частина несправностей ДПС пов'язана з обмотками і виявляється в порушенні процесу комутації. При експлуатації ДПС на колекторі іноді виникає іскріння, електрична дуга, або безліч дрібних електричних розрядів. Це явище називають круговим вогнем. Причин виникнення цього небезпечного явища багато [6,7], а слідством є повний вихід з ладу ДПС.

Прояв порушень комутації в іскрінні колекторно-щіткового вузла давно розглядається як показник стану ДПС. Заміна щіток, проточка колекторів іт. п. коштує дуже дорого і в деяких машинах (тягових електродвигунах, машинах крокуючих екскаваторів і т. д.) може скласти в рік до 20...30% їх вартості. Ще більший збиток може бути заподіяний зупинкою машини на ремонт і припиненням виробництва продукції.

У машинах малої потужності, у яких секції обмотки якоря мають досить великий активний опір і індуктивність, містки згорають при невеликому струмі, і явище кругового вогню протікає порівняно нешкідливо. В цьому випадку на

колекторі спостерігається невелике іскріння, якою іноді називають потенційним іскрінням, оскільки воно обумовлене підвищеною різницею потенціалів між пластинами колектора.

У машинах великої потужності (наприклад, тягових електродвигунах, ТЕД), а також в машинах середньої і малої потужностей з високими значеннями напруги між колекторними пластинами, круговий вогонь є потужною електричною дугою на колекторі. Ця дуга перекриває значну частину колектора або навіть замикає накоротко щіткотримачі різної полярності (перекриття колектора). Виникнення потужної дуги на колекторі супроводжується сильним світловим і звуковим ефектом (у великих машинах це схоже на вибух). Великий струм якоря, що виникає при перекритті колектора, викликає спрацьовування захисту і ушкоджує поверхню колектора, ізолятори щіткотримачів і т. д., тобто виводить машину з ладу.

Для захисту ДПС від кругового вогню між колектором і обмоткою встановлюють ізолюючий екран; між щітками різної полярності встановлюють бар'єри з ізоляційного матеріалу для створення перешкоди на шляху поширення дуги; застосовують повітряне дуття, що здуває дугу у бік захищеного підшипника. Додаткові полюси і компенсаційна обмотка хоч і послабляють небезпеку появи кругового вогню, але повністю її не усувають. Означені способи досить дорогі та не завжди ефективні, тому є доцільним запровадження системи моніторингу, яка при появі небезпечного іскріння, буде відключати ДПС для ремонту.

Розробка такої системи потребує визначення параметрів ДПС, які мають контролюватися, і визначення критеріїв, за якими приймається рішення про відключення ДПС. Завдання ідентифікації високобального іскріння колекторно-щіткових вузлів та кругового вогню ДПС полягає в контролі якості комутації, що дозволяє досліджувати стан ДПС в різних режимах експлуатації та одночасно попереджати про появу несправності, для своєчасного ухвалення рішення про ремонт для збереження працездатності ДПС.

Розроблене в даній роботі математичне, інформаційне та методичне забезпечення має стати основою для розробки ІВС та системи автоматизованого керування (САК) ДПС.

1 ДІАГНОСТИКА НЕСПРАВНОСТЕЙ ДПС

1.1 Іскріння ДПС

Іскріння може викликатися багатьма причинами, які зазвичай діляться на дві групи: механічні і електромагнітні [8-10]. Типові механічні причини биття колектора, його еліпсна, форма шорсткість його робочої поверхні, наявність колекторних пластин і ізоляційних прокладок, що виступають, вібрація щіткотримачів, тощо. Усі ці причини призводять до вібрації щіток, у зв'язку з чим можливий короткочасний розрив контакту між щіткою і колектором і виникнення короткої електричної дуги. Особливо важко забезпечити відсутність вібрації щіток при великих швидкостях на поверхні колектора приблизно 50 м/с і вище.

Іскріння також може виникати внаслідок неправильного підбору сорту щіток, неправильного їх розставляння і занадто слабкого натиснення на колектор.

Електромагнітні причини призводять до того, що навіть у разі ідеального стану щіткового контакту при виході колекторної пластини з-під щітки відбувається розрив електричного ланцюга, по якому проходить струм, і виникає коротка електрична дуга, що ушкоджує збігаючі краї щіток і колекторних пластин.

Іскріння, викликане електромагнітними причинами, ушкоджує поверхню колектора та призводить до вібрації щіток, тому ісприяє виникненню іскріння з механічних причин. Нестійкість же щіткового контакту, обумовлена механічними причинами, істотно впливає на електромагнітні процеси, що відбуваються в комутованих секціях. Тому звичайне іскріння щіток на колекторі є результатом спільної дії багатьох причин [7].

Розглянемо процес комутації детальніше.

У кожному з провідників обмотки якоря струм міняє свій напрям на зворотній при переході з однієї паралельної гілки в іншу (рисунки 1.1, а). Велику частину часу струм секції дорівнює струму паралельної гілки: $i_a = i_a / (2_a)$. Зміна напрямку струму в секції відбувається за період часу T_k , впродовж якого сполучені з секцією колекторні пластини стикаються з щіткою (рисунки 1.1, б). Час T_k , впродовж якого секція виявляється замкнутою накоротко щіткою, називається періодом комутації; секції, в

яких змінюється струм, називаються комутованими.

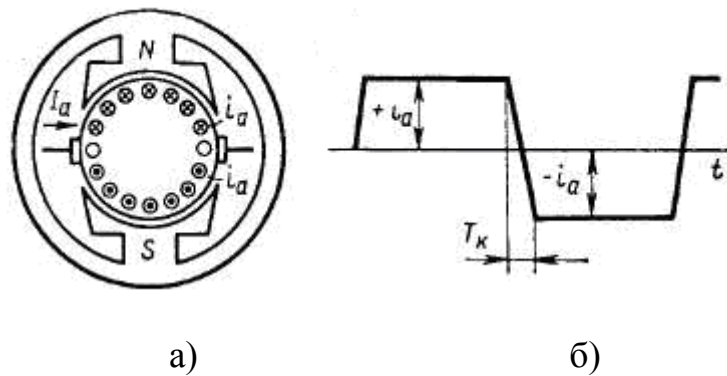


Рисунок 1.1 – Розподіл струму в паралельних гілках:
а) – зміна струму в секції; б)– осцилограма струму в секції

Період комутації

$$T_k = b_{щ} / v_{кол}, \quad (1.1)$$

де $b_{щ}$ – ширина щітки;

$v_{кол}$ – швидкість руху точки на поверхні колектора.

У сучасних машинах $T_k = 0,001 \div 0,0001$ с, внаслідок чого середня швидкість зміни струму в секціях дуже велика і може індукуватися велика ЕРС само– і взаємоіндукції, що називається реактивною ЕРС:

$$e_p = - L_{рез} di / dt, \quad (1.2)$$

де $L_{рез}$ — результуюча індуктивність секції, що визначає значення реактивної ЕРС.

Назва реактивна обумовлено тим, що, згідно з правилом Ленца, ця ЕРС перешкоджає зміні струму – уповільнює його. Окрім реактивної ЕРС в комутованій секції індукується також ЕРС обертання e_k , створювана зовнішнім магнітним полем і називається комутоюемою:

$$e_{\kappa} = 2B_{\kappa} l_a v_a w_c, \quad (1.3)$$

де B_{κ} – індукція в повітряному проміжку в зонах, де переміщуються комутовані секції;

l_a – довжина провідника в магнітному полі;

v_a – швидкість точки, що лежить на поверхні якоря;

w_c – число витків в секції.

Внаслідок реактивної ЕРС за період комутації струм не завжди устигає порівнятися із струмом паралельної гілки і при виході колекторної пластини з-під щітки розривається струм і виникає іскріння.

Індукція B_{κ} може створюватися МРС головних полюсів і реакції якоря, а також МРС додаткових полюсів, які встановлюються в машинах постійного струму для поліпшення процесу комутації.

Таким чином, головною причиною, що викликає іскріння, є наявність реактивною ЕРС; створення комутуючої ЕРС може значно компенсувати вплив реактивною ЕРС, але чим більше e_p , тим більш вірогідне виникнення іскріння [3].

Розглянемо детальніше умови виникнення реактивної ЕРС, зупинившись на визначенні середньої швидкості зміни струму в комутованих секціях і результуючій індуктивності. Середня швидкість зміни струму в комутованій секції за період комутації

$$(di/dt)_{cp} = \Delta i / T_{\kappa} = 2i_a / T_{\kappa}, \quad (1.4)$$

$$T_{\kappa} = b_{щ} / v_{\kappa}. \quad (1.5)$$

Таким чином, збільшуючи ширину щітки, та, тим самим, збільшуючи період комутації T_{κ} , можна зменшити швидкість зміни струму в секції. Проте, якщо при цьому щітка перекриває декілька колекторних пластин, то комутація відбувається

одночасно в декількох секціях і слід враховувати взаємоіндукцію, тобто збільшення ширини щітки може привести до незначного зменшення реактивної ЕРС внаслідок одночасного зменшення $(d_i/d_t)_{cp}$ і збільшення $L_{рез}$.

У зв'язку з цим представляє інтерес визначення середньої швидкості зміни струму в усіх комутуваних секціях. За час, що відповідає повороту якоря на одне полюсне ділення (рисунк 1.2, а):

$$\Delta t = \tau / v_a = \pi D_a / (2p v_a), \quad (1.6)$$

відбувається зміна напрямку струму в усіх секціях обмотки якоря, тобто сумарний приріст струму в секціях (без урахування знаку) :

$$\sum \Delta i_c = 2i_a S = i_a N / w_c, \quad (1.7)$$

де $S = N/(2w_c)$ –число секцій обмотки якоря;

N –кількість провідників в обмотці якоря.

Отже, середня швидкість зміни струму в усіх секціях обмотки якоря

$$\left(\sum \Delta i_c / \Delta t \right)_{cp} = i_a N 2p v_a / (w_c \pi D_a) = 2p A v_a / w_c, \quad (1.8)$$

де p –число пар полюсів магнітного поля.

Оскільки зміна струму в секціях відбувається тільки в період комутації, що відповідає переміщенню якоря по дузі b_k в зоні комутації, вираз (1.8) визначає середню швидкість зміни струму в усіх комутуваних секціях машини. При аналізі комутації зазвичай розглядаються секції, комутувані однією щіткою. За цієї умови:

$$\left(\frac{d \sum i_k}{dt} \right)_{cp} = \frac{1}{2p} \left(\frac{\sum \Delta i_c}{\Delta t} \right) = \frac{A v_a}{w_c}. \quad (1.9)$$

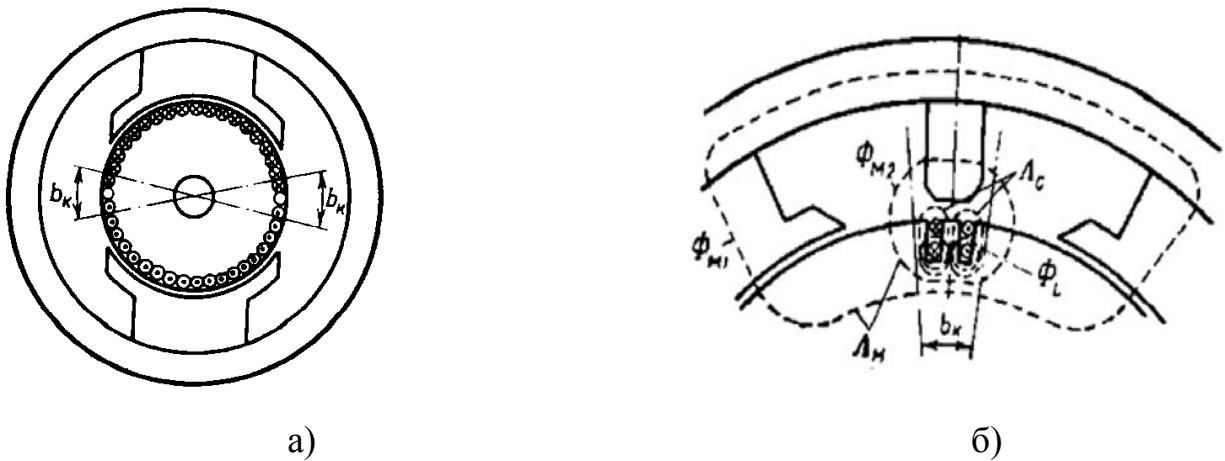


Рисунок 1.2 – Комутація в ДПС:

а) схематичне розташування комутаційної зони; б) магнітні потоки секцій

Таким чином, середня швидкість зміни струму в усіх комутуваних секціях не залежить від ширини щітки і визначається тільки струмом машини та її швидкістю. Це фундаментальне положення, висунене Л. Дрейфусом, є основою, на якій будується уся теорія комутації [11].

Широке поширення отримала формула Піхельмайера для обчислення реактивної ЕРС, в якій взагалі не враховується ширина щітки:

$$e_{p\Pi} = L_{pez} \left(\frac{d \sum i_k}{dt} \right)_{cp} = 2 A v_a w_c L_{\Pi} . \quad (1.10)$$

Формула (1.10) має просту структуру і використовується для оцінки напруженості комутації машини; важливо, що з (1.10) слідує неможливість істотного поліпшення комутації шляхом збільшення ширини щітки.

Аналіз коефіцієнта L_{pez} проведемо, використовуючи вираз:

$$L_{pez} = \frac{di_c}{dt} = w_c (d\Phi_1 / dt + d\Phi_2 / dt + d\Phi_3 / dt + \dots), \quad (1.11)$$

де Φ_1, Φ_2, Φ_3 – зчеплені потоки, що створюються комутуваними секціями.

З потоків, зчеплених з комутованими секціями (рисунок 1.2, б), можна виділити:

- потік взаємоіндукції, що замикається через головні полюси Φ_{M1} ;
- потік взаємоіндукції, що замикається по повітрю і через осердя додаткового полюса Φ_{M2} ;
- потік розсіяння Φ_{M1} охоплює комутовану секцію і найближчі до неї (що лежать в одному пазу при зубчастому якорі).

Цим потокам відповідає магнітна провідність $\Lambda_{M1}\Lambda_{M2}\Lambda_{M3}$.

Потік взаємоіндукції Φ_{M1} зчеплений з повним струмом усіх комутованих секцій цієї зони комутації і струмом некомутованих секцій. Якщо щітки встановлені на нейтралі, повний струм некомутованих секцій дорівнює нулю. Повний струм комутованих секцій, як це видно з рисунку 1.2, також рівний або близький до нуля. Але, згідно з (1.9), струм в усіх комутованих секціях змінюється з постійною швидкістю. Уявна невідповідність пояснюється тим, що при обертанні якоря із зони комутації йдуть секції, в яких зміна струму завершена, а входять нові секції, в яких струм починає змінюватися після того, як секція замикається щіткою на коротко. За малий проміжок часу Δt точка на поверхні якоря переміщається на довжину дуги $\Delta x = v_a \Delta t$, і в зону комутації входять секції, що мають повний струм $\Sigma i' = A \Delta x = A v_a \Delta t$ і виходять секції, що мають той же струм, але спрямований в інший бік (рисунок 1.2, б):

$$\sum i'' = -A v_a \Delta t. \quad (1.12)$$

Зміна повного струму в зоні комутації за час Δt внаслідок обертання якоря:

$$\sum i' + \sum i'' = 2A v_a \Delta t. \quad (1.13)$$

Швидкість зміни повного струму:

$$d / dt \left(\sum i' + \sum i'' \right) = 2A v_a, \quad (1.14)$$

дорівнює середній швидкості зміни повного струму в комутованих секціях:

$$d / dt \left(w_c \sum i_k \right) = 2A v_a. \quad (1.15)$$

Іншими словами, в усіх секціях, які при обертанні якоря потрапляють в зону комутації, повинна статися зміна напрямку струму до моменту виходу із зони комутації.

При гладкому якорі, що ідеалізується, з вузькими колекторними пластинами миттєва швидкість зміни струму дорівнює середній. У реальному гладкому якорі миттєве значення може відрізнятися від середнього, проте період усереднювання малий – він відповідає повороту якоря на одне колекторне ділення.

При зубчастому якорі період усереднювання дорівнює часу повороту якоря на одне зубцеве ділення – після повороту на одне зубцеве ділення процес повинен повністю повторитися, а жодне зубцеве ділення не має яких-небудь відмінностей від інших (технологічними погрішностями нехтуємо і розглядаємо стаціонарний режим). Отже, в реальному якорі можуть бути різними миттєва і середня швидкості зміни повного струму в зоні комутації, і тоді складова реактивної ЕРС в комутованій секції від зміни потоку Φ_{M1} .

$$e_{pM1} = -w_c \frac{d\Phi_{M1}}{dt} = w_c \Lambda_1 \left[\frac{d}{dt} \left(w_c \sum i_k \right) - 2A v_a \right]. \quad (1.16)$$

Що аналогічно становить ЕРС від потоку взаємоіндукції:

$$e_{pM2} = -w_c \Lambda_2 \left[\frac{d}{dt} \left(w_c \sum i_k \right) - 2A v_a \right]. \quad (1.17)$$

де Φ_L – пазовий потік розсіяння (рисунок 1.2, б), він визначається:

i_{Π} – повним струмом провідників, що лежать в даному пазу.

Таким чином:

$$e_{pL} = -w_c \Lambda_{\Pi} \frac{d \sum i_{\Pi}}{dt}, \quad (1.18)$$

тобто ця складова обумовлена магнітною провідністю паза і залежить від швидкості зміни струму в самій секції і в секціях цього паза, комутованих одночасно з нею. Отже:

$$e_p = e_{pM1} + e_{pM2} + e_L, \quad (1.19)$$

і дві перші складові з'являються тільки, якщо швидкість зміни повного струму в зоні комутації відрізняється від середнього значення. Л. Дрейфус висловив припущення про те, що, оскільки e_{pM1} і e_{pM2} дуже великі, в реально існуючих машинах миттєва швидкість зміни повного струму в зоні комутації практично рівна середній і тому $e_p \approx e_L$.

Це явище Л. Дрейфус назвав «середньопрямолінійною» комутацією. Точні експериментальні дослідження підтвердили правильність гіпотези в реальних режимах комутація являється «середньопрямолінійною».

Непрямим, але не менш важливим підтвердженням постійності швидкості зміни струму в усіх комутуваних секціях є те, що при розрахунку реактивної ЕРС майже усі дослідники (за рідкісним виключенням) нехтують провідністю головних полюсів і провідністю потоку Φ_{M2} , тобто вважають $e_p \approx e_L$, а результати розрахунків добре узгоджуються з практикою.

На практиці прагнуть мати таке значення потоку в зоні розташування секцій, щоб комутація була лінійною або дещо прискореною [6].

1.2 Діагностика ДПС

В роботі [12] проведений діагностичний тест (рисунок 1.3), який полягав у формуванні впливу, яке викликають перехідний процес пуску електричної машини і який характеризується безліччю нестационарних вихідних функцій $Z(t)$. В якості безлічі $Z(t)$ найбільш ефективно використовувати графіки зміни струму якоря $I(t)$, напруги між різнополярними щіткотримачами $U(t)$ і частоти обертання якоря $n(t)$. Безліч визначається шляхом реєстрації його миттєвих значень в пристрої пам'яті вимірювального комплексу з кроком квантування dt . Висновок про технічний стан електричної машини визначається за співвідношенням:

$$\overline{Z(t)} - Z(t) \in Dg, \quad (1.20)$$

де $\overline{Z(t)}$ – еталон порівняння;

$Z(t)$ – критерії порівняння.

Експерименти показали, що особливість пускових характеристик – наявність пульсацій струму і напруги між щітками різної полярності (рисунок 1.4).

Внаслідок цього залежності $Z(t)$ можуть бути представлені у вигляді двох складових, наприклад, $U(t)$ має вигляд:

$$U(t) = U_{\infty}(t) + U_{\sim}(t). \quad (1.21)$$

Перша з них – характеризує перехідну функцію в електричному ланцюзі від джерела напруги до напруги між різнополярними щітками. Ця складова низькочастотна і, як правило, монотонна функція. Друга складова, власне пульсації, високочастотна визначається технічним станом і особливостями електричної машини і тому є джерелом діагностичної інформації.

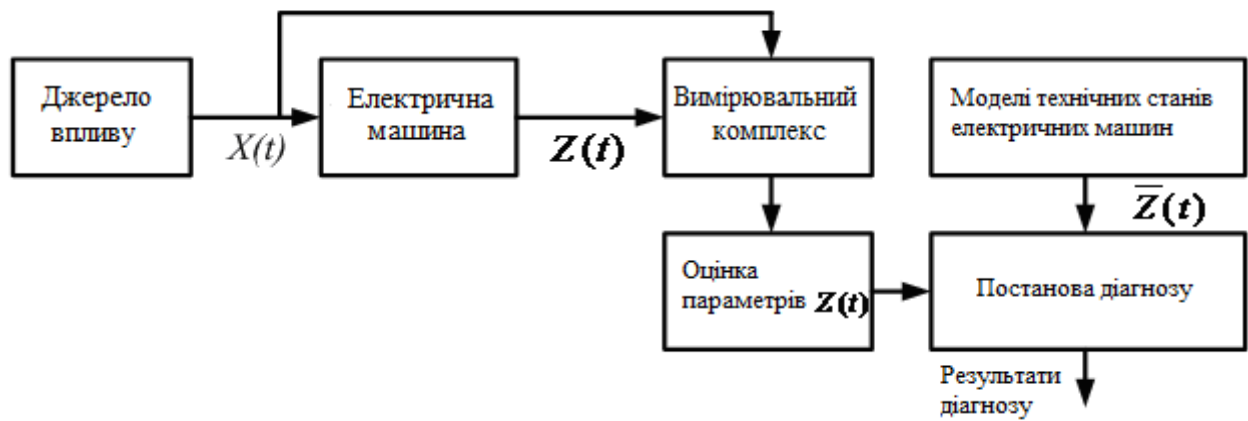


Рисунок 1.3– Функціональна схема системи тестового діагностування електричної машини

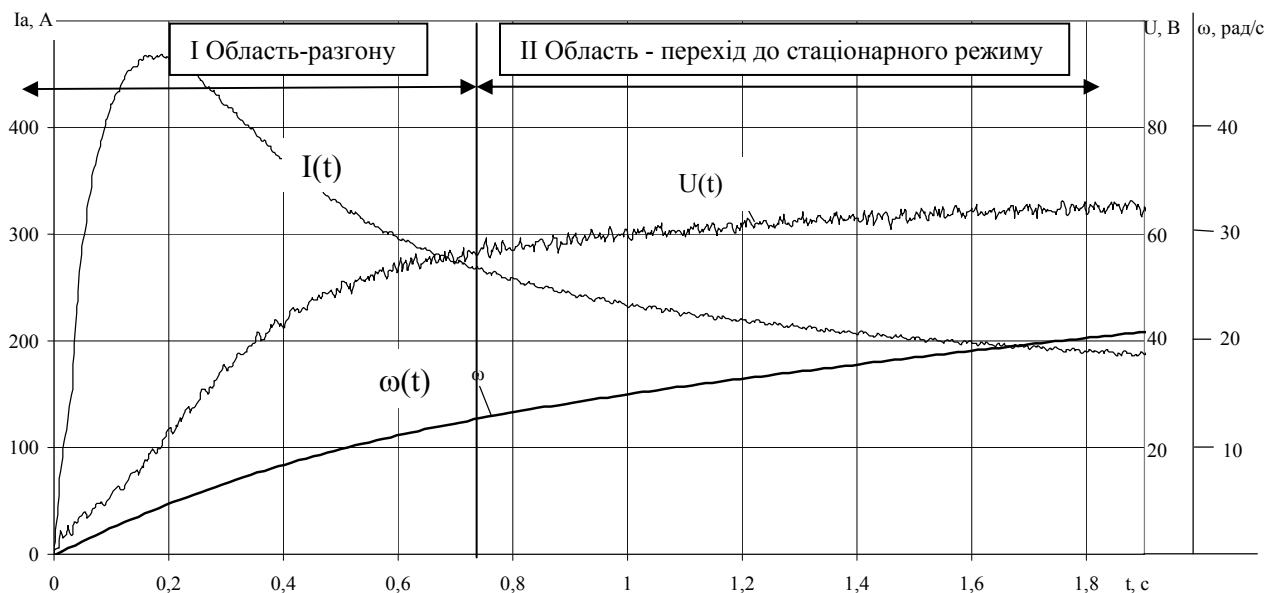


Рисунок 1.4– Характерний вид пускових діаграм, одержуваних при реалізації діагностичного тесту(пуску електричної машини)

Експерименти також показали, що характер пульсацій або їх інтенсивність різні в справних і несправних електричних машин. Це викликало необхідність класифікувати дефекти електричних машин згідно з діаграми, представленої на рисунку 1.5. При цьому враховувалися літературні джерела та думки фахівців з обслуговування та ремонту ДПС[7-11].

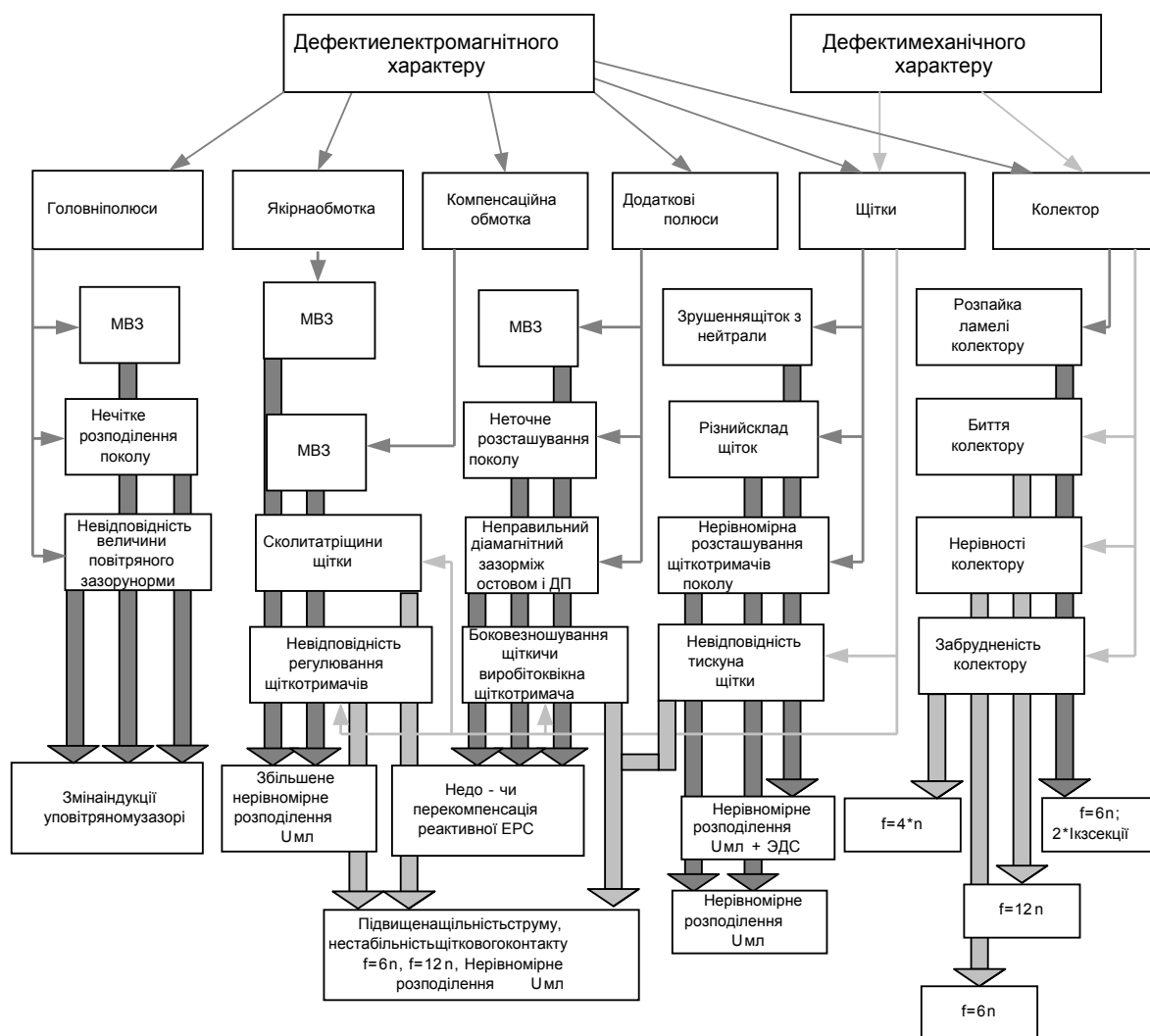


Рисунок 1.5 – Дефекти ДПС

Джерела пульсацій (для струму та напруги) можуть бути зумовлені:

- пульсаціями магнітного потоку; змінними індуктивними опорами обмоток;
- змінюється провідність паралельних ланцюгів обмотки якоря;
- часової і просторової несиметрії електричних і магнітних кіл.

Пульсації магнітного потоку виникають через спотворень електромагнітного поля, нерівномірності повітряного зазору між якорем і головними полюсами, наявності пазів (зубців), коливання якоря в підшипниках і т.д. Дефекти вузла струмознімання, також викликають пульсації напруги між щітками та струму якоря.

Так, наприклад, виступаючі колекторні пластини або міканіт викликають появу пульсацій при проходженні кожного щіткотримача. Частота появи пульсацій

при нерівності колектора $f_{нк}$ складе:

$$f_{нк} = K_{щ} \cdot n \cdot N_n, \text{ Гц.} \quad (1.22)$$

де n – частота обертання двигуна, об/с;

$K_{щ}$ – кількість щіткотримачів;

N_n – кількість нерівностей колектора.

Биття колектора може викликати появу пульсацій напруги з частотою рівною:

$$f_{бк} = 2n \cdot K_{щ}, \text{ Гц.} \quad (1.23)$$

Розпайка ламелей колектора може призводити до появи пульсацій напруги з частотою:

$$f_{pn} = n K_{щ}, \text{ Гц.} \quad (1.24)$$

1.3 Аналіз методів і способів боротьби з причинами іскріння

Як було зазначено вище, процес комутації часто супроводжується іскрінням на колекторі. Сильне іскріння може перейти в круговий вогонь на колекторі, при цьому виникає електрична дуга, що охоплює колектор частково або повністю по його поверхні. Причини іскріння можуть бути також пов'язані з комутацією. Для їх усунення необхідно зменшити, або компенсувати реактивну ЕРС [7,10].

Зменшити реактивну ЕРС і викликаний нею струм можна способами:

1) число витків в секції слід брати найменшим. Проте, це не завжди можна здійснити, оскільки при малому числі витків в секції збільшується число останніх, що веде до необхідності мати надто багато колекторних пластин, внаслідок чого діаметр колектора виходить великим;

2) для того, щоб одночасно комутувало найменше число секцій, слід вибирати

ширину щітки близькою до ширини однієї колекторної пластини. Проте при цьому колектор використовується погано (занадто подовжується), тому на практиці ширину щітки зазвичай вибирають в 1,5–3 рази більше колекторної пластини;

3) слід вибирати низьку швидкість обертання, проте це небажано, оскільки тихохідні машини мають велику вагу і габарити;

4) з рівняння (1.26) виходить, що для зменшення додаткового струму i_d , викликаного ЕРСкороткозамкненої комутованої секції, слід вибирати жорсткіші щітки, що мають підвищений опір r_1 і r_2 . Проте жорсткі щітки ведуть до підвищення зносу колектора.

Таким чином, кожен з перерахованих способів може бути використаний в обмеженому ступені, інакше він викличе небажані побічні явища.

Компенсувати реактивну ЕРС можна також у наступні способи:

1) зрушують щітки за фізичну нейтраль у бік обертання в генераторному режимі і проти обертання в руховому. Комутовані секції опиняються в зоні потоку, що індукуює в них ЕРС обертання, спрямованому зустрічно реактивній ЕРС. При правильно підібраному куті зрушення має місце компенсація реактивної ЕРС. Недоліком цього способу є його непридатність для реверсивних машин і необхідність зі зміною навантаження зрушувати щітки в нове положення. Тому нині цей спосіб не застосовується. У мікромашинах щітки завжди встановлюються нерухомо на геометричній нейтралі;

2) для створення необхідного компенсуючого потоку в області міжполюсного простору, в якій розташовуються комутовані секції, встановлюють додаткові полюси. Для забезпечення автоматичної компенсації реактивної ЕРС і реакції якоря в зоні комутації при зміні навантаження машини потік додаткових полюсів повинен змінюватися пропорційно струму якоря. Тому обмотка додаткових полюсів з'єднується послідовно з обмоткою якоря. Установка додаткових полюсів є основним засобом, використовуваним для поліпшення комутації промислових машин постійного струму. Застосування додаткових полюсів в мікромашинах дуже обмежене, оскільки їхнє розміщення зустрічає значні труднощі;

3) додаткові полюси компенсують реакцію якоря тільки в міжполюсному

просторі, під полюсами реакція якоря залишається такою, що не компенсується і спотворює поле, це призводить до різкої різниці між ЕРС, наведеної в сусідніх секціях обмотки, і до підвищення різниці потенціалів між пластинами комутуваних секцій, що може викликати утворення на колекторі кругового вогню. Для запобігання цього застосовують компенсаційну обмотку.

Компенсаційна обмотка К закладається в пази полюсних наконечників і з'єднується послідовно з обмоткою якоря. Створювана додатковими полюсами МРС і МРС реакції якоря мають бути рівні і спрямовані зустрічно. Виконання компенсаційної обмотки вимагає великої додаткових витрат міді, тому її застосовують лише в спеціальних типах електричних машин і в машинах великої потужності, призначених для роботи в тяжких умовах.

У мікромашинах обмотка якоря має відносно великий опір, що дещо полегшує комутацію. Крім того, зважаючи на обмеженість місця, розміщення в мікромашинах компенсаційної обмотки і додаткових полюсів зустрічає труднощі і тому не застосовується. Відсутність компенсаційної обмотки і додаткових полюсів ускладнює комутацію, тим паче, що мікромашини часто працюють при великих швидкостях обертання. Для поліпшення комутації мікромашин число витків в секції роблять найменшим і вибирають щітки з підвищеним опором. Оскільки мікромашини часто працюють в умовах підвищеної вібрації, то для поліпшення комутації збільшують тиск на щітки, що зменшує термін дії щітки, оскільки вона швидше зношується під час інтенсивного тертя[10].

1.4 Способи боротьби з наслідками іскріння

Іскріння, що виникає при комутації колекторних машин, є інтенсивним джерелом радіоперешкод. При іскрінні та дугоутворенні створюється безперервний спектр високочастотних коливань, які наводять перешкоди в радіоприймальних і телевізійних пристроях. Джерелом радіоперешкод може також стати пульсація ЕРС, обумовлена дією колектора. Для аналізу криву пульсації ЕРС розкладають в

гармонійний ряд (Фур'є). Порядок гармонік і їх амплітуди визначаються числом пар полюсів і колекторних пластин. У міру зростання порядку гармоніки її амплітуда швидко зменшується. Частота основної гармоніки обернено пропорційна до періоду T_k комутації, тобто:

$$f = \frac{1}{T_k} = \frac{\omega}{2\pi} K, \quad (1.24)$$

ω —швидкість обертання якоря, рад/с;

K — число колекторних пластин машини.

Частоти гармонік, викликаних колекторною пульсацією ЕРС, є порівняно невеликими, і звичайне іскріння під щітками є головним джерелом перешкод, які в радіоприймальній апаратурі викликають тріск і безперервний шум.

Рівень радіоперешкод не повинен перевершувати рівня, встановленого стандартом (таблиця 1.1)[16]. Для зменшення радіоперешкод застосовують електричні фільтри, екранування машини і симетрування обмоток збудження, сполучених послідовно з якорем.

Таблиця 1.1 – Норми гранично допустимих радіоперешкод електротехнічних облаштувань комунального і побутового обслуговування

Потужність електро-технічного пристрою, КВт	Напруга, мкВ			Відстань до джерела радіо-перешкод, м	Рівень поля частот, мкВ		
	Для частот 60 – 2,5 МГц	Для частот 2,5 – 0,5 МГц	Для частот 0,5 – 0,15 МГц		60 – 2,5 МГц	2,5 – 0,5 МГц	0,5 – 0,15 МГц
< 0,5	10	50	25	1	100	50	200
> 0,5	50	200	100	10	500	250	1000

Найбільш простими фільтрами є конденсатори (рисунок 1.6, а), сполучені між дротами мережі (конденсатор 1) або дротом і корпусом (конденсатор 2). Найбільш ефективними є прохідні конденсатори 2, в яких один вивідний кінець приєднується до корпусу, а інший проходить через конденсатор і є струмоведучим провідником,

сполученим послідовно з обмоткою якоря. Ємність конденсатора зазвичай складає 0,1–1 мкф.

Найкращі результати дає застосування Г – подібних (рисунок 1.6, б) і особливо П – образних (рисунок 1.6, в) селективних фільтрів, які пропускають постійну складову напруги і затримують високочастотні гармонійні складові.

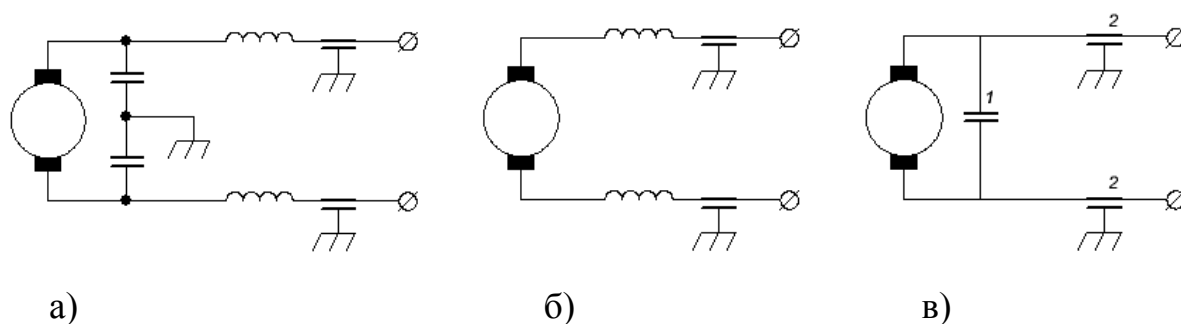


Рисунок 1.6 –Схеми захисту від радіоперешкод:

а) ємнісний фільтр; б) Г – подібний фільтр; в) П – подібний фільтр

Під час випробування при підвищеній напрузі, конденсатори слід відключати, оскільки їх випробувальна напруга зазвичай нижче, ніж випробувальна напруга машини.

Роль екрану, що поглинає перешкоди, в електричній машині грає корпус, на який з боку колектора надівають захисний ковпак. Іноді для поліпшення екранування вентиляційні отвори в щитах закривають густою мідною або латунною сіткою, а кінець валу, що виступає, замикають на корпус спеціальною щіткою.

Проводка виконується екранованим дротом, в деяких випадках усі провідники поміщають в алюмінієве або мідне панцирне обплетення. Екран дроту або обплетення повинні мати надійне електричне з'єднання з корпусом машини, який має бути заземлений. Екранування не захищає від гармонік, викликаних пульсацією ЕРС якоря. З метою збільшення внутрішнього високочастотного опору, з боку зовнішніх затисків застосовують симетрування. Для цього обмотку збудження, сполучену послідовно з якорем, ділять на дві частини, які сполучають симетрично відносно колектора (рисунок 1.7) [8-10].



Рисунок 1.7 – Симетрування послідовних обмоток збудження

1.5 Круговий вогонь на колекторі

На колекторі електричної машини може виникнути електрична дуга, що супроводжується різким збільшенням струму і спрацьовуванням захисту. Поверхня колектора при цьому більшою чи меншою мірою оплавляється і до усунення ушкоджень машина не може працювати.

Це явище носить назву кругового вогню. Зазвичай воно виникає в машинах з великою напругою між суміжними колекторними пластинами (25...50 В), при різких збільшеннях навантаження. Проте буває, що круговий вогонь виникає і без видимих «провокацій»: при нормальній роботі машини в режимі, що встановився, раптом спалахує електрична дуга, що супроводжується сильним звуковим ефектом. Це явище нагадує грозу в мініатюрі, при спокійному небі. Надзвичайна швидкоплинність розвитку електричної дуги на колекторі сильно утрудняла вивчення механізму його виникнення [6].

За теорією «містків», початок круговому вогню кладе вугільний пил, який при роботі відкладається на ізолюючих прокладках між пластинами колектора і дає можливість утворитися невеликій дузі між пластинами, при напрузі між ними 25 ...50 В залежно від опору ланцюга короткого замикання. Одного разу виникнувши, така дуга утримується і тоді, коли сторони секції між відповідними пластинами колектора потрапляють в область меншої індукції. Оскільки в область максимальної індукції потрапляють усі нові секції, то незабаром утворюється цілий вінець невеликих дуг, «містків» на колекторі, що врешті-решт переходить в суцільну дугу між щіткотримачами різної полярності (рисунок 1.8).

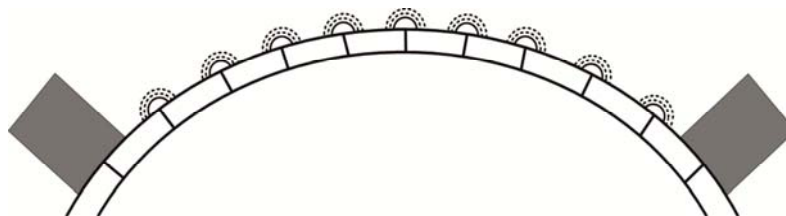


Рисунок 1.8— Утворення кругового вогню згідно теорії «містків»

За теорією витягування дуги з-під щітки [6,9], комутаційні дуги, що виникають при іскрінні щіток, горять деякий час між щіткою і колекторною пластиною, що віддаляється. Якщо іскріння щіток досить інтенсивне, то кожна з дуг іонізує навколишній простір. У зв'язку з цим кожна наступна дуга горить довше попередньої і відбувається поступове витягування комутаційних дуг.

Коли ЕРС між щіткою і колекторною пластиною стане достатньою для підтримки дуги, струм в ній зростає і дуга поширюється по усьому колектору.

Напруга між щіткою і колекторною пластиною, що віддаляється:

$$U_a = \sum_{i=1}^n e_c i, \quad (1.25)$$

де e_c – миттєве значення ЕРС секції;

n – число колекторних пластин між щіткою і даною точкою ($n = x/t_{\text{кол}}$);

де $t_{\text{кол}}$ – колекторне ділення.

При постійності індукції в повітряному проміжку, якщо нехтувати дискретністю числа n , $U_a \approx e_c x/t_{\text{кол}}$.

Таким чином, крутизна підйому потенційної колекторної кривої на прямолінійній ділянці $dU_a/dx = e_c/t_{\text{кол}}$, залежить не лише від напруги між сусідніми колекторними пластинами e_c , але і від колекторного ділення.

Відомо з практики, що машини з вузькими колекторними пластинами більше схильні до виникнення кругового вогню, ніж з широкими пластинами[9].

Досліди, які довели багаторазовість виникнення і згасання дуги між

колектором і щіткою, послужили основою теорії витягування дуги з-під щітки, мали ряд недоліків, які ставили під сумнів всю теорію. Її протиріччя і недоліки змусили продовжити дослідження по виявленню механізму виникнення кругового вогню.

В якості об'єкту випробування була вибрана високовольтна машина потужністю 180 кВт, при експлуатації якої часто виникав круговий вогонь. У дослідженні машина працювала в генераторному режимі при холостому ході зі знятими щітками, тобто повністю виключалося витягування дуги з-під щітки. Електрорушійну силу генератора поступово збільшували, підвищуючи частоту обертання і струм збудження. При режимі, близькому до номінального, на колекторі машини виник круговий вогонь. Перед цим на колекторі не було помітно ані «містків», що горіли, ані яких-небудь інших аномалій. Повторні випробування після зачистки колектора і відновлення ізоляційних поверхонь також часом призводили до появи кругових вогнів. Виникло припущення про те, що круговий вогонь з'являвся в результаті одиничного спалаху між суміжними пластинами, викликаного випадковими причинами: згоранням мідної задирки, що залишилася від проточки, попаданням шматочка графіту від щіток.

Для перевірки цієї гіпотези між двома колекторними пластинами забивався осколок щітки, потім якір наводився в обертання (стороннім двигуном), після чого до обмотки збудження випробовуваної машини підводився струм, що швидко нарастив до значення, що відповідає номінальному режиму. Майже в усіх дослідах включення струму збудження призводило до виникнення кругового вогню.

Таким чином, була показана можливість виникнення кругового вогню з одиничного спалаху між сусідніми колекторними пластинами. Цим і пояснюється те, що круговий вогонь на потужних електричних машинах виникає несподівано, без всяких попередніх ознак, що сильно утрудняє облаштування якого-небудь захисту від його виникнення.

На рисунку 1.9 приведені фотографії виникнення спалаху і переходу її в потужну дугу та далі у круговий вогонь. На рисунку 1.9, а (1500 кадрів на секунду), ілюструють процес запалювання дуги при спалаху.



а)



б)

Рисунок 1.9 – Кадри виникнення кругового вогню

На перших п'яти кадрах видно поступове, а на шостому і сьомому кадрах різке збільшення яскравості спалаху і кількості іонізованих газів. Це може бути пояснено тим, що елементарна дуга до даного моменту виділила так багато теплової енергії, що розплавлена мідь замкнула накоротко суміжні колекторні пластини, різко збільшився струм, що привело до бурхливого випаровування міді, тобто до своєрідного вибуху.

На рисунку 1.9, б показані кадри, що зафіксували розвиток кругового вогню з елементарної дуги між суміжними колекторними пластинами. Зйомка робилася із швидкістю 3800 кадрів в секунду, але в дрібнішому масштабі, так що на кадрі уміщається майже увесь простір між щіткотримачами. Перші кадри на рисунку 1.16, б дуже схожі з відповідними кадрами рисунку 1.16, а. Як і в першому випадку, елементарна дуга, що горить між суміжними пластинами, переміщаючись разом з колектором, залишає за собою факел іонізованих газів. Після того, як простір біля колектора став досить іонізованим, відбувається пробій і на кадрах 6, 7 і далі виразно видно ствол дуги, що охоплює значну частину колектора.

1.6 Безпечні параметри для ДПС

При розрахунку електричної машини постійного струму необхідно вибрати параметри машини так, щоб максимальна напруга між суміжними пластинами не перевершувала небезпечних меж. Статистичне визначення цих меж повинне базуватися на практиці експлуатації і експериментальних досліджень. Приклад таких досліджень це робота по вивченню схильності тягових двигунів тепловозів до виникнення кругового вогню. У цій роботі описані досліди із створенням штучного спалаху на колекторі тягових двигунів різних типів і модифікацій за описаною вище методикою [12,13].

Основні дані випробовуваних двигунів представлені в таблиці 1.2. За результатами дослідження можна зробити висновки:

1) напруга запалення дуги залежить від товщини ізоляції між пластинами; так, наприклад, при товщині ізоляції $\delta_{из} = 1,0$ мм спалаху виникають при напрузі приблизно 25 В, а при $\delta_{из} = 1,2$ мм – при напрузі 30... 32 В;

2) перехід спалаху в круговий вогонь залежить від ширини колекторних пластин: якщо $t_{кол} = 4,75$ мм, спалах переходить в круговий вогонь при $e_c = 29$ В, тоді як $t_{кол} = 8,35$ мм, то круговий вогонь не виникає навіть при $e_c = 44$ В (при такій самій товщині ізоляції $\delta_{из} = 1,0$ мм);

3) існує вплив часу горіння одиничної дуги на перехід спалаху в круговий вогонь, проте не такий однозначний, а в деяких випадках у машин з вузькими колекторними пластинами вплив взагалі малопомітний.

Таблиця 1.2 – Основні дані випробовуваних двигунів

Тип	$P_{ном}$, кВт	$U_{кол}$, кВ	$n_{ном} / n_{max}$, об/хв	$\delta_{из}$, мм
ЭД-104А	307	470	605/2480	1,0
ЭД-107А	305	463	580/2290	1,2
ЭДТ-200А	206	275	500/2200	0,8
ЭДТ-200А	206	275	500/2200	1,0

На підставі статистичного матеріалу експлуатації і експериментальних досліджень розроблені рекомендації на граничні значення максимальної напруги між суміжними пластинами (рисунок 1.11). Ці рекомендації відносяться до електричних машин потужністю більше 50 кВт. Для машин меншої потужності граничну напругу допустимо збільшувати до 50... 70 В.

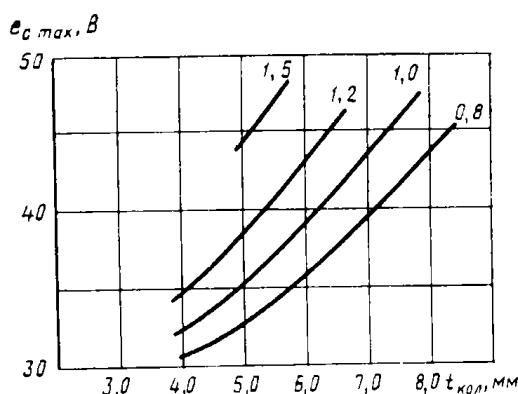


Рисунок 1.11– Рекомендовані граничні значення напруги між суміжними колекторними пластинами для $\delta_{из} = 1,5; 1,2; 1,0; 0,8$

У машинах дуже малої потужності одиничні спалахи можуть взагалі не призводити до кругового вогню і тоді спостерігається потенційне іскріння, коли містки з вугільного пилу перекриваються дрібними електричними дугами і згорають, не викликаючи серйозних ушкоджень колектора.

Необхідність обмеження максимальної напруги між суміжними колекторними пластинами примушує в машинах великої потужності обмежувати довжину якоря, що веде до збільшення їх габаритів і маси. Тому багато інженерів тавчені шукали і шукають засобу для підвищення граничних значень максимальної напруги між колекторними пластинами.

1.7 Дослідження кругового вогню

Процес зміни струму в дузі описується диференціальним рівнянням (математична модель процесу кругового вогню)

$$e_c = ir + L di / dt + \Delta u_\delta + U_{эл}, \quad (1.26)$$

де e_c – миттєве значення ЕРС секції;

r_c – активний опір секції;

Δu_δ – падіння напруги в стволі дуги;

$U_{эл}$ – біля електродне падіння напруги в електричній дузі.

З метою встановлення основних закономірностей горіння дуги була проведена серія дослідів на двох однорідних електродах [14]. Спочатку досліджувалася напруга на електричній дузі $u_\delta = \Delta u_\delta + U_{эл}$, між мідними електродами, виконаними у вигляді колекторних пластин. На рисунку 1.12 приведені залежності $u_\delta = \tau(i_\delta)$ для різних відстаней $\delta_{уз}$ між колекторними пластинами, при постійному струмі.

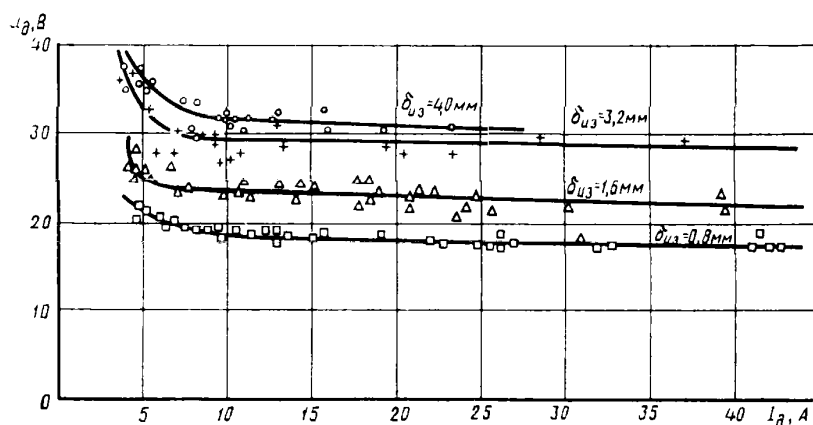


Рисунок 1.12– Залежність напруги на електричній дузі між мідними електродами (при постійному струмі) та від відстані між ними

З рисунку 1.12 бачимо, що при струмах до 15 А напруга на дузі сильно залежить від струму, зменшуючись зі збільшенням струму. При струмах більше 15 А ця залежність слабка і можна вважати напругу незалежною від струму.

2 ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДПС

2.1 Методи ідентифікації іскріння та кругового вогню в ДПС

Ідентифікація – визначення структури системи та її параметрів шляхом аналізу вхідних та вихідних функцій системи, або встановлення тотожності невідомого об'єкта відомому на підставі збігу ознак; розпізнавання.

Існують такі методи ідентифікації іскріння та кругового вогню: метод фотострумів, на виділенні радіоперешкод при іскрінні, спосіб індикації іскріння за методом додаткової щітки тощо [10-14].

Метод фотострумів: емісійний спектральний аналіз, фотометрія полум'я. Фотометрія полум'я зокрема іскріння, круговий вогонь являє собою різновид емісійного спектрального аналізу. Метод заснований на термічному порушенні атомів в полум'ї і прямому вимірі інтенсивності їх випромінювання за допомогою фотоелемента або фотопомножувача. Використовуючи монохроматор або відповідний світлофільтр, виділяють найбільш яскраву спектральну лінію.

При загальній оцінці методів емісійної спектроскопії необхідно, перш за все, відзначити їх низька межа виявлення, точність, швидкість виконання аналізів і універсальність.

У роботі [14] описується метод радіоперешкод сенс цього способу заснований на виділенні радіоперешкод. Принцип дії цього пристрою є таким, високочастотне випромінювання, обумовлене комутаційними процесами в випрямлячах системи збудження, створює синфазні сигнали в обох антенах здвоєною антени. У той же час випромінювання при іскрінні, що виникла на одній або декількох щітках, створює несинфазні сигнали в антенах, різниці сигнали яких посилюються диференціальним підсилювачем. У результаті, за рахунок підбору параметрів антен можна домогтися того, що сигнал перешкоди істотно пригнічується на виході диференціального підсилювача і сигнал на виході пристрою визначається практично тільки електромагнітним випромінюванням від іскріння щіток

Пристрій приведений на рисунку 2.1 має такі зв'язки: кожна з антен 1а і 1б

антенного пристрою 1 через буферні каскади 2 і 3 з'єднана з входом диференційного підсилювача 4, вихід якого підключений до входу підсилювача змінного струму 5, вихід підсилювача 5 підключається до входу мостового детектора 6, який, у свою чергу, через перетворювач сигналу 7 підключений до реле з регульованим порогом спрацьовування 8, контакти якого знаходяться в ланцюзі сигнального пристрою 9.

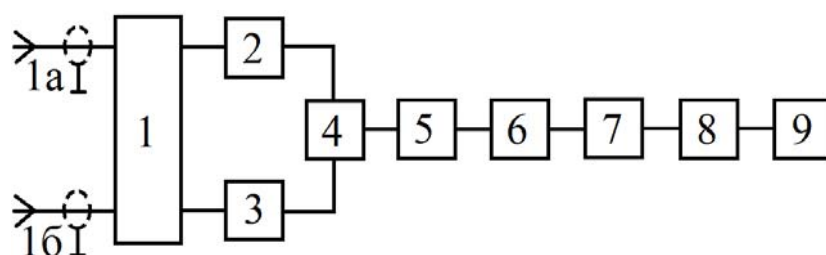


Рисунок 2.1 – Блок-схема пристрою

- 1– антенний пристрій, що містить антени 1а і 1б;
- 2, 3 –стабільні буферні каскади з високим вхідним опором;
- 4 –диференційний підсилювач зі змінним коефіцієнтом підсилення;
- 5 –двохкаскадний підсилювач змінного струму;
- 6 –мостовий детектор;
- 7 –перетворювач сигналу,
- 8 –реле з регульованим порогом спрацьовування;
- 9– сигнальний блок.

Пропонований пристрій випробувано в експлуатаційних умовах на генераторах ТВФ–120 і ТВВ–320. Сигнал про появу неприпустимого іскріння дає можливість оперативному персоналу швидко вжити необхідних заходів щодо усунення іскріння.

В[15] описано пристрій, що вимірює напругу під збігаючим краєм щітки і дозволяє отримати графік (потенційну криву), по виду якого можна робити якісні висновки про характер комутації. Для проведення цих вимірювань потрібна установка на колекторі додаткової (вимірювальної) щітки.

При комутації не завжди можна помітити іскріння, однак вона може супроводжуватися імпульсною напругою, значення якого досягає декількох десятків

вольт. Ця напруга збільшується при погіршенні комутації. Прилади, що вимірюють імпульсну напругу, дозволяють зіставити ступінь іскріння з нормами, наведеними в [16]. Для проведення цих вимірів потрібно встановити на колекторі додаткову щітку. Прилади дозволяють проводити дистанційні вимірювання, досліджувати динамічні режими роботи і мало схильні до зовнішнього впливу.

Існують також способи оцінки іскріння, засновані на вимірі фотоструму, на виділенні радіоперешкод при іскрінні, спосіб індикації іскріння по методу додаткової щітки, що не повною мірою підходять для вирішення завдання ідентифікації іскріння. Узагальнивши недоліки методів і пристрої ідентифікації іскріння, можна виділити декілька характерних особливостей, що не дозволяють їх використання для автоматизації процесу контролю іскріння та захисту двигуна при виникненні аварійного стану при експлуатації.

На підставі розгляду комутаційного процесу тягових електродвигунів постійного струму, в яких застосовуються розрізні щітки, було зроблено припущення про можливість виміру інтенсивності іскроутворення по величині додаткового струму комутації [12]. Для перевірки цього припущення проведено математичне моделювання комутаційного процесу.

Математична модель додаткового струму комутації розроблена на прикладі тягового електродвигуна постійного струму типу ТЛ2К1. Результати моделювання представлені на рисунку 2.2.

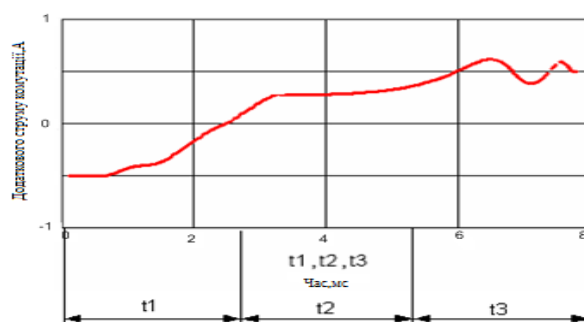


Рисунок 2.2 – Струм коматованої секції

Аналіз отриманих результатів показує, що величина додаткового струму безпосередньо залежить від ефектів само- і взаємоіндукції коматованих секцій і характеризує тип комутаційного процесу.

Для оцінки адекватності математичного моделювання проведений експеримент на фізичній моделі тягових електродвигунів (рис.2.3-2.5). Метою даних досліджень був вимір додаткового струму комутації (крива 2, рис. 2.3) і струму секції (крива 1, рис. 2.3), залежно від навантаження двигуна і типу комутаційного процесу. Інформативність сигналу оцінювалася шляхом визначення закономірностей зміни додаткового струму від зміни інтенсивності іскріння на колекторі, типу комутаційного процесу і форми струму секції.

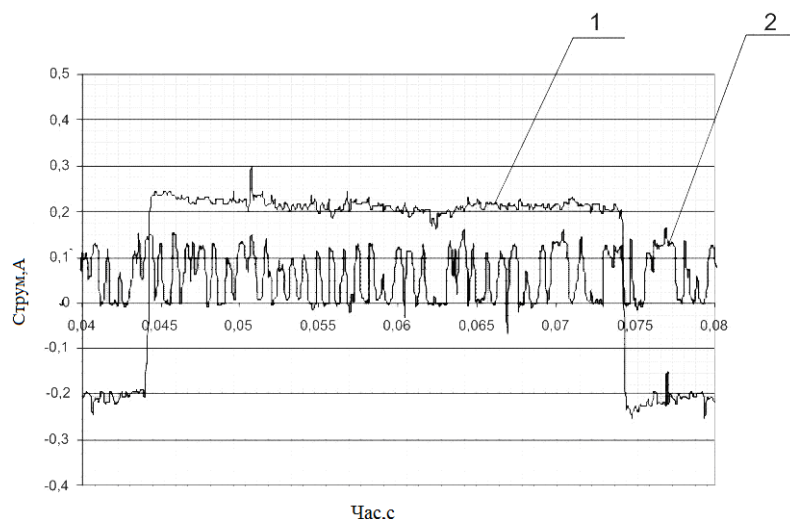


Рисунок 2.3 – Осцилограми струму секції і додаткового струму

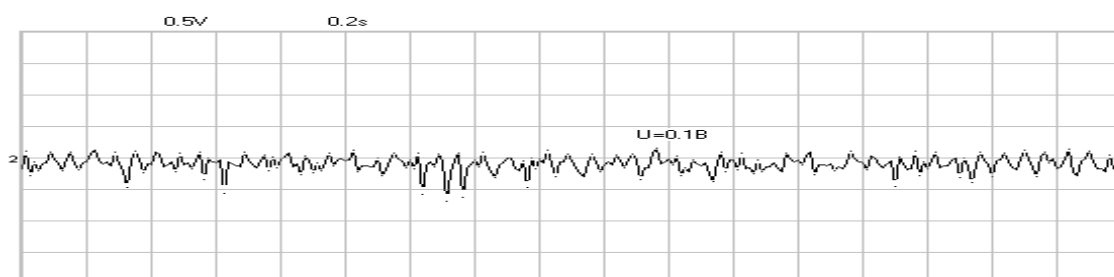


Рисунок 2.4 – Осцилограма додаткового струму. Іскріння відсутнє

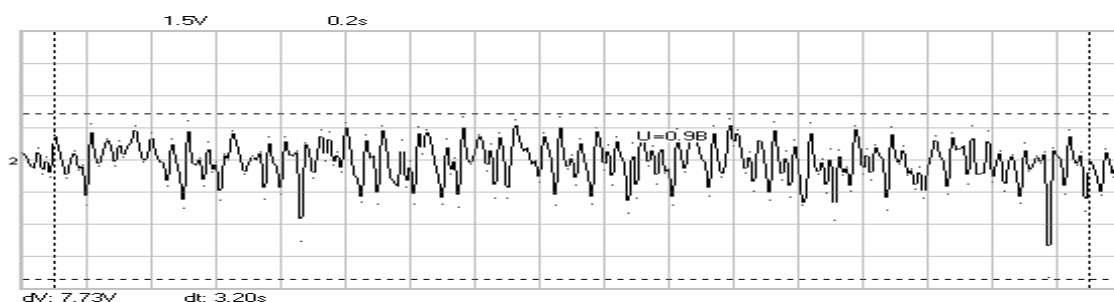


Рисунок 2.5 – Осцилограма додаткового струму. Іскріння 1,5 бали

Основою системи моніторингу (IBC) є пристрій контролю іскріння, що є спеціальним трансформатором струму, виконаним на тороїдальному осерді, з датчиком (штатні розрізні щітки); вимірювальний перетворювач (спеціальний трансформатор струму); система збору і обробки даних, яку розроблено на основі апаратних засобів компанії *National Instruments*. Це дорогий спеціалізований пристрій.

Моніторинг проводиться таким чином: трансформатори струму включаються в ланцюг щіток для виміру додаткового струму. Вони вмонтовуються на щіткотримач кожного ТЕД локомотиву, і за допомогою дротів з'єднуються з аналого-цифровим перетворювачем, чий виходи сполучені з ЕОМ, що має пристрій відображення інформації у вигляді монітора. Оскільки датчики є стандартними щітками у складі щітково-колекторних вузлів, вони відразу починають реєструвати додаткові струми розрізних щіток. Сигнали напруги, відповідний до величини цих струмів, поступає на АЦП, де оцифровуються, та у вигляді масиву миттєвих значень напруги поступають на ЕОМ. Обробка отриманих сигналів проводиться програмним забезпеченням на основі середовища LABVIEW 8.2. Після перетворень, масив є інформацією про іскріння в балах на кожному ТЕД. Ця інформація в реальному часі відображується у вигляді віртуальних приладів (рисунк 2.6). Для звіту після проведення комутаційних випробувань бальність іскріння представляється у вигляді кривих бальності іскріння в часі.

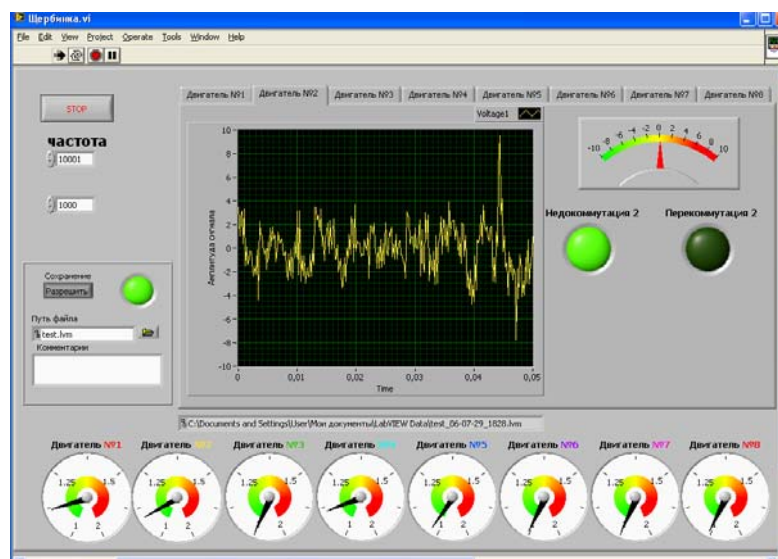


Рисунок 2.6 – Віртуальний прилад системи моніторингу іскріння

На рисунках 2.7, 2.8 показані результати роботи системи моніторингу іскріння при проведенні комутаційних випробувань у складі тягових вагон-лабораторій [20]. Сплеск іскріння (рис.2.8) пов'язаний із буксуванням ТЕД, в результаті чого двигуни були відключені і включені знову

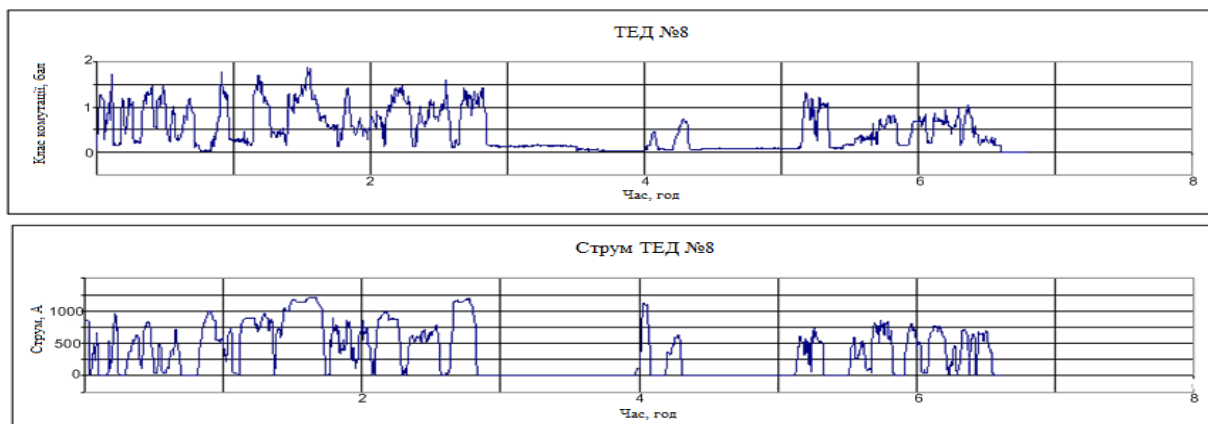


Рисунок 2.7 – Іскріння і струм якоря ТЕД електровоза 2ЭС5К

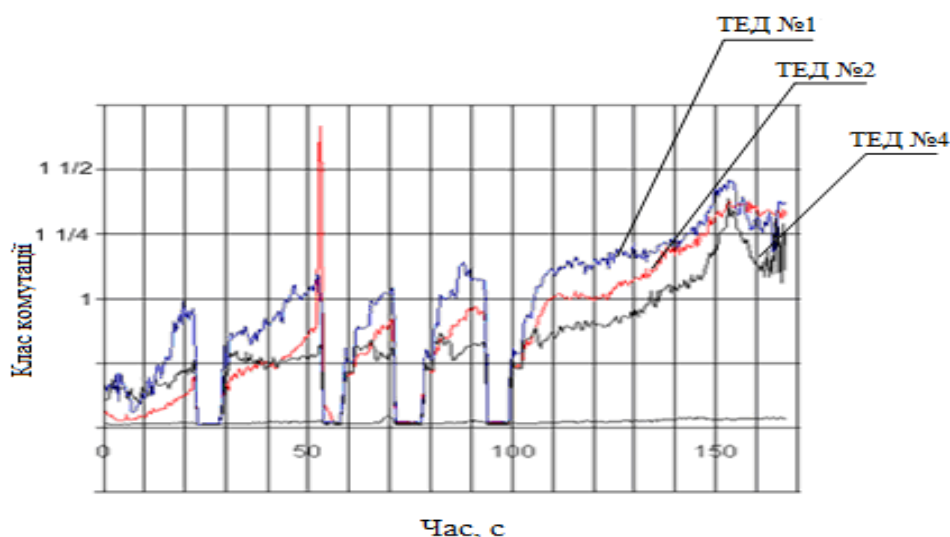


Рисунок 2.8 – Іскріння 4-х ТЕД електровоза ВЛ 11 при русанні з місця

2.2 Технічні вимоги проведення вимірювань в ІВС

За результатами проведеного аналізу можна говорити про необхідність розробки нової методики ідентифікації іскріння і кругового вогню колекторних машин постійного струму та її апаратної реалізації на основі датчику струму, що базується на ефекті Холла[17-18]. Технічні завдання, для вирішення яких

найчастіше використовуються датчики Холладосить широкі.

Умови експерименту по ідентифікації процесів іскріння та кругового вогню визначені згідно технічних умов, які обговорені у міждержавному стандарті [16]:

1. Номінальні дані електричних машин, що характеризують роботу машини, слід відносити до роботи машини на висоті до 1000 м над рівнем моря, температурі газоподібного середовища, що охолоджує, 40 °С і води, що охолоджує, 30 °С, якщо в стандартах або технічних умовах не встановлена інша температура води, що охолоджує, але не більше 33 °С.

2. Експеримент проводиться при таких номінальних даних: температура приміщення 22–24 °С, відносна вологість 40–50% і швидкість руху повітря не більше ніж 0,1 м/с, висота над рівнем моря – до 1000 м.

3. Номінальні значення кліматичних чинників зовнішнього середовища по [19], кліматичного виконання і категорії розміщення по [20] і група умов експлуатації по [21] електричних машин вказані в стандартах або технічних умовах на конкретні види машин.

Існують такі номінальні режими роботи електричних машин: тривалий (S1), короткочасний (S2), повторно–короткочасний (S3), повторно–короткочасний з частими пусками (S4), повторно–короткочасний з частими пусками і електричним гальмуванням (S5), переміжний (S6), переміжний з частими реверсами при електричному гальмуванні (S7), переміжний з двома або більш частотами обертання (S8). В експерименті по ідентифікації іскріння та кругового вогню двигун буде працювати у режимах:

1) Повторно–короткочасному (з тривалістю включення (ТВ) 15, 25, 40 і 60%; тривалість одного циклу приймають рівною 10 хв (якщо в стандартах або технічних умовах не встановлена інша); умовне позначення режиму S3 (рисунок 2.9,а).

Повторно–короткочасний номінальний режим роботи характеризується відносною (у відсотках) тривалістю включення ТВ, визначуваною по формулі:

$$ПВ = \frac{N}{N + R} \cdot 100, \quad (2.1)$$

де N – час роботи;

R – пауза.

Пускові втрати в цьому режимі роботи практично не роблять впливу на перевищення температури окремих частин машини.

2) Повторно–короткочасному з частими пусками (з тривалістю включення (ТВ) 15, 25, 40 і 60%; числом включень в годину 30, 60, 120 і 240 (якщо в стандартах або технічних умовах не встановлене інше) при коефіцієнті інерції $F1$ 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0; 6,3 і 10,0; умовне позначення S4 (рисунок 2.9,б).

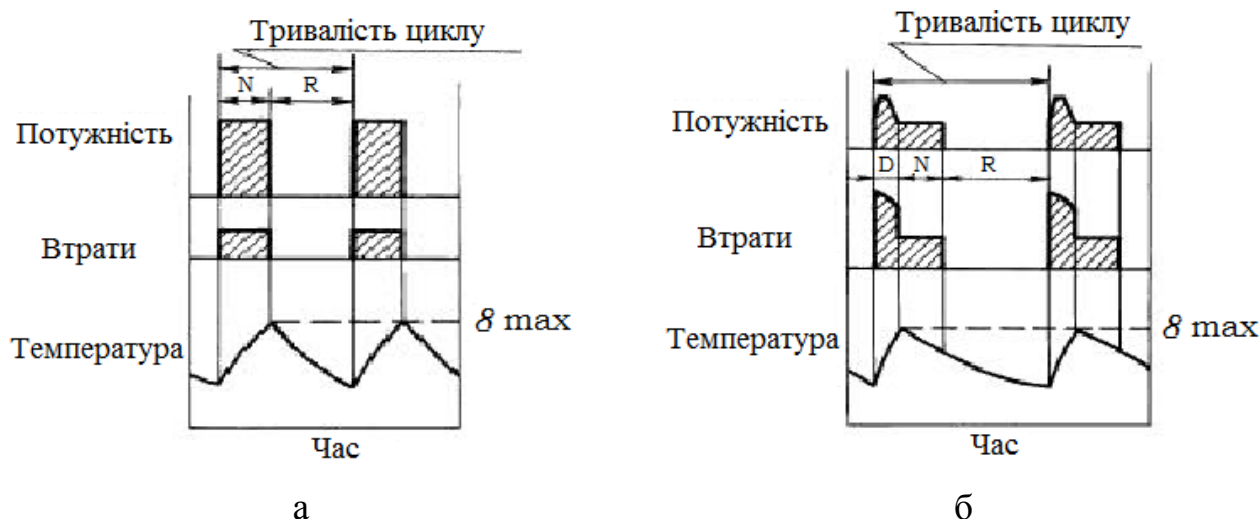


Рисунок 2.9 – Режими роботи ДПС в експерименті:

а) повторно-короткочасний; б) повторно-короткочасний з частими пусками

Повторно–короткочасний номінальний режим з частими пусками характеризується відносною (у відсотках) тривалістю включення, числом пусків в годину і коефіцієнтом інерції.

Тривалість включення визначається по формулі:

$$ТВ = \frac{D + N}{D + N + R} \cdot 100, \quad (2.2)$$

де D – час пуску;

N – час роботи;

R – пауза.

Електричні машини повинні без пошкоджень і залишкових деформацій витримувати наступні перевантаження по струму: машини постійного струму (окрім збудників з відношенням граничної напруги до номінальної напруги збудження більше 1,6) і колекторні машини змінного струму – перевантаження по струму на 50% протягом 1 хв; за узгодженням із споживачем допускається виготовлення машин з більшим перевантаженням по струму.

2.3 Вимірювальне обладнання

Схеми експерименту показані на рисунку 2.10, де іскріння отримуємо шляхом зниження магнітного поля в обмотках збудження 1 та 2 за допомогою збільшення опору R . Датчик струму приєднаний в ланцюзі якіру і передає інформацію про зміну струму якіру на осцилограф. На рисунку 2.10,б вимірюється напруга на щітці. Потім необхідна інформація зберігається в пам'яті осцилографа та передається для подальшої обробки в системі CAS та CAD[22].

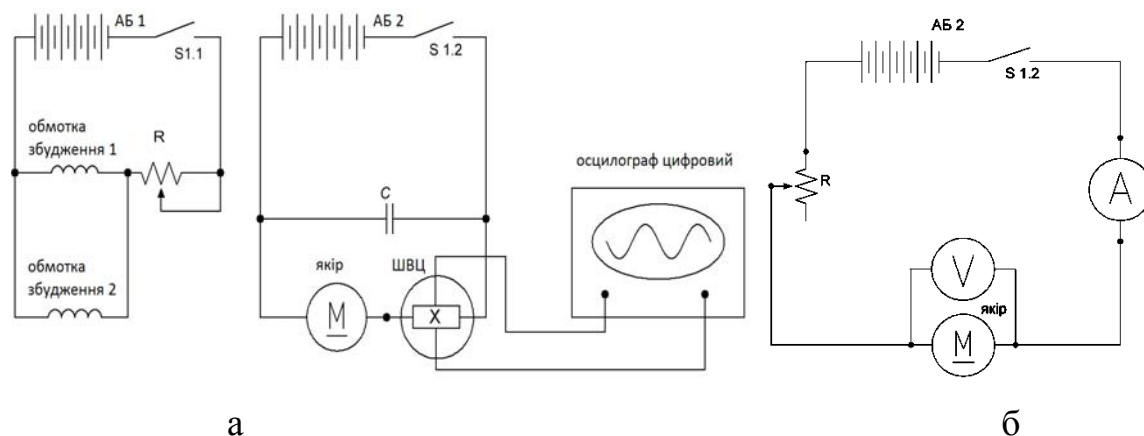


Рисунок 2.10 – Схема підключення вимірювального обладнання:

а) – схема вимірювання струму якіру, б) – схема вимірювання напруги щітки

2.3.1 Застосування датчику Холла в експерименті

Для задач даного дослідження лінійний датчик Холла використаний у складі

вимірника сили струму в межах від 3А до 50А. Взагалі межі вимірюваних струмів – від 0,25А до 10^3 А. Найважливішою гідністю таких датчиків є повна відсутність електричного зв'язку з вимірюваним ланцюгом. Лінійні датчики дозволяють вимірювати постійні і змінні струми, в тому числі струми досить високої частоти [17].

Інтегральні датчики магнітного поля в своїй більшості використовують ефект Холла (E. Hall). Ефект Холла полягає в наступному. Якщо провідник із струмом поміщений в магнітне поле, то виникає ЕРС, направлена перпендикулярно і струму, і полю. Ефект Холла ілюструється на рисунку 2.26. По тонкій пластині напівпровідникового матеріалу протікає струм i . За наявності магнітного поля на рухомі носії заряду (електрони) діє сила Лоренца. Ця сила скривлює траєкторію руху електронів, що приводить до перерозподілу об'ємних зарядів в напівпровідниковій пластині (рисунок 2.11).

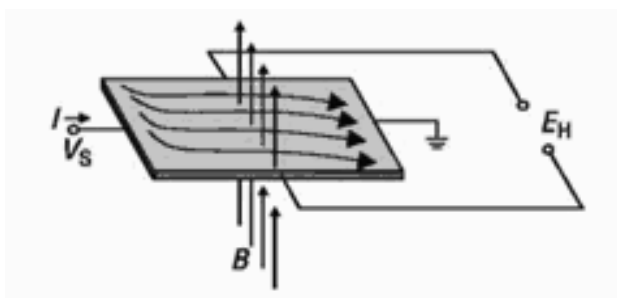


Рисунок 2.11 – Конструкція датчику струму

Внаслідок цього на краях пластини, паралельних напрямку протікання струму, виникає ЕРС, звана ЕРС Холла.

Ця ЕРС пропорційна векторному твору індукції B на щільність струму:

$$E_H = \frac{d}{q_n} [B \times j] \quad (2.3)$$

де d – ширина пластини;

q – заряд частки-носія;

n – концентрація носіїв.

При зниженні концентрації носіїв ЕРС, Холла зростає, тому в якості матеріал для датчиків Холла переважне використання таких напівпровідників, як кремній, арсенід галію і ін. Для прямокутної пластини з однорідними струмом і магнітним полем, направленими, як показано на рисунку 2.26, ця ЕРС дорівнює:

$$E_H = R_H V_S B, \quad (2.4)$$

де R_H – постійна Холла;

V_S – напруга, що створюється на виводах датчика Холла, що є струмопідвідними.

Для кремнію R_H складає величину порядку 70 мВ/(В Тл), тому, як правило, ЕРС датчика Холла потрібно підсилювати (рисунок 2.12).

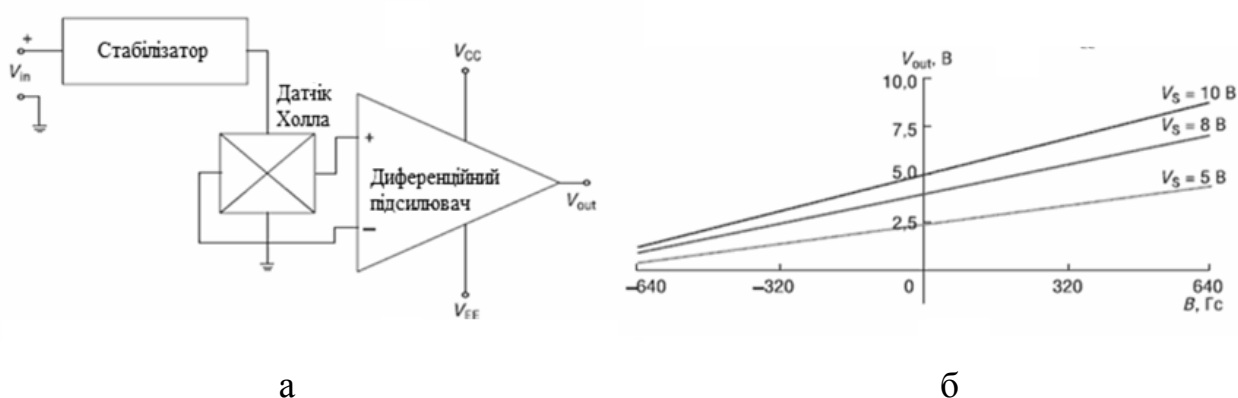


Рисунок 2.12 – Датчик Холла:

а – структурна схема; б – залежність напруги від індукції

Якщо лінійний датчик Холла розташований поблизу провідника із струмом, то вихідна напруга датчика пропорційна індукції магнітного поля, що оточує провідник. Величина індукції, у свою чергу, пропорційна струму. У простому випадку датчик струму є конструкцією, в якій датчик Холла встановлюється біля дроту, по якому тече вимірюваний струм. Такі датчики використовуються для виміру великих струмів, особливо у лініях електропередач. Індукція B визначається по формулі:

$$B = 2 \times 10^{-7} \frac{I}{r} [T], \quad (2.5)$$

де r – відстань від центру чутливої області датчика до осі симетрії провідника.

На рисунку 2.13 представлено датчик струму 3144E HallSensorsModule [18].



Рисунок 2.13 – Конструкція датчику струму 3144E HallSensorsModule

Чутливість датчика струму може бути значно збільшена шляхом використання концентратора магнітного потоку у вигляді магнітопроводу з прорізом, в який поміщається лінійний датчик Холла (рисунки 2.14).

В цьому випадку індукція магнітного потоку через датчик:

$$B = 12,57 \times 10^{-7} \frac{IN}{d}. \quad (2.6)$$

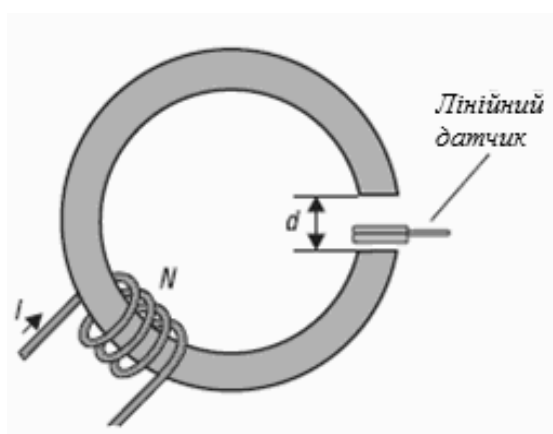


Рисунок 2.14 – Конструкція датчику струму з магнітопроводником

2.4 Результати експерименту

Вибір осцилограм, що характеризують діагностичні параметри, і, в тому числі, пульсації напруги між щітками у справних і несправних електричних машин, представлений на рисунках 2.15–2.19. Встановлено, що миттєве значення пульсацій напруги між щітками розподілені по нормальному закону, а дисперсії можуть суттєво відрізнятися в залежності від наявності та характеру несправностей [23]. Так, у справних і несправних електричних машин малої потужності відмінність осцилограм пульсацій напруги між щітками на 95% носить не випадковий характер, а залежить від дефекту двигуна. У електродвигуна НБ 418К6 аналогічна ймовірність менше і склала 76%. На підставі цього можна стверджувати, що наявність несправностей можна визначати шляхом імовірнісного та статистичного аналізу результатів діагностичного тесту. Особливо це прийнятно для електричних машин малої потужності.

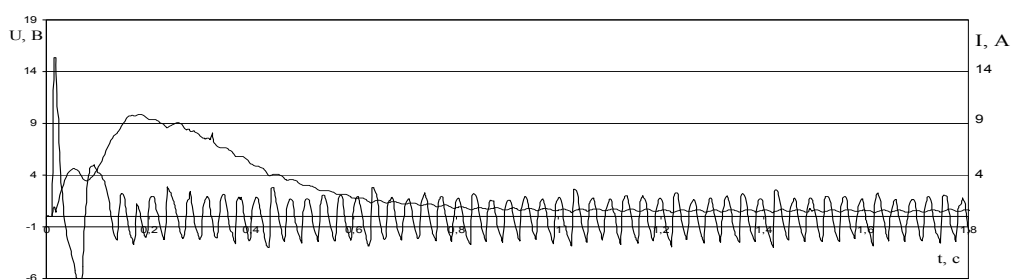


Рисунок 2.15 – Осцилограми змінної складової напруги на щітках різної полярності і струму справного двигуна, отримані при його пуску

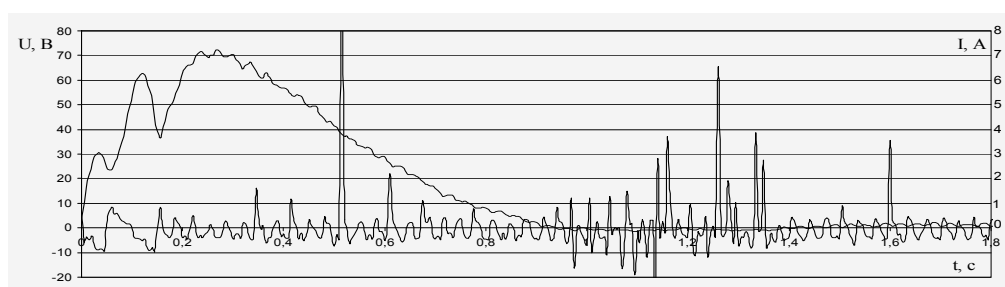


Рисунок 2.16 – Осцилограми змінної складової напруги на щітках різної полярності та струму двигуна зі зрушенням щіток щодо нейтралі, отримані при його пуску

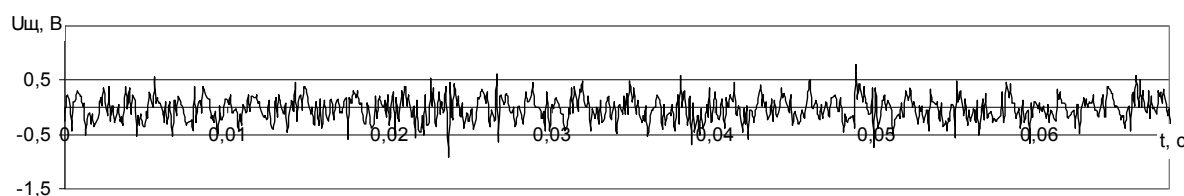


Рисунок 2.17 – Осцилограма змінної складової напруги, отриманої зі щіток різної полярності справного ТЕД НБ-418К6

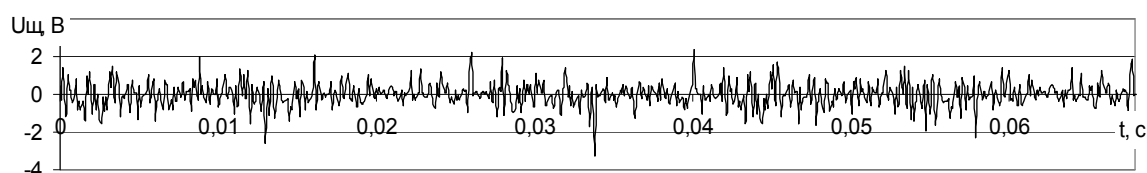


Рисунок 2.18 – Осцилограма змінної складової напруги, отриманої зі щіток різної полярності несправного ТЕД НБ-418К6 (зрушення щіток з нею-трали на 9 мм.)

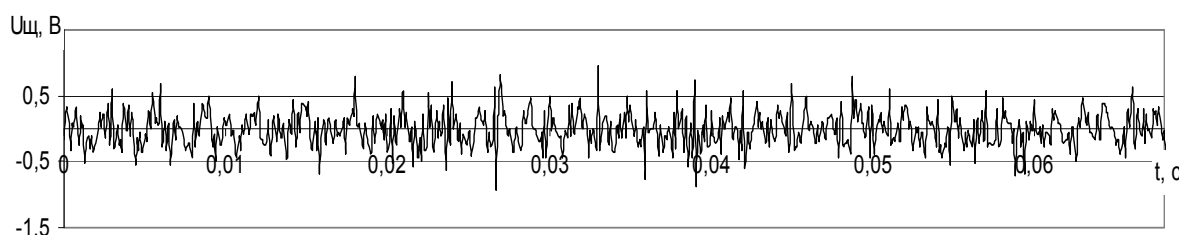


Рисунок 2.19 – Осцилограма змінної складової напруги, отриманої зі щіток різної полярності несправного ТЕД НБ-418К6 (нерівність колектора)

Бачимо на осцилограмах пульсацій напруги між різнополярними щітками ТЕД НБ-418К6, отриманих при проведенні діагностичного тесту (рисунки 2.20, 2.21).

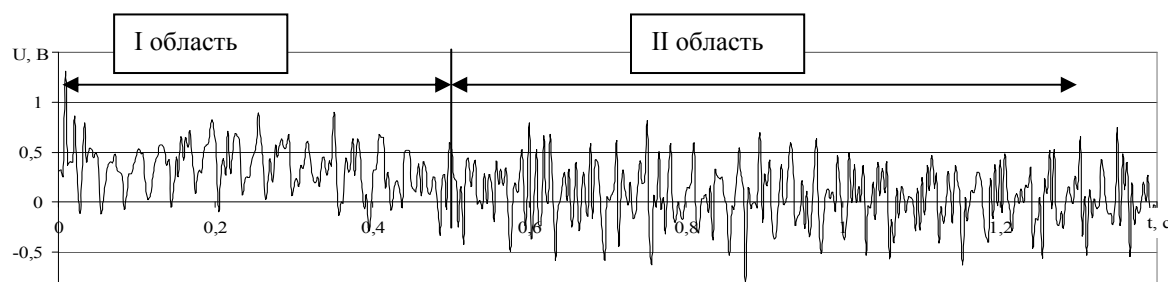


Рисунок 2.20 – Змінна складова напруги, отриманого зі щіток раз-особистої полярності U при пуску несправного тягового електродвигуна НБ 418К6 («механічний» дефект) на холостому ходу

З рисунку 2.20 («механічний» дефект) випливає, що амплітуда пульсацій напруги, отриманого зі щіток різної полярності більше в зоні високої швидкості обертання (II область) і менше при низькій швидкості обертання двигуна (I область).

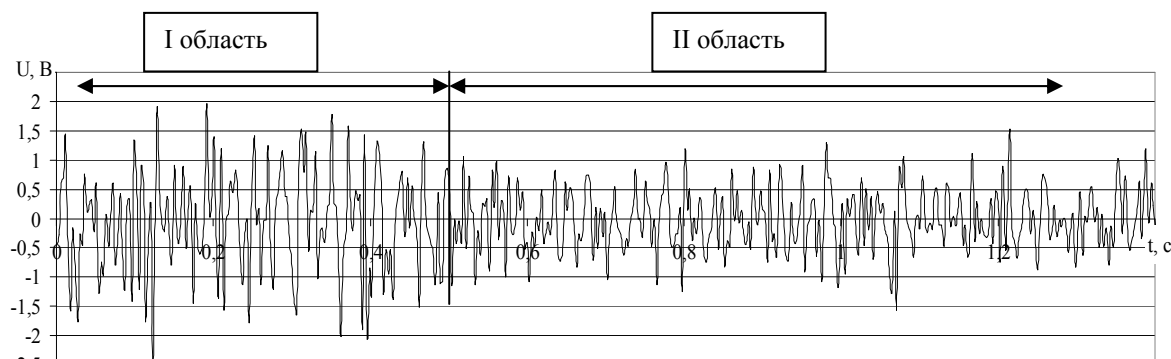


Рисунок 2.21 – Змінна складова напруги, отриманого зі щіток раз-особистої полярності U при пуску несправного тягового електродвигуна НБ 418К6 (зрушення щіток щодо нейтралі) на холостому ході

З рисунку 2.21 (електромагнітний дефект) помітна зворотна картина: амплітуди пульсацій напруги на колекторі менше в зоні високої швидкості обертання і більше при низькій швидкості обертання двигуна. Даний факт дозволяє проводити розділення дефектів тягового електродвигунів на «механічні» і «електромагнітні» використовуючи методи вейвлет – перетворень.

Отримані характеристики після спектрального аналізу використовують в ІВС для моніторингу стану ДПС.

3 МАТЕМАТИЧНЕ ТА МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІВС

Математичний аналіз осцилограм, отриманих за схемами і методиками вимірювань, розроблених у другому розділі, пропонується виконувати на базі спектрального аналізу, зокрема шляхом побудови спектру, визначення автокореляції та кореляції сигналу за допомогою вейвлет–перетворення [24]. Можливості для такого аналізу є в системах CAS [25] та ECAD [26].

Розглянемо ці інструменти аналізу більш детально.

3.1 Можливості спектрального аналізу в MatLab

Засоби пакету SignalProcessing[27,28] для проведення спектрального аналізу в програмі MatLab приведені у таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Засоби SignalProcessing

Назва засобу для аналізу	Елементи пакету SignalProcessing
Функції для роботи з комплексними числами	- обчислення модуля комплексного числа – <i>abs</i>; - обчислення фази комплексного числа – <i>angle</i>; - групування комплексних чисел – <i>cplxpair</i>.
Способи моделювання сигналів	- використання генератора випадкових чисел; - генерація простих сигналів за допомогою вбудованих функцій MatLab; - косинусоїда зі змінною частотою – <i>chirp</i>; - функція Дирихле – <i>diric</i>; - синусоїда, модульована функцією Гаусса – <i>gauspuls</i>; - генерація моноімпульса Гаусса – <i>gmonopuls</i>; - генерація імпульсних сигналів різної форми – <i>pulstran</i>; - генерація пилоподібного або трикутного коливання – <i>sawtooth</i>; - функція зворотного перетворення Фур'є для прямокутного імпульса вистотою 1 та шириною 2π – <i>sinc</i>; - генерація прямокутних імпульсів – <i>square</i>; - генерація періодичних трикутних імпульсів – <i>tripuls</i>; - використання джерела, керованого напругою (тобто косинусоїдний сигнал з частотною модуляцією) – <i>vco</i>.

Продовження табл.3.1

Назва засобу для аналізу	Елементи пакету SignalProcessing
Методи розрахунку FFT	- пряме і зворотне одновірне FFT – <i>fft</i> і <i>ifft</i>; - перегруповання вихідного масиву перетворення Фур'є – <i>fftshift</i>; - матриця ДПФ – <i>dftmtx</i>; - пряме та зворотне двовірне FFT – <i>fft2</i> і <i>ifft2</i>.
Спеціальні види перетворення сигналів	- пряме дискретне косинусне перетворення – <i>dct</i>; - зворотне дискретне косинусне перетворення – <i>idct</i>; - Z-перетворення за спіральним контуром – <i>czt</i>; - перетворення Гільберта – <i>Hilbert</i>.
Кепстральний аналіз (спектральний аналіз другого порядку)	- комплексний кепстр дійсної послідовності – <i>cseps</i>; - дійсний кепстр і мінімально-фазова реконструкція – <i>rseps</i>; - зворотній комплексний кепстр – <i>icseps</i>.
Засоби візуалізації спектра сигналів	- побудова періодограм – <i>periodogram</i> (періодограма – це залежність спектральної щільності дБ/Вт від частоти); - побудова графіків спектральної щільності – <i>psdplot</i>; - побудова спектрограм (для візуалізації FFT) – <i>specgram</i>.
Функції для зміни частоти дискретизації сигналів	- децимація (зменшення частоти дискретизації сигналів у задане число разів) – <i>decimate</i>; - інтерполяція сигналів (обчислення значень сигналу в проміжках між його відліками) – <i>interp</i>; - раціоналізація зміни частоти дискретизації (дозволяє задати зміну частоти дискретизації в p/q раз, де p і q – цілі числа) – <i>resample</i>.
Модуляція та демодуляція сигналів	- створення модульованих сигналів – <i>modulate</i>; - демодуляція сигналів – <i>demon</i>; - пофрагментне виведення сигналів – <i>strip</i>.
Статистика сигналів	- оцінка квадрату модуля функції когерентності двох сигналів – <i>cohere</i>; - взаємна PSD двох сигналів – <i>csd</i>; - обчислення кореляційної і коваріаційної матриць – <i>corrcoef</i> і <i>cov</i>; - взаємна кореляційна функція – <i>xcorr</i> і <i>xcov</i>; - оцінка матриці автокореляції – <i>corrmtx</i>; - взаємна коваріаційна функція – <i>xcov</i>.
Функції завдання вікон	- Бартлетта – <i>bartlett</i>; – Блекмана – <i>blackman</i>; - Чебишева – <i>chebwin</i>; – Хеммінга – <i>hamming</i>; - Хеннінга – <i>hanning</i>; – Кайзера – <i>kaizer</i>; - трикутне вікно – <i>triang</i>; – прямокутне вікно – <i>boxcar</i>.

3.2 Вейвлет – аналіз в CAS

CAS (ComputerAlgebraSystem) – системи комп'ютерної алгебри, до цього класу програм відносяться: MathCAD, MatLab, Mathematica та Maple [25].

Аналітика вейвлетного перетворень сигналів визначаються математичної базою розкладання сигналів, яка аналогічна перетворенням Фур'є. Основною відмінною особливістю вейвлет–перетворень є новий базис розкладання сигналів – вейвлетні функції. Властивості вейвлетів принципово важливі як для самої можливості розкладання сигналів за одиничними вейвлет–функціями, так і для цілеспрямованих дій над вейвлетними спектрами сигналів, в тому числі з подальшою реконструкцією сигналів за обробленими вейвлетними спектрами.

Вейвлети можуть бути ортогональними, полуортогональними, біортогональними. Вейвлетні функції можуть бути симетричними, асиметричними і несиметричними, з компактною областю визначення і без неї, а також мати різну ступінь гладкості. Деякі функції мають аналітичний вираз, інші швидкий алгоритм обчислення вейвлет–перетворення. Для практики бажано мати ортогональні симетричні і асиметричні вейвлети, але таких ідеальних вейвлетів не існує. Найбільше застосування знаходять біортогональні вейвлети.

Базисними функціями вейвлет–перетворень можуть бути функції з компактим носієм: модульовані імпульсами синусоїди, функції зі стрибками рівня і т.п. Вони забезпечують гарне відображення і аналіз сигналів з локальними особливостями, в тому числі зі стрибками, розривами і перепадами значень з великою крутизною та нестационарні процеси.

Слід розрізняти вейвлети по цільовим завданням вейвлетних перетворень з позицій декомпозиції та реконструкції сигналів. Бажано мати таке вейвлет–перетворення сигналів, яке забезпечувало б повну інформаційну еквівалентність вейвлетного спектру сигналів – його часовому поданню, і, відповідно, однозначність як декомпозиції сигналів, так і їх реконструкції з вейвлетних спектрів. Однак це можливо тільки при використанні ортогональних і біортогональних вейвлетів.

Для якісного аналізу сигналів і локальних особливостей в сигналах може застосовуватися більш велика номенклатура вейвлетних функцій, які хоча і не забезпечують реконструкцію сигналів, але дозволяють оцінити інформаційний зміст сигналів і динаміку зміни цієї інформації.

До таких вейвлетів відносяться локалізовані функції, які конструюються з одного материнського вейвлета (t) (або з якоїсь іншої незалежної змінної) шляхом операцій зсуву по аргументу (параметр b) і масштабної зміни (параметр a):

$$\psi_{ab}(t) = (1/\sqrt{|a|}) \psi((t-b)/a), (a, b) \in \mathbb{R}, \psi(t) \in L^2(\mathbb{R}), \quad (3.1)$$

де множник $(1/\sqrt{|a|})$ забезпечує незалежність норми функцій від масштабного числа ' a '.

Безперервне вейвлет–перетворення сигналу $s(t)$, яке застосовується для якісного частотно–часового аналізу, за змістом відповідає перетворенню Фур'є з заміною гармонійного базису $(-j\omega t)$ на вейвлетний $\psi((t-b)/a)$:

$$C(a, b) = \langle s(t), \psi_{ab}(t) \rangle = (1/\sqrt{|a|}) \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi((t-b)/a) dt, (a, b) \in \mathbb{R}, a \neq 0. \quad (3.2)$$

Таким чином вейвлетний масштабно–часовий спектр $C(a, b)$ на відміну від Фур'є – спектра є функцією двох аргументів: масштабу вейвлета ' a ' (в одиницях, зворотних частоті), і часового зсуву вейвлета за сигналом ' b ' (в одиницях часу), при цьому параметри ' a ' і ' b ' можуть приймати будь–які значення в межах областей їх визначення. На рисунку 3.1 наведені приклади найпростіших неортогональних вейвлетів парного (*Mhat*) і непарного (*Wave*) типів. Для кількісних методів аналізу (декомпозиція сигналів з можливістю подальшої лінійної реконструкції сигналів з оброблених вейвлет–спектрів) в якості вейвлетного базисів можна використовувати будь–які локалізовані функції $\psi(t)$, якщо для них існують функції – двійники $\psi^\#(t)$, такі, що сімейства $\{\psi_{ab}(t)\}$ і $\{\psi^\#_{ab}(t)\}$ можуть утворювати парні базиси функціонального простору $L^2(\mathbb{R})$ [25].

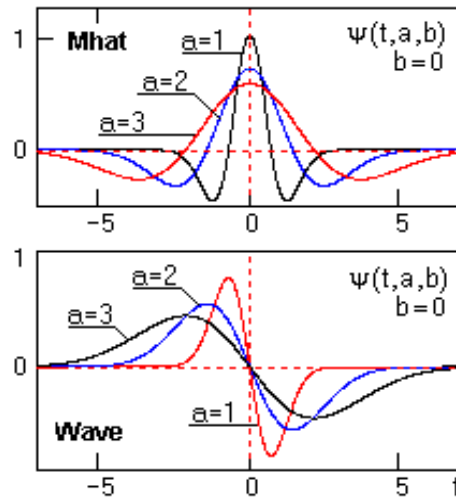


Рисунок 3.1 – Вейвлети Mhat та Wave

Вейвлети, визначені таким чином, дозволяють представити будь-яку довільну функцію в просторі $L^2(R)$ у вигляді ряду:

$$s(t) = \sum_{a,b} C(a,b) \psi_{ab}^{\#}(t), (a, b) \in I, \quad (3.3)$$

де коефіцієнти $C(a, b)$ – проєкції сигналу на вейвлетний базис простору, які визначаються скалярним перетворенням:

$$C(a,b) = \langle s(t), \psi_{ab}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{ab}(t) dt. \quad (3.4)$$

Якщо вейвлет $\psi(t)$ має властивість ортогональності, то $\psi^{\#}(t) \equiv \psi(t)$ і вейвлетний базис – ортогональний. Вейвлет може бути неортогональним.

Результатом вейвлет–перетворення одновимірного чисельного ряду (сигналу) є двовимірний масив значень коефіцієнтів $C(a, b)$. Розподіл цих значень у просторі (a – часовий масштаб, b – часова локалізація), дає інформацію про зміну в часі відносного внеску в сигналі вейвлетних компонент різного масштабу і називається спектром коефіцієнтів вейвлет–перетворення, масштабно–часовим (частотно–часовим) спектром або просто вейвлет – спектром (waveletspectrum).

Спектр $C(a, b)$ одновимірного сигналу являє собою поверхню в тривимірному

просторі. Способи візуалізації спектру можуть бути самими різними. Найбільш поширений спосіб – проекція на площину ab ізолініями (ізорівнями), що дозволяє простежити зміни коефіцієнтів на різних масштабах в часі, а також виявити картину локальних екстремумів цих поверхонь ("пагорбів" і "западин"), так званий "скелет" (skeleton) структури аналізованого процесу. При широкому діапазоні масштабів застосовуються логарифмічні координати ($\log a, b$). Приклад вейвлет спектру найпростішого сигналу при його розкладанні вейвлетом *Mhat* наведено на рисунку 3.2. [25].

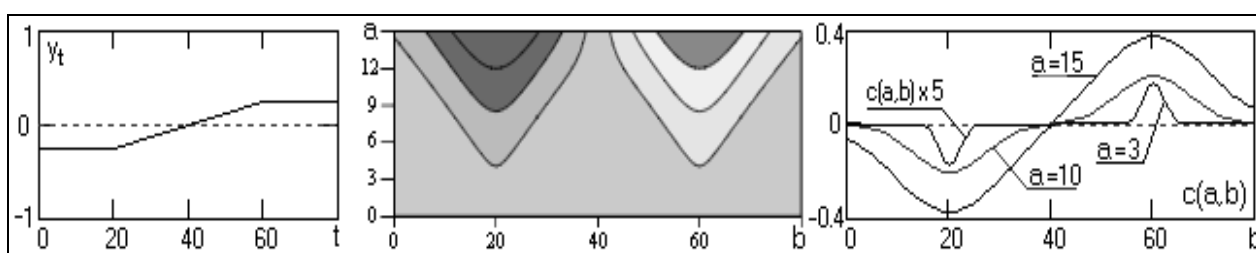


Рисунок 3.2 – Сигнал, вейвлетний Mhat-спектр, масштабного перерізу спектру.

По вертикальних перетинах (перетинах зсуву b) вейвлет-спектр відображає компонентний склад сигналу (з даного комплексу вейвлетів) у кожний поточний момент. За змістом перетворення, як скалярного добутку сигналу з вейвлету, ясно, що значення коефіцієнтів у кожній поточній часовій точці по масштабних перетинах тим більше, чим сильніше кореляція між вейвлетом даного масштабу і поведінкою сигналу в околицях цієї точки. Відповідно, переріз по параметру 'a' демонструє зміни в сигналі компоненти даного масштабу 'a' з часом.

Вейвлетні складові сигналу в перетинах його спектру не мають нічого спільного з синусоїдами.

Вибір вейвлета для аналізу визначається тим, яку інформацію необхідно отримати з сигналу. З урахуванням характерних особливостей різних вейвлетів у часовому і у частотному просторі, можна виявляти в аналізованих сигналах ті чи інші властивості та особливості, які непомітні на графіках сигналів, особливо в присутності шумів, як це є у випадку осцилограми струму якіра ДПС. При цьому завдання реконструкції сигналу не ставиться, що розширює сімейство

використовуваних регулярних вейвлетних функцій, в тому числі неортогональних. Більше того, вейвлет може конструюватися безпосередньо під ту локальну особливість в сигналі, яка підлягає виділенню або виявленню, якщо її форма апіорно відома.

При аналізі сигналів вейвлетами парного типу (симетричними або близькими до симетрично) гармонійним сигналам зазвичай відповідають яскраві горизонтальні смуги вейвлетних піків і западин на домінуючих частотах вейвлетів, що збігаються з частотою гармонік сигналів. Порушення гладкості сигналів фіксуються вертикальними смугами, піки в сигналах виділяються максимумами, а западини – мінімумами вейвлетних коефіцієнтів. Навпаки, вейвлети непарного типу більш різко реагують на скачки і швидкі зміни в сигналах, зазначаю їх максимумами, або мінімумами залежно від знаку диференціалів. Чим різкіше виражені особливості сигналів, тим сильніше вони виділяються на спектрограмах.

Для конструювання таких вейвлетів часто використовуються похідні функції Гаусса, які мають найкращу локалізацію як в часовій, так і в частотній областях. У загальній формі рівняння базового вейвлета:

$$\psi_n(x) = (-1)^{n+1} d^n [\exp(-x^2/2)] / dx^n, n \geq 1, \quad (3.5)$$

Рівняння базових вейвлетів для перших чотирьох похідних:

$$\psi_1(x) = -x \exp(-x^2/2), \psi_2(x) = (1-x^2) \exp(-x^2/2), \quad (3.6)$$

$$\psi_3(x) = (3x-x^3) \exp(-x^2/2), \psi_4(x) = (-4x^4+6x^2-3) \exp(-x^2/2), \quad (3.7)$$

Рівняння нормованих базисів для часових сигналів:

$$\psi(t, a, b) = (K_n/\sqrt{2}) \psi_n(x), x=(t-b)/a, K_1=1.062, K_2=0.867, K_3=0.548, K_4=0.293.$$

Для звуження базової форми вейвлетів застосовується також спрощена форма:

$$\psi_n(x) = (-1)^{n+1} d^n [\exp(-x^2)] / dx^n, n \geq 1, \quad (3.8)$$

Зокрема, МНАТ-вейвлет (Mexicanhat- мексиканський капелюх) обчислюється за другою похідною ($n = 2$), його наведено на рисунку 3.5. Вейвлет симетричний, спектр вейвлета представлений тільки речовинною частиною і добре локалізований за частотою, нульовий і перший моменти вейвлета дорівнюють нулю. Застосовується для аналізу складних сигналів. Рівняння вейвлета по (3.8):

$$W(a, b, t) = \int_0^T \left\{ U_{\sim}(t) |a|^{-1/2} \left[e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-b}{a} \right)^2} - 0,5 e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-b}{a} \right)^2} \right] \right\} dt$$

$$= \frac{1,031}{\sqrt{2}} \left\{ \exp \left[- \left(\frac{t-b}{a} \right)^2 \right] - 2 - \left(\frac{t-b}{a} \right)^2 \cdot \exp \left[- \left(\frac{t-b}{a} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.9)$$

де t – час;

b – величина зміщення вейвлета по осі часу;

a – масштаб (величина розтягування вейвлета);

T – тривалість тесту;

$U_{\sim}$ – досліджуваний сигнал.

На рисунку 3.3 наведено приклад використання вейвлета для аналізу складного сигналу $y(t)$. Модель сигналу утворена сумою сигналів різної структури. Сигнали y_1 – y_2 представляють функції Гаусса різного масштабного рівня, сигнал y_3 – прямокутний імпульс, сигнал y_4 заданий у вигляді тренду з постійним значенням диференціала. На контурному графіку вейвлет-коефіцієнтів можна бачити виділення всіх трьох основних структур сигналу при повному винятку тренда. Особливо чітко виділяються кордони стрибків прямокутної структури.

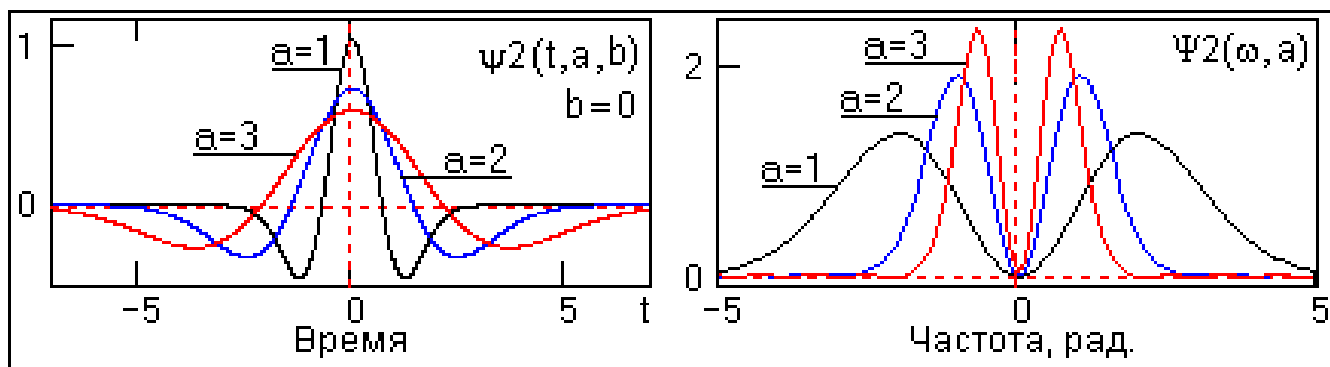


Рисунок 3.3 – Вейвлет МНАТ

Праворуч на рисунку 3.4 наведена повна тривимірна картина вейвлет–перетворення. Вейвлет широко використовується в двовимірному варіанті для аналізу ізотропних полів.

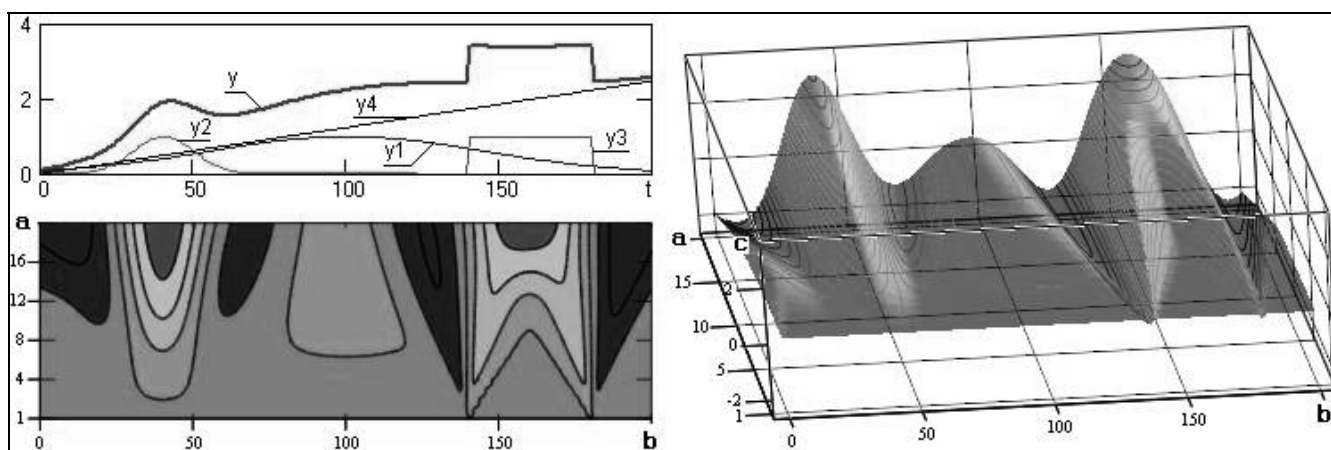


Рисунок 3.4 – Тривимірна картина вейвлет–перетворення

Для аналізу струму якіра можна також використовувати вейвлети Добеші.

Для побудови вейвету Добеші використовують вейвлет–рівняння [25]:

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum h_k \phi(2t - k); \quad (3.10)$$

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \phi(2t - k). \quad (3.11)$$

Компактність носія функцій ϕ і ψ може бути досягнута, якщо буде вибрано кінцеве число $h_n \neq 0$ таким чином, щоб була досягнута ортогональність і гладкість вейвлета, або щоб виконувалася умова моментів. Для області Фур'є умова ортогональності та гладкості виглядає наступним чином:

$$|m_0(\omega)|^2 + |m_0(\omega + \pi)|^2 = 1, \quad (3.12)$$

де $|m_0(\omega)| = \sum_n \frac{h_n e^{-in\omega}}{\sqrt{2}}$ – тригонометричний поліном;

за умови моментів: $\left. \frac{d^l \psi \omega}{d\omega^l} \right|_{\omega=0} = 0$, для $l = 0, 1, \dots, N-1$,

приймаючий вигляд: $m_0(\omega) \propto \left(\frac{1 + e^{i\omega}}{2} \right)^N$.

Якщо покласти, що

$M_0(\omega) = |m_0(\omega)|^2$ – поліном по $\cos(\omega)$, то умова нульових моментів дає:

$$M_0(\omega) = \cos^{2N} \left(\frac{\omega}{2} \right) L(\omega), \quad (3.13)$$

де $L(\omega) = P \sin^2 \frac{\omega}{2}$ – поліном по $\cos(\omega)$.

Для пошуку коефіцієнтів h_n необхідно отримати m_0 , виділивши форму полінома P . З умови ортогональності та умови нульових моментів випливає, що

$$P(y) = (1-y)^{-N} (1 - y^N P(1-y)). \quad (3.14)$$

Розклавши $(1-y)^{-N}$ до порядку $1-N$, отримаємо явний вигляд полінома:

$$P(y) = (1-y)^{-N} (1 - y^N P(1-y)) = \sum_{k=0}^{N-1} \left(\frac{N+k-1}{k} \right) y^k. \quad (3.15)$$

Шляхом спектрального розкладання на множники можна отримати корінь:

$$m_0(\omega) = \text{const} \left(\frac{z+1}{2} \right)^n \prod_{j=1}^{N-1} (z - z_j) \quad (3.16)$$

Шукані коефіцієнти вейвлета $\frac{h_j}{\sqrt{2}}$ будуть коефіцієнтами при z^j .

Також для побудови вейвлетів даного типу використовується каскадний алгоритм. Він дозволяє поточно будувати функцію φ , масштабуючи по відомим коефіцієнтам. На кожному кроці алгоритму функція φ уточняється по осі t в 2 рази. Далі при необхідності застосовується згладжування φ . Після цього знаходиться функція самого вейвлета ψ .

При підвищенні номеру похідної функції (3.8) часова область визначення вейвлета дещо збільшується при істотному підвищенні домінуючої частоти вейвлета і ступеня його локалізації в частотній області [25].

Вейвлети n -го порядку дозволяють аналізувати більш тонкі високочастотні структури сигналів, пригнічуючи низькочастотні компоненти. Приклад вейвлета по восьмій похідній наведено на рисунку 3.5.

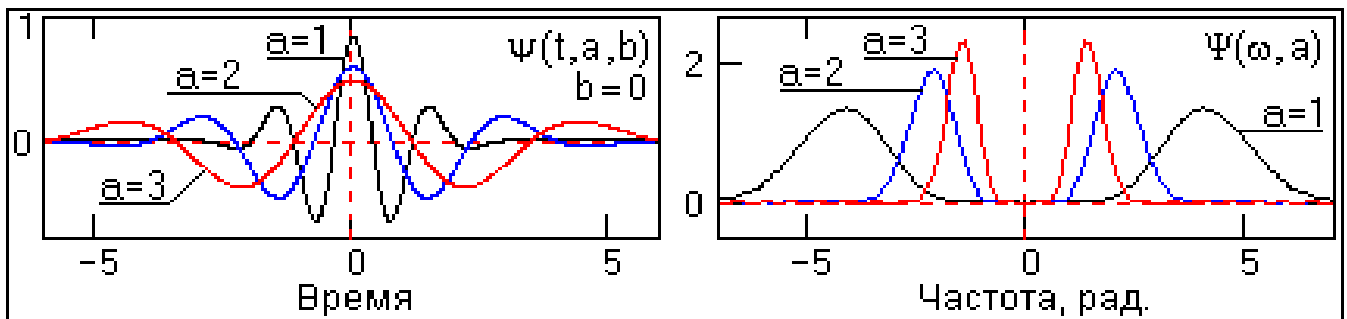


Рисунок 3.5 – Вейвлет по восьмій похідній

3.2.1 Методика одновимірного безперервного вейвлет-аналізу в MatLab

Для виконання безперервного вейвлет-аналізу з використанням WaveletToolbox в програмі MatLab необхідна тільки одна функція для безперервного вейвлет-аналізу: *cwt*. Можна проводити аналіз або з командного рядка, або за допомогою графічного інтерфейсу інструментами WaveletToolbox[28].

1. Методика безперервного аналізу за допомогою командного рядка:

а) Завантаження сигналу команда *loadsignal*

Сигнал струму якіра в робочій зоні MatLab представлений на рисунку 3.6.

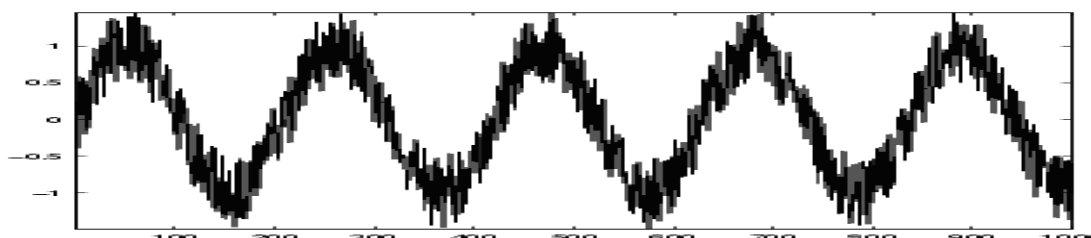


Рисунок 3.6 – Імпортований сигнал струму якіра із іскрінням 1.5балів

Цей сигнал представлений у вигляді таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Імпортований сигнал

Name	Size	Bytes	Class
<i>signal</i>	1x1000	8000	<i>doublearray</i>

б) Безперервне перетворення імпульсу:

Команда *cwt*: $c = cwt(signal, 1:48, 'db4');$

В аргументах для *cwt* вказаний аналізований сигнал, масштаби аналізу (1:48) та вейвлет, який буде використовуватися – Добеші 4 [28].

Аргумент С містить коефіцієнти в різних масштабах. У цьому випадку, з 48 по 1000 стовпчик матриці з кожного рядка завантаженого сигналу, відповідно прийнятому масштабу.

в) Побудова коефіцієнтів вейвлет-перетворення командою:

$c = \text{cwt}(\text{signal}, 1:48, 'db4', 'plot');$

Відповідний графік, отриманий за цією командою наведено на рисунку 3.7.

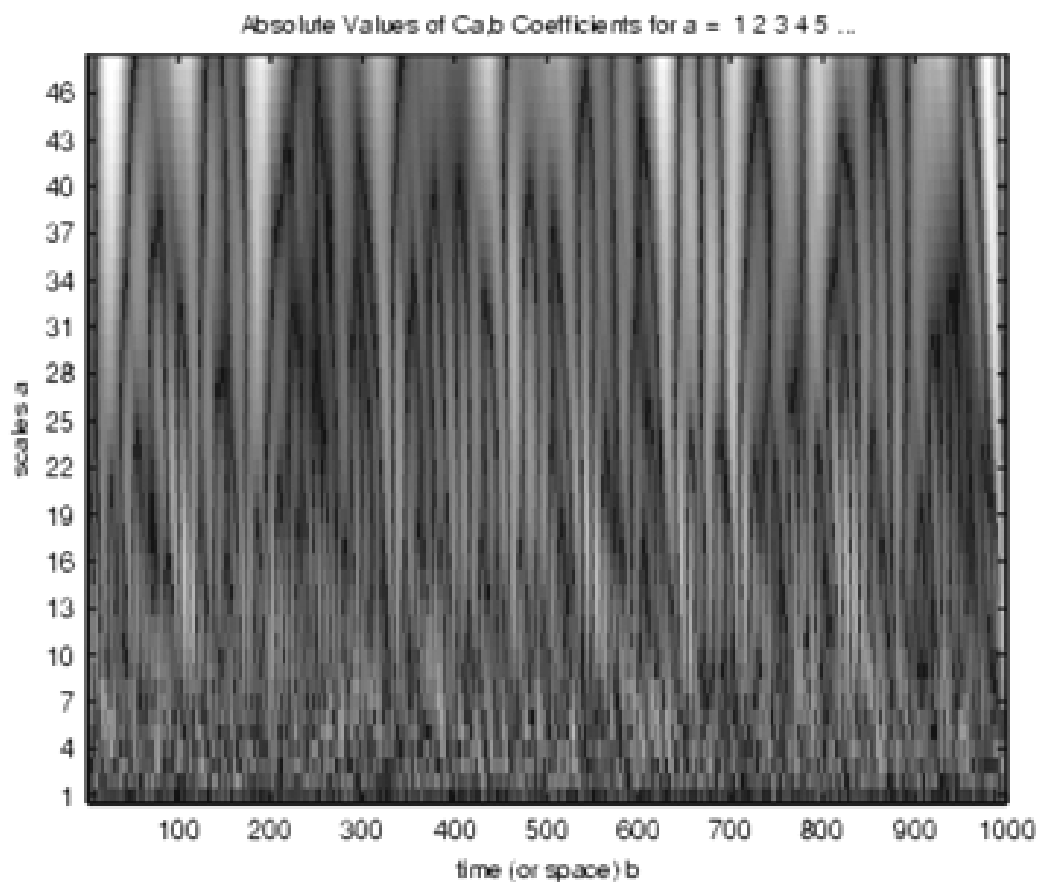


Рисунок 3.7 – Безперервне Вейвлет – розкладання сигналу струму якіра

д) Вибір шкали для аналізу.

Можна побудувати в різному масштабі, враховуючи :

- всі вагові коефіцієнти повинні бути реальними позитивними числами;
- масштаб приросту повинен бути позитивним;
- масштаб не може перевищувати максимального значення (в залежності від сигналу).

Картина безперервного Вейвлет – розкладання сигналу струму якіра з іншою шкалою від 2 до 128, що побудована командою:

$c = \text{cwt}(\text{noissin}, 2:2:128, 'db4', 'plot');$

представлена на рисунку 3.8.

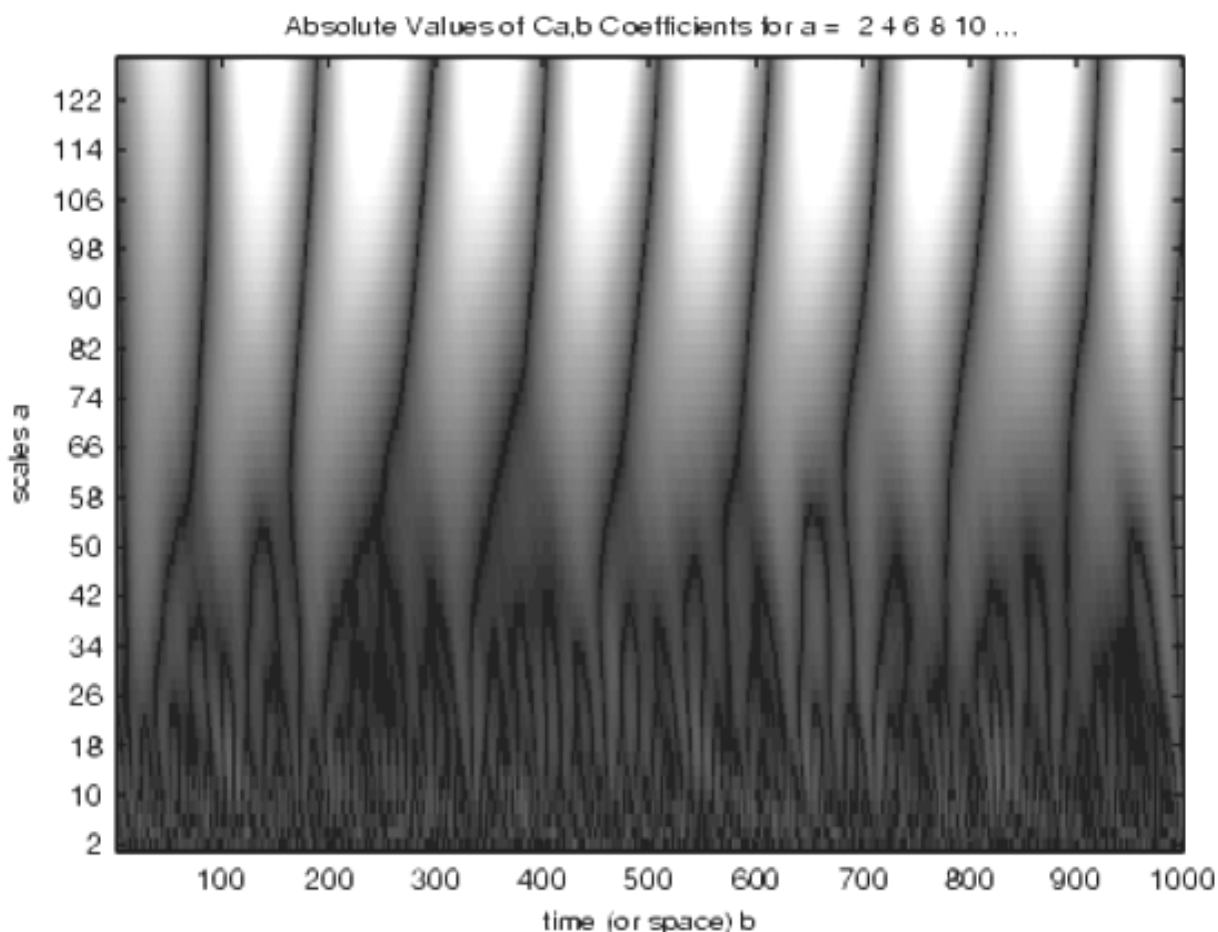


Рисунок 3.8 – Вейвлет–спектр сигналу з іншими масштабом

Цей графік дає більш ясну картину того, що відбувається з сигналом, підкресливши його періодичності та не стаціонарність іскріння.

2. Методика безперервного аналізу за допомогою графічного інтерфейсу.

Виконання безперервного вейвлет 1–D перетворення (Continuous Wavelet 1–D) за допомогою інструменту для аналізу (1–D Tool) представлено нижче в методичній послідовності.

а) ВMatLab рядку необхідно ввести "*wavemenu*".

З'явиться головне меню (*WaveletToolboxMainMenu*) (рисунок 3.9).

При обиранні пункту меню *Continuous Wavelet 1–D* (безперервний одномірний вейвлет–аналіз), як це показано стрілкою на рисунку 3.9, запускається вікно для аналізу одномірних даних, яке представлено на рисунку 3.10.

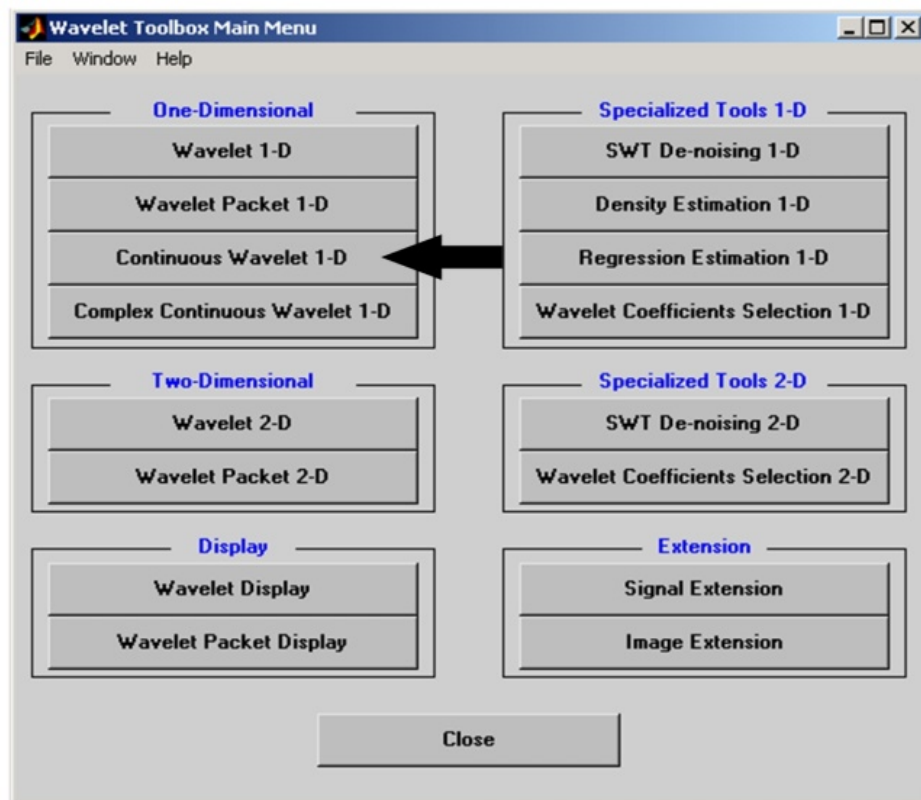


Рисунок 3.9 –Головне меню WaveletToolboxMainMenu

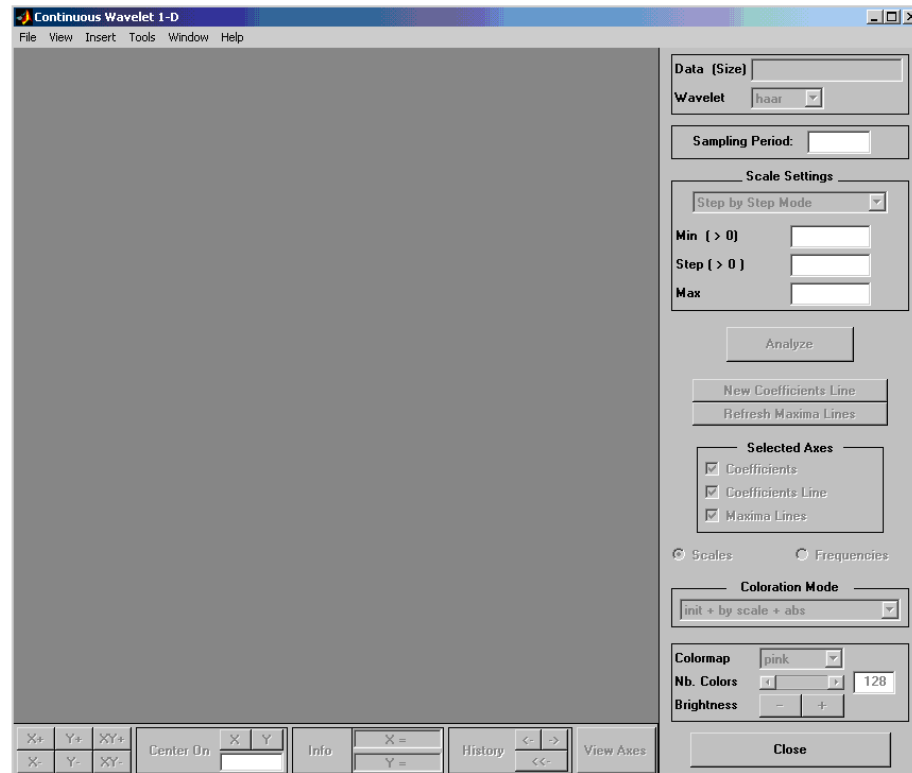


Рисунок 3.10 – Вікно пункту меню Continuous Wavelet 1-D

б) Завантаження сигналу здійснюється по команді:

File>LoadSignal з головного меню.

в) Безперервне перетворення імпульсу.

Аналіз виконується з використанням вейвлет DB4 в масштабі від 1 до 48, для цього у правій верхній частині вікна (рисунок 3.11) обираємо безперервне вейвлет Добеші DB4 і масштаб 1–48 (показано на рисунку 3.11 стрілками).

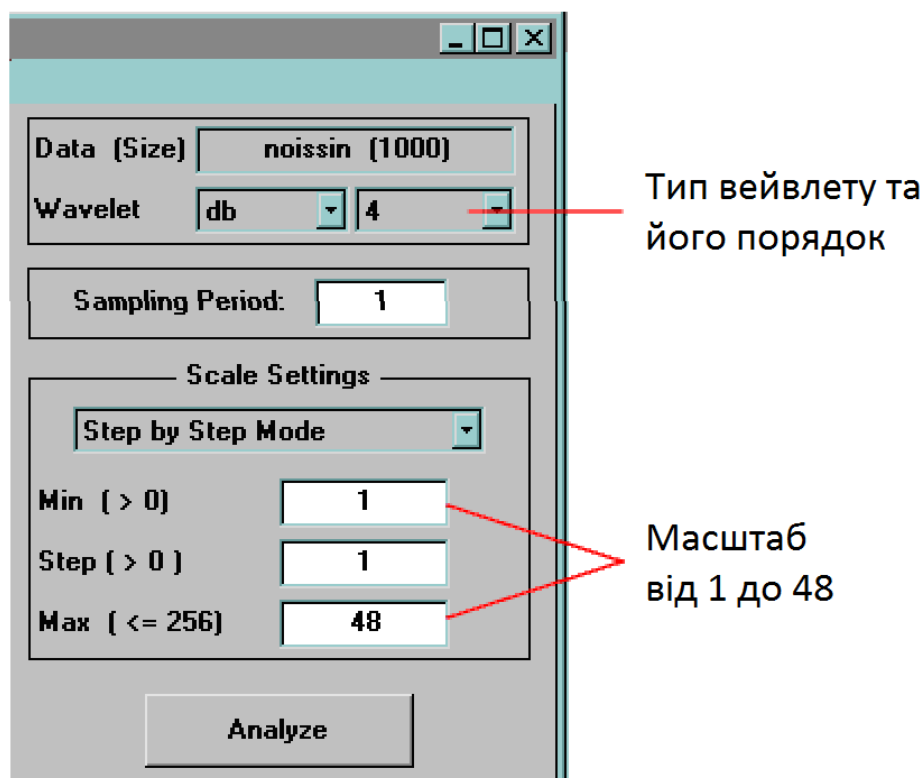


Рисунок 3.11 – Вікно параметрів вейвлет–перетворення сигналу

Після параметризації, натискаємо кнопку *Analyze*.

г) Аналіз (*Analyze*).

Після паузи для обчислень, інструмент відображає коефіцієнти картини перетворення, з відповідною шкалою $a = 24$, і детально – ділянку максимуму, в різних масштабах (від 48 до 1), тобто коефіцієнти локальних максимумів (рисунок 3.12). Нижній графік побудований для локальних екстремумів.

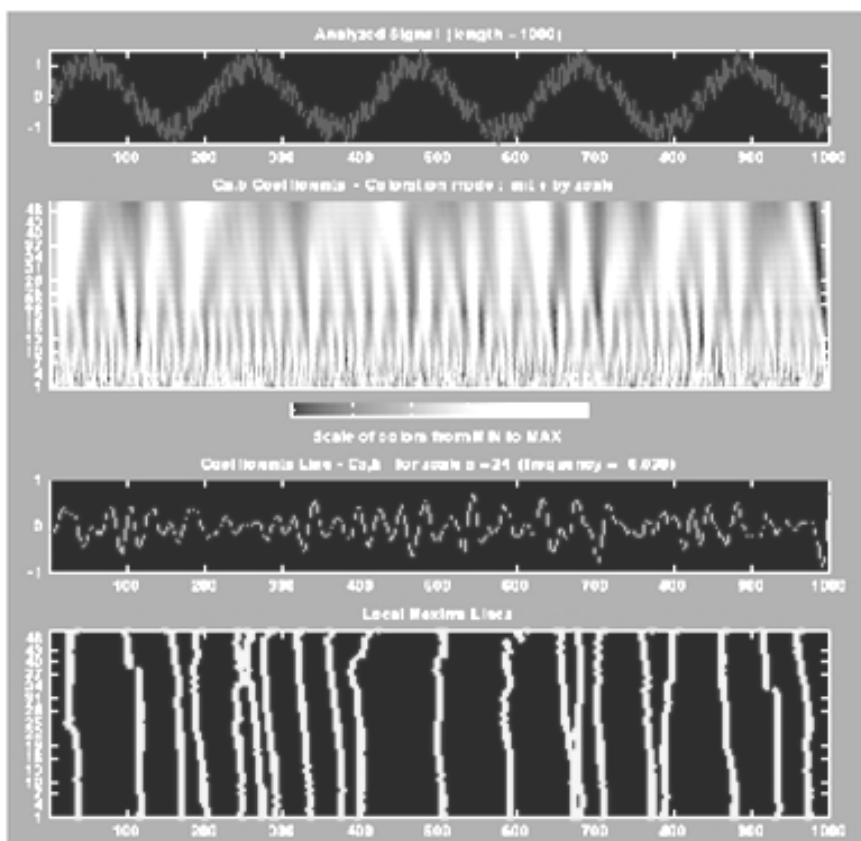


Рисунок 3.12 – Вікно відображення результатів вейвлет–перетворення

д) Перегляд вейвлет–коефіцієнтів з іншими масштабами.

Вибираються інші масштаби натискуванням правої кнопки миші. Нижче буде показано, як вибрати потрібний масштаб.

При натисканні на кнопку (*NewCoefficients Line*) картина перетворення перебудовується в іншому масштабі (рисунок 3.13).

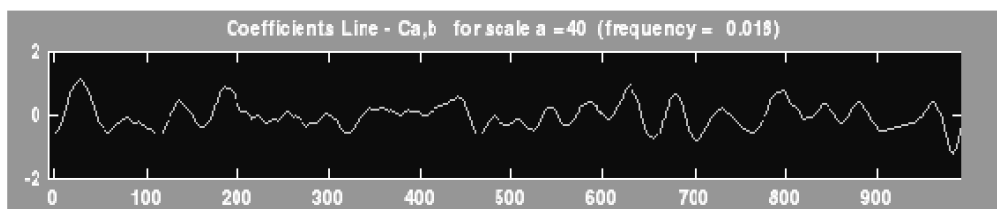


Рисунок 3.13 – Коефіцієнти перетворення сигналу в іншому масштабі

е) Перегляд лінії Max.

При натисканні кнопки (*RefreshMaxima Line*) відображаються локальні

ділянки максимумів ланцюжками, що побудовані в різних масштабах коефіцієнтів локальних максимумів від $a=40$ до $a=1$ (рисунок 3.14) – тобто спектр графік.

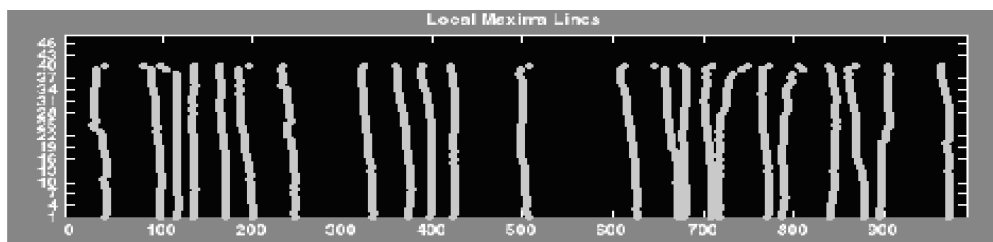


Рисунок 3.14 – Лінії локальних максимумів (скелетні)

Наступний рисунок 3.15 ілюструє, як положення миші задає нижній частині екрана інформацію про розташування (X) і масштаб (Sca) для обраного для деталізації кадру.

є) Збільшення та деталізація.

Для деталізації обирається вікно в частині сигналу, яку необхідно збільшити.

При натисканні кнопки $X +$ (розташована в нижній частині екрана) збільшення відбувається тільки по горизонталі (рисунок 3.16).

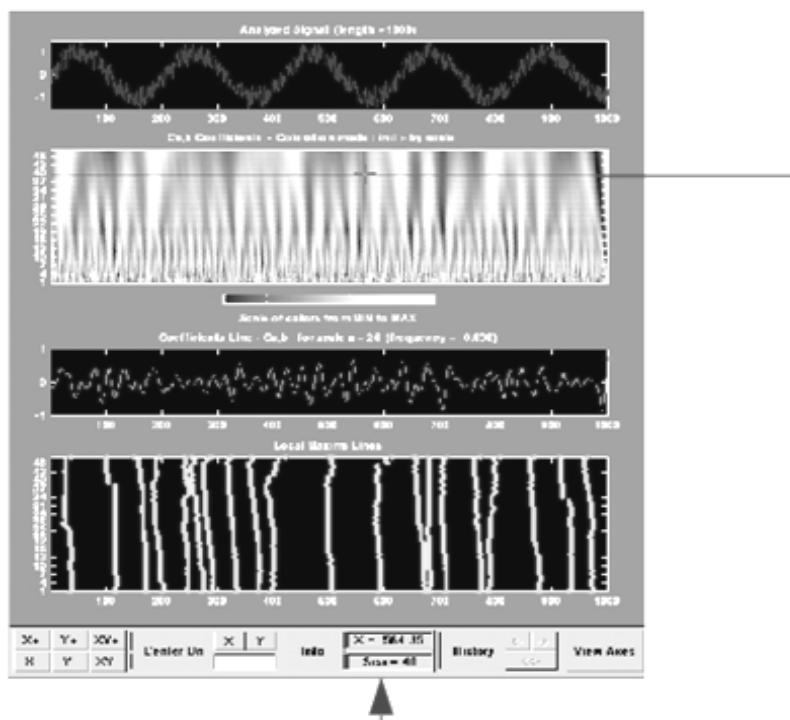


Рисунок 3.15 – Відображення масштабу та розташування кадру з картини вейвлет-перетворення



Рисунок 3.16 – Збільшення масштабу (нижня частина екрану)

Таким чином можна змінити вагу вейвлета, збільшити сигнал і коефіцієнти ділянки, і повторити аналіз за допомогою цього інструменту.

Проведено аналіз в системі MatLab, результати якого приведені нижче на рисунках 3.17, 3.18, 3.19, 3.20.

На рисунку 3.17 наведено шестирівневе розкладання сигналу струму якіра при іскрінні в 1,5 балів вейвлетом Добеші четвертого порядку. Оскільки вейвлет не є гармонійним сигналом, і складові мають вейвлето-подібний вид, окрім першої складової – 50Гц.

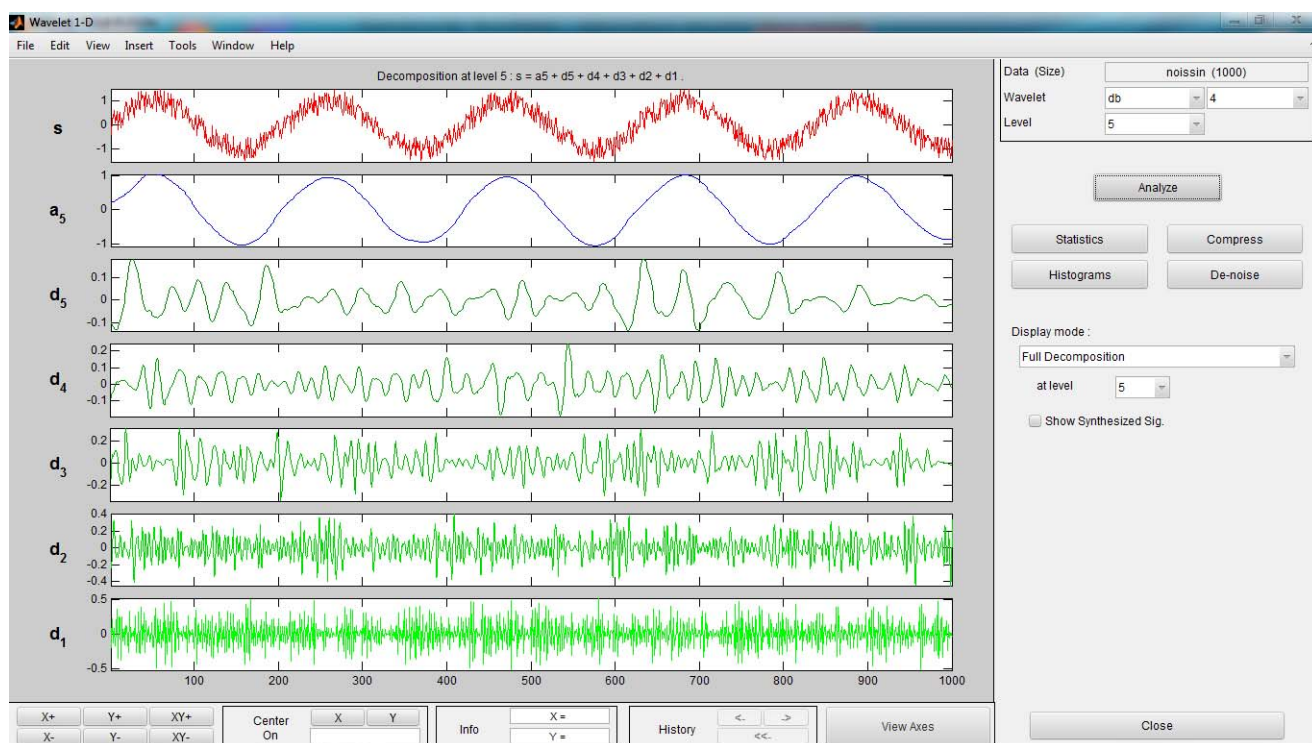


Рисунок 3.17 – Вейвлет-розкладання сигналу (струму якіра)

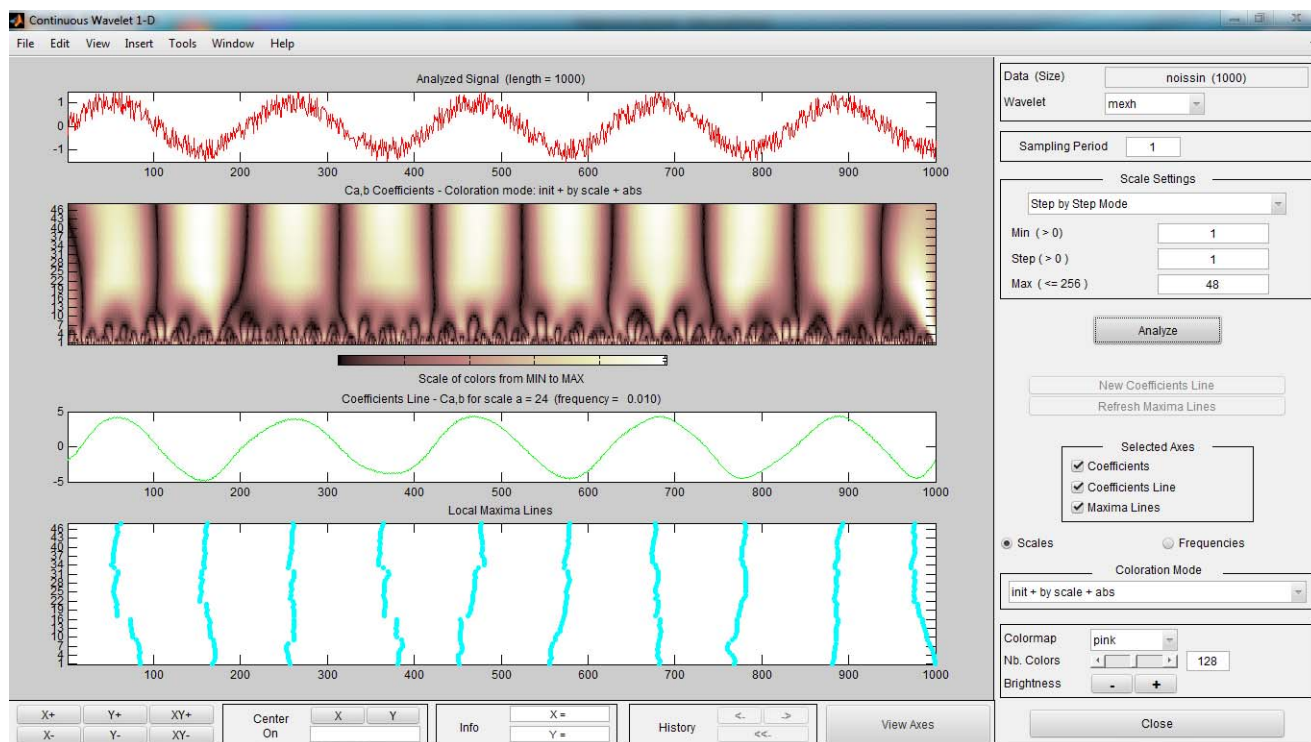


Рисунок 3.18– Аналіз завантаженого сигналу вейвлетом "Мексиканський капелюх"

Зверху вниз на рисунку зображені: сигнал; картина вейвлет частотно–часового спектру; графік зміни коефіцієнтів; "скелетні" лінії. Як бачимо, вейвлет–спектр дуже чітко розділений на НЧ та ВЧ складові, при чому видно, що НЧ складова – періодична, а ВЧ – має стохастичний характер, при коефіцієнтах порядку 10 і менше видні різкі ВЧ – коливання.

На рисунках 2.19, 2.20 показані вейвлет–перетворення (вейвлет МНАТ) пульсацій напруги між щітками. По горизонтальній осі відкладена величина зсуву, а по вертикальній – масштаб (частота).

Сіра шкала має 256 рівнів. Чорний колір відповідний мінімальному значенню, яке приймають вейвлет–коефіцієнти, білий – максимального. Проміжні значення відповідають відтінкам сірого різної інтенсивності. На спектрі чітко різняться кілька компонентів сигналу. У верхній частині видно коливання інтенсивності, викликані високочастотної складової сигналу, у той час як низькочастотна компонента утворює помітну структуру в середній частині спектру.

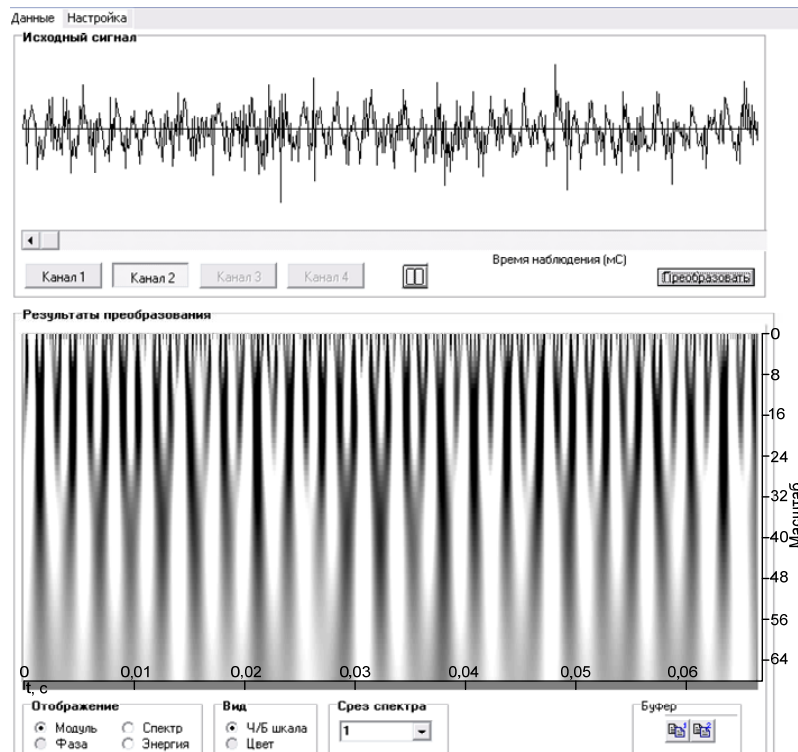


Рисунок 2.19 – Массив значений вейвлет–перетворення $W(a,b,t)$ сигналу напруги на щітках справногo ТЕД НБ–418К6 (частота дискретизації 0,1 мс)

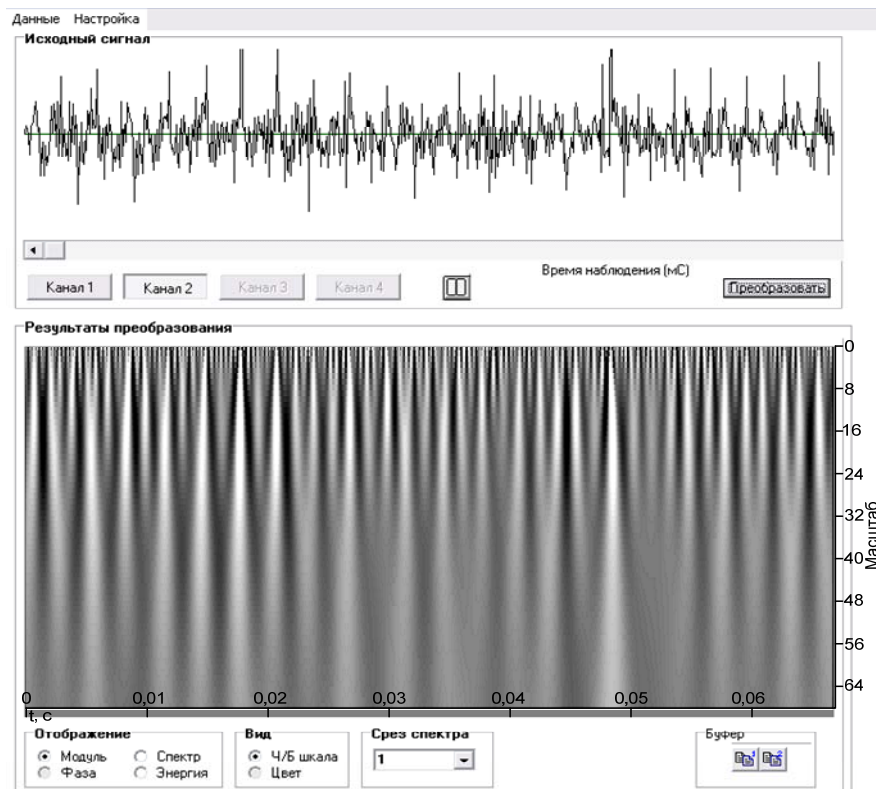


Рисунок 2.20 – Массив значений вейвлет–перетворення $W(a,b,t)$ сигналу напруги на щітках несправногo ТЕД НБ–418К6 (частота дискретизації 0,1 мс)

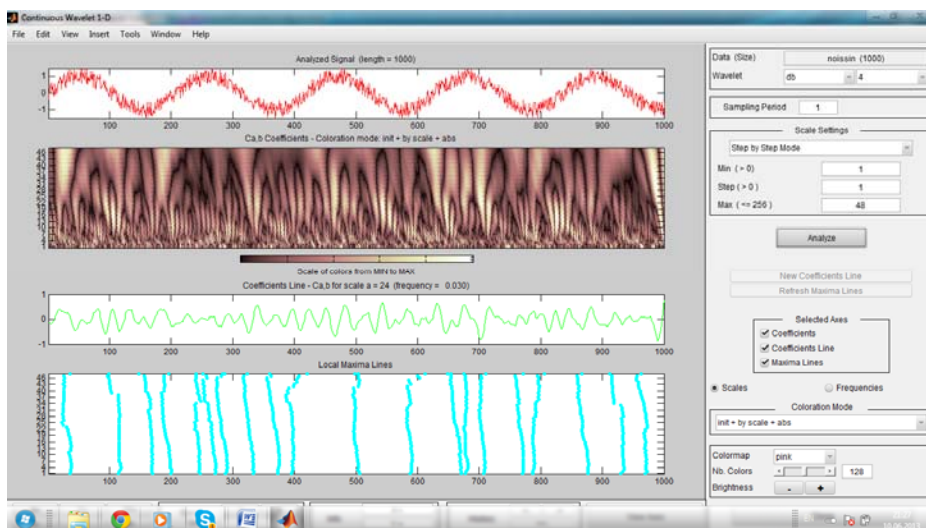


Рисунок 3.21– Аналіз завантаженого сигналу вейвлетомДобеші четвертого порядку

Як бачимо, більш високий порядок вейвлета дозволяє більш детально дослідити складові сигналу, але картина не така чітка та проста.

Плавні переходи кольору (відтінків) говорять про гармонійність функції (50 Гц– синусоїда), більш рідкісні – про імпульсному характері сигналу (комутаційні пульсації). Крім того, видно, як ці кольори, тобто – сигнали, змінюються в часі.

Таким чином, вейвлет–спектрограма надає вичерпну інформацію про характер осцилограмианалізованого сигналу.

На рисунку 3.22наведено сигнал, що свідчить про початок інтенсивного іскріння, вейвлет–спектр свідчить про зростання амплітуди високочастотних складових.

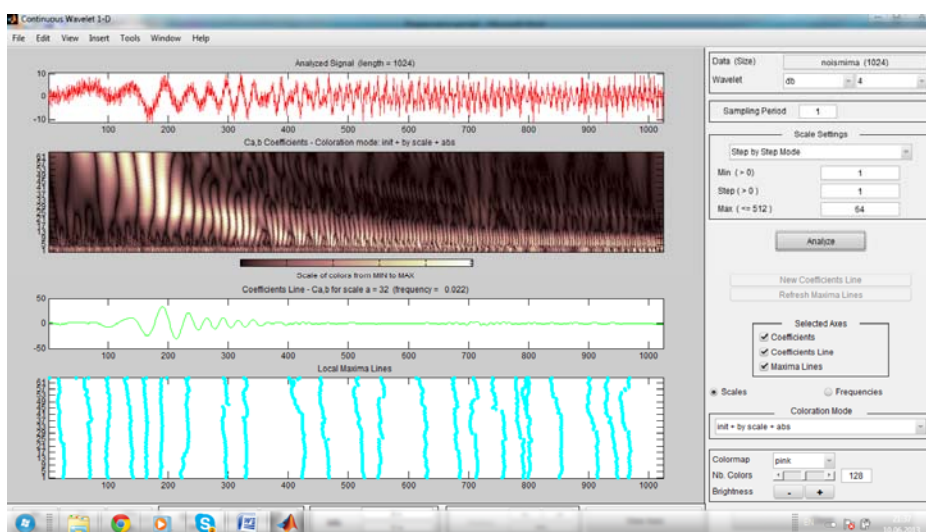


Рисунок 3.22– Аналізсигналу розвиткукругового вогню

Як бачимо, картина вейвлет–спектру змінюється в часі, що свідчить про розвиток кругового вогню.

3.2.2 Методика порівняння (оцінки) сигналів за допомогою одновимірного вейвлет перетворення

Порівняння зразкового сигналу якіра із тим, що отриманий в ході моніторингуздійснити за допомогою одновимірної вейвлет–оцінки (регресії) спеціалізованим інструментом з *WaveletToolbox*TM. Для одновимірної оцінки тапорівняння сигналів за допомогою графічного інтерфейсу для рівномірно розподілених спостережень використовують регресійний аналіз даних, отриманих одномірним вейвлет–перетворенням. Методика порівняння наведена нижче:

а) Запускається інструмент оцінки регресії 1–D Tool за допомогою команди: *wavetmenu*. Після чого з'явиться головне меню (WaveletToolboxMainMenu) (рисунок 3.23).

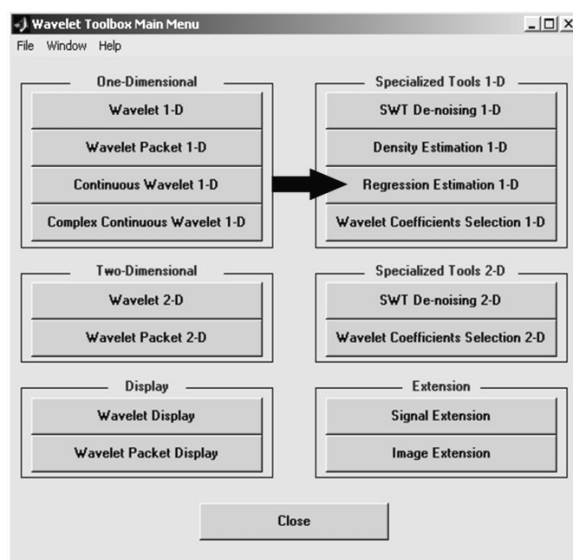


Рисунок 3.23 – Головне меню WaveletToolboxMainMenu

Обирається команда: *1–D RegressionEstimation 1–D* (показана стрілкою на рисунку 3.21)

б) Завантаження даних.

З меню Файл (*File*) обирається команда завантаження для фіксованих (зразкових) даних (*LoadDataforFixedDesignRegression*), які повинні розташовуватися

в каталозі інструментів *MatLabtoolbox/wavelet/wavedemo*(рисунок 3.24). В якості даних для порівняння імпортуються поточні таблиці, отримані з осцилограм струму якіра.

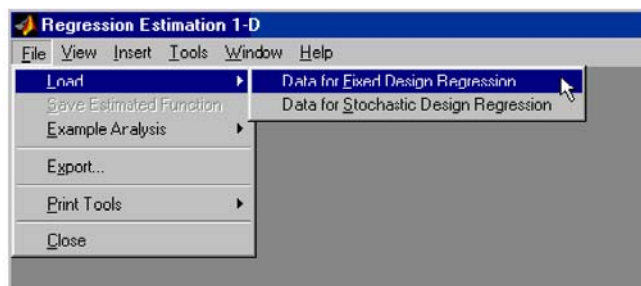


Рисунок 3.24 – Вікно меню вибору команди завантаження даних

Блоки даних завантажуються у вікно оцінки регресії *1-D RegressionEstimation 1-D –FixedDesign*. Зразковий стан містить осцилограму струму якіра, отриману в момент початку інтенсивного іскріння.

У вікнахрисунку 3.25 представлені 2 сигнали: *initial*– зразковий та *processed*– той, що порівнюється.

Для завантаження даних для оцінки регресії, файл повинен містити хоча б один вектор. Якщо файл містить тільки один вектор, цей вектор вважається *Y Data* і вектор *X Data* створюється автоматично.Якщо файл містить не менше двох векторів, вони повинні назвати *X Data* і *YData*або *x* і *y*.Ці вектори мають бути однакової довжини.Наприклад, можна завантажити файл, що містить дані про струм якіра, один з ним буде зберігатися як зразковий, інший – постійно оновлюватись за данимимоніторингу струму якіра в ході його експлуатації.

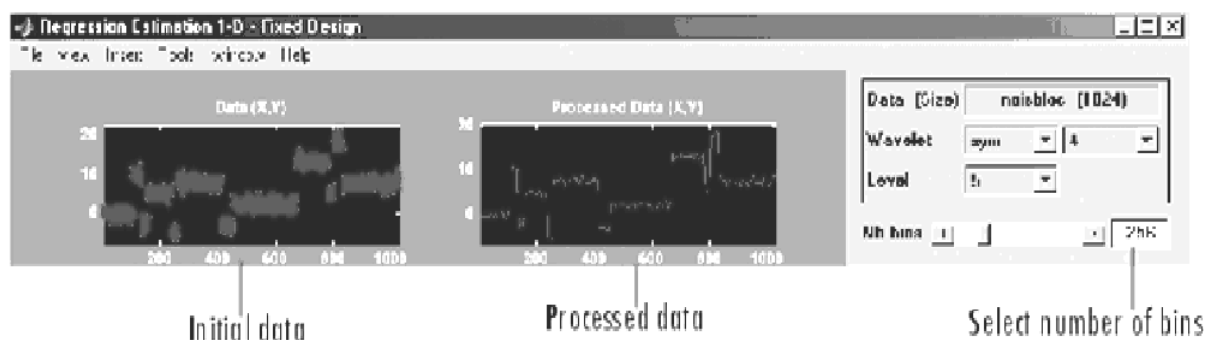


Рисунок 3.25 – Зразковий стан осцилограми на початку інтенсивного іскріння та сигнал поточного струму якіра

в) Порівняння сигналів.

Сигнал, що обрабляється та зразковий піддаються регресійному аналізу, тобто розкладаються на елементарні складові (декомпонуються за допомогою вейвлет-розкладання).

Далі, кожна складова порівнюється окремо (рисунок 3.26, 3.27) і визначається ступінь їхньої подібності (дані в правій частині вікна), тобто коефіцієнти кореляції.

На рисунку 3.26 – порівняння сигналу якіра із іскрінням, на рисунку 3.27 – в режимі "старт-стоп".

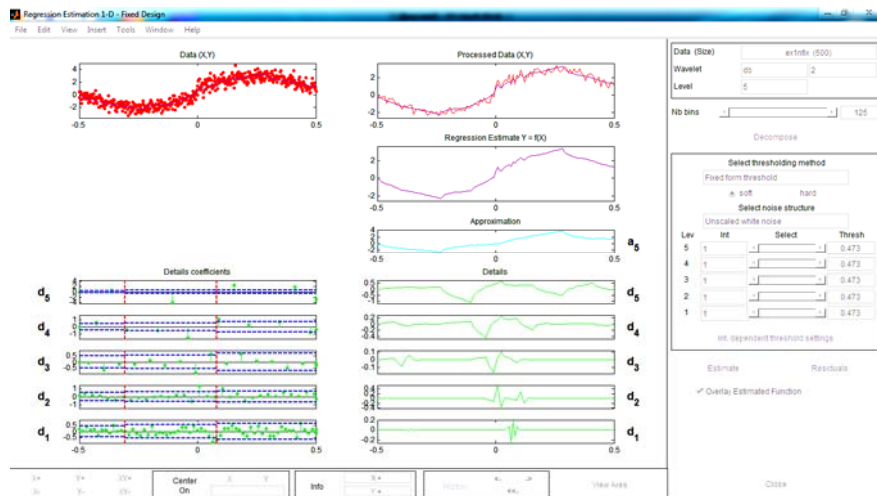


Рисунок 3.26 – Розкладання і порівняння сигналів: зразкового (Data) та завантаженого (ProcessedData) струму якіра

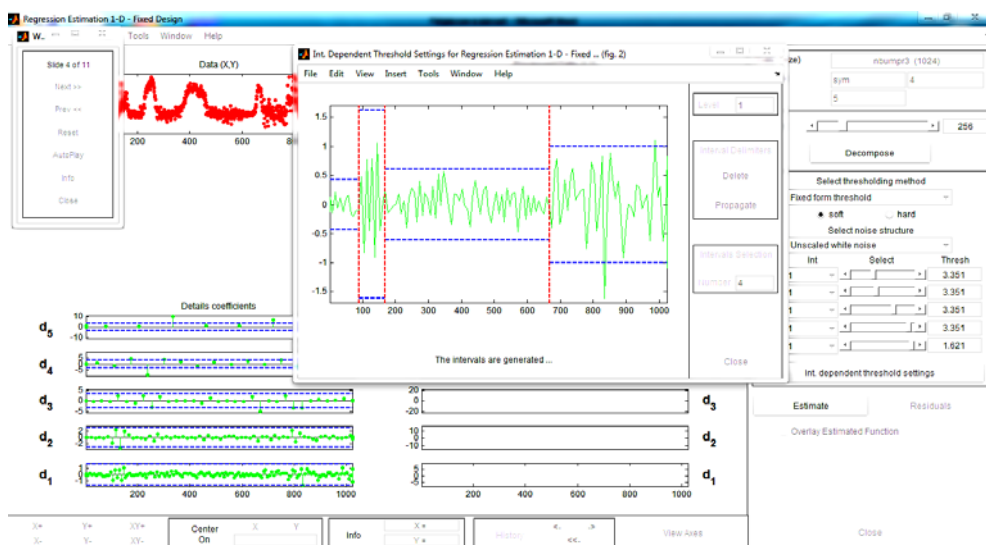


Рисунок 3.27 – Розкладання і порівняння сигналів в режимі старт-стоп із виділенням "кадрів" для аналізу

При досягненні цих коефіцієнтів критичних значень, які свідчать про високу подібність, можна зробити висновок, що і складні сигнали, які є суперпозицією цих елементів, також подібні. В такому разі система управління отримує сигнал про початок кругового вогню та вимикає двигун. Значення за замовчуванням для кількості сегментів сигналу становить 256, що можна змінювати. Обираючи більшу кількість сегментів, можна збільшити деталізацію при порівнянні.

г) Вейвлет–розкладання оброблюваних даних.

Обравши, наприклад вейвлет Хаара з *Wavelet* меню 5 рівня (*Level*) проводиться розкладанням сигналу командою / кнопкою *Decompose*. Після паузи для обчислень, інструмент показує детальні коефіцієнти розкладання. Тіснота кореляції дасть нам ступінь збігу аналізованого сигналу із зразковим. При перевищенні коефіцієнтів регресії певних значень, в залежності від типу двигуна, система отримує команду, що почалось активне іскріння.

д) Виконання оцінки регресії.

Обравши поріг «білого шуму», можна очистити сигнал від шуму та реконструювати сигнал як суму і регресію елементарних сигналів. Саме ці сигнали порівнюють із елементарними складовими сигналу – зразка.

3.3 Спектральний аналіз в ECAD

Спектральний аналіз в ECAD [26] виконується після розрахунку перехідних характеристик швидким перетворенням Фур'є із розрахунком коефіцієнта нелінійних спотворень. Можна розраховувати частотні характеристики пристроїв, заданих передаточною функцією, але перетворення Лапласа не можна використовувати для завдання лінійних блоків із постійними коефіцієнтами передачі. Для розрахунку імпульсної характеристики за допомогою перетворення Фур'є в режимі аналізу АС по вісі x задається час, а для побудови годографа для аналізу стійкості за методом Найквіста – дійсна частина комплексної напруги.

Спектральний аналіз не основі функції FFT у програмі MC11[26] використовується для розкладання кривої перехідного процесу $F(t)$, отриманої при моделюванні в області часу, на гармонійні складові. Спочатку обчислюються значення кривої перехідного процесу для значень дискретних відліків часу [26]:

$$t_k = \frac{t_{кін} - t_{поч}}{2N + 1}, \quad (3.17)$$

де $t_{поч}$, $t_{кін}$ – початок і кінець часового інтервалу перетворень;

N – ціле число, задається користувачем;

$k = 1, 2, \dots, 2N$...

Потім за допомогою простого рекурентного методу пряма спочатку апроксимується сумою гармонік

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^M \left(A_n \cdot \cos(n \cdot 2\pi \cdot k \cdot \frac{t_k}{t_{кін} - t_{поч}}) + B_n \cdot \sin(n \cdot 2\pi \cdot k \cdot \frac{t_k}{t_{кін} - t_{поч}}) \right), \quad (3.18)$$

де M – максимальний порядок апроксимуючих гармонік.

Потім перераховуються до виду:

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^M a_n \cdot \sin(n \cdot 2\pi \cdot k \cdot \frac{t_k}{t_{кін} - t_{поч}} + \varphi_n), \quad (3.19)$$

$$\text{де } a_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}; \quad (3.20)$$

$$\varphi_n = \arctg(A_n/B_n). \quad (3.21)$$

Результати перетворення видаються у виді таблиці залежності a_n і φ_n від номера гармоніки.

Застосування перетворення Фур'є стосовно осцилограмами пульсації напруги між щітками у справних і несправних електричних машин показало на їх наочну відмінність, особливо по амплітудах пульсацій (рисунок 3.28, 3.29).

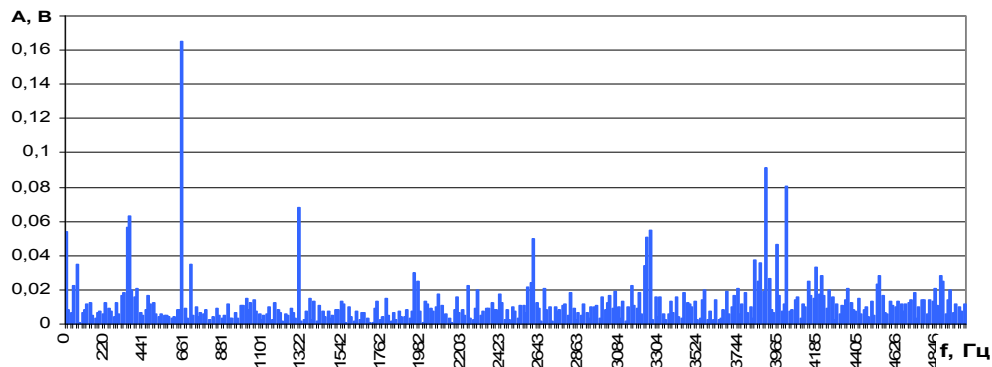


Рисунок 3.28– Спектрограма змінної складової напруги на щітках різної полярності справного ТЕД НБ-418К6 [12]

Частота пульсацій, на яких спостерігаються максимальні значення, залежить від типу електричної машини.

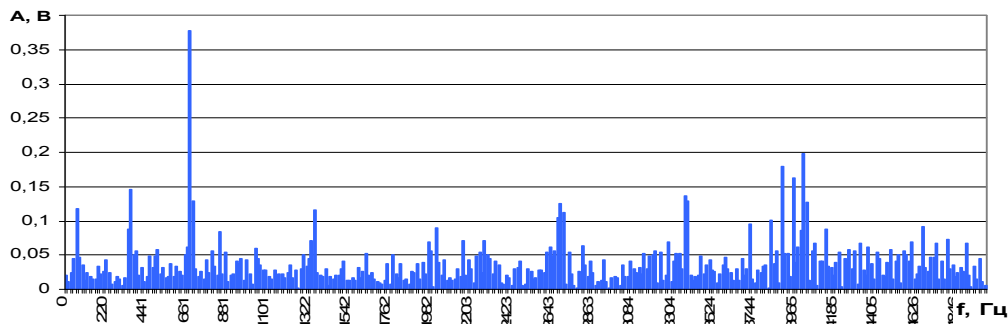


Рисунок 3.29– Спектрограма змінної складової напруги на щітках різної полярності несправного ТЕД НБ-418К6

Наприклад, для ТЕД НБ-418К6 на спектрах виділяються частоти кратні $f_{кп}=646$ Гц. Ця частота відповідає частоті комутації провідників паза якоря

$$f_{кп} = \frac{N}{2p} n, \text{ Гц}, \quad (3.22)$$

де $N = 696$ кількість провідників якоря;

$2p = 6$ кількість полюсів (кількістю одночасно комутуваних провідників якоря);

$n = 5,57$ – частота обертання якоря, об/с.

Для характеристики динаміки зміни діагностичних сигналів у часі проведено автокореляційний аналіз. Автокореляційні функції сигналів напруги справних і несправних тягових електродвигунів при роботі в стаціонарному режимі періодичні, але у всіх випадках наявність несправностей знижує автокореляції при $t \rightarrow \infty$.

3.3.1 Розробка моделі процесу іскріння (комутаційного) в процесі MC11

Схема та вікно моделі (іскріння) в програмі MC11 для дослідження спектральних характеристик представлені на рисунках 3.30 и 3.31.

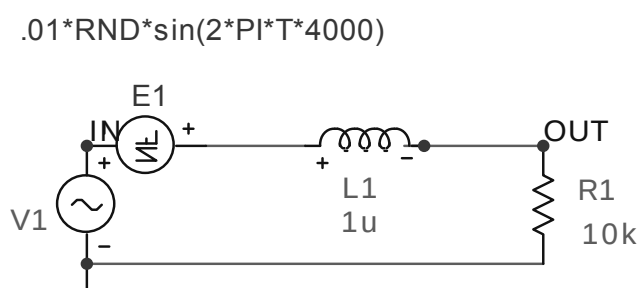


Рисунок 3.30 –Схема моделі процесу іскріння

Характеристики струму якіра зображені на рисунку 3.31.

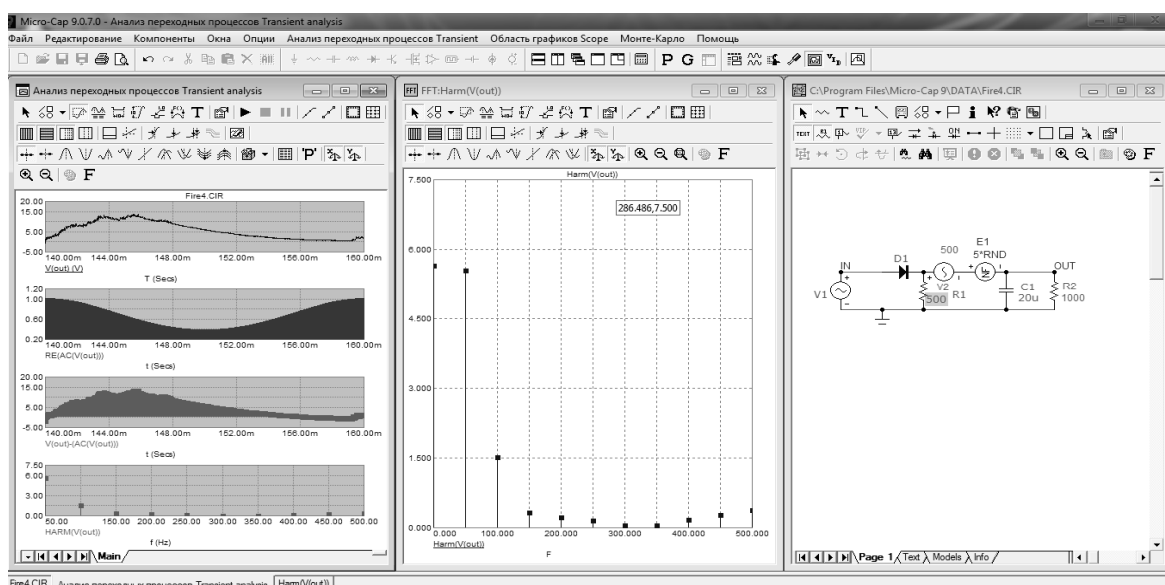


Рисунок 3.31 – Вікно програми MC 11

Для ідентифікації процесу іскріння застосовуємо інструменти кореляційного аналізу.

Кореляція – математична операція, схожа зі звіркою, дозволяє отримати з двох сигналів третій. Буває: автокореляція (автокореляційна функція), взаємна кореляція (взаємкореляційна функція, кросскореляційна функція). Приклад:

$$R_{XY}(\tau) = \int_{-T}^T x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (3.23)$$

Взаємна кореляційна функція:

$$R(\tau) = \int_{-T}^T x(t) \cdot x(t + \tau) dt \quad (3.24)$$

Автокореляційна функція.

Кореляція – це техніка виявлення заздалегідь відомих сигналів на фоні шумів, ще називають оптимальною фільтрацією. Хоча кореляція дуже схожа на згортку, але обчислюються вони по-різному. Області застосування їх також різні ($c(t) = a(t) \times b(t)$ – згортка двох функцій, $d(t) = a(t) \times b(-t)$ – взаємна кореляція).

Кореляція – це та ж згортка, тільки один із сигналів інвертується зліва направо. Автокореляція – це (англ. *autocorrelation*) – спосіб обробки сигналу, при якому сигнал затримується і потім затриманий сигнал множиться на початковий, що допомагає виділити періодичні складові сигналу. Автокореляція (автокореляційна функція) характеризує ступінь зв'язку між сигналом і його зрушеної на τ копією. Взаємнокореляційна функція характеризує ступінь зв'язку між 2-ма різними сигналами, як наведено на рисунках 3.32 та 3.33.

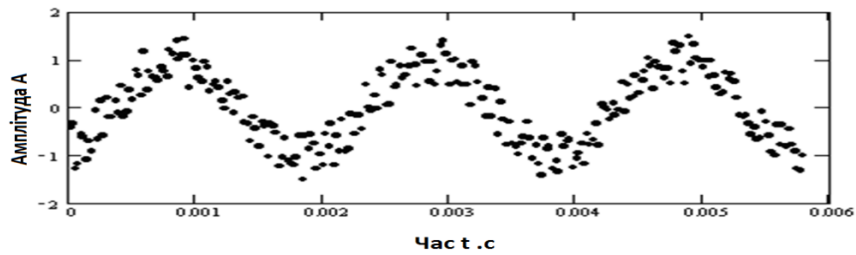


Рисунок 3.32 – Вихідний сигнал з шумами

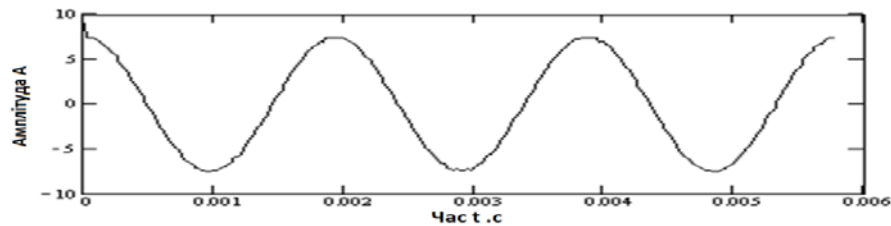


Рисунок 3.33 – Автокореляційна функція вихідного сигналу

Властивості взаємної кореляційної функції (ВКФ):

- 1) ВКФ не є ні парною ні непарною функцією, тобто $R_{xy}(\tau)$ не дорівнює $r_{xy}(-\tau)$.
- 2) ВКФ залишається незмінною при зміні чергування функцій і змін знака аргументу, тобто $R_{xy}(\tau) = r_{xy}(-\tau)$.
- 3) Якщо випадкові функції $x(t)$ і $y(t)$ не містять постійних складових і створюються незалежними джерелами, то для них $g_{xy}(\tau)$ прагне до 0. Такі функції називаються некорельованими.

Приклад автокореляції струму якіра в МС11 на півперіоді сигналу струму якіра без іскріння наведений на рисунку 3.34.

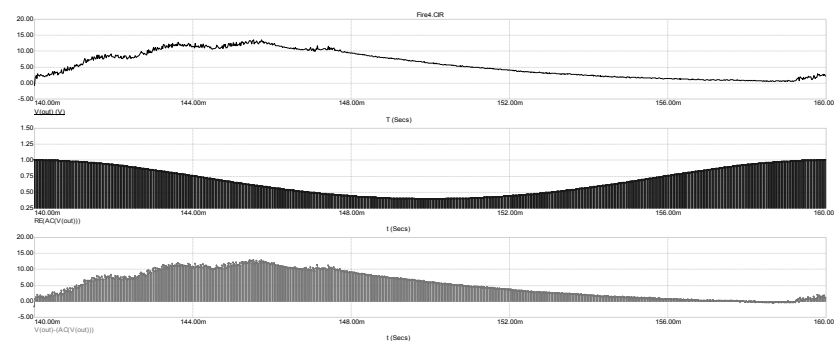


Рисунок 3.34 – Автокореляція сигналу струму якіра без іскріння

За допомогою автокореляції виділяємо частину сигналу, що повторюється (це 50 Герцова складова), тобто здійснюємо фільтрацію сигналу.

На рисунку 3.35 наведений спектр струму без іскріння.

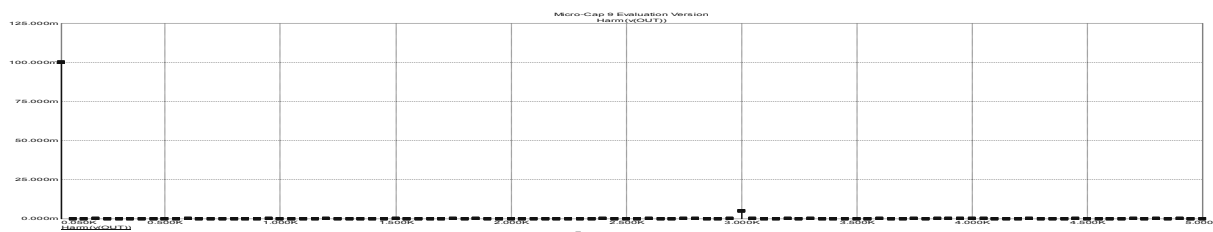


Рисунок 3.35 – Спектр без іскріння

Як бачимо, на спектрі присутні складові в 50 Гц і близько 3 кГц, тобто частота промислової мережі та комутації струму.

На рисунках 3.36, 3.37 зображений спектр із постійною складовою, складовою пульсації/ комутації та 50 Гц.

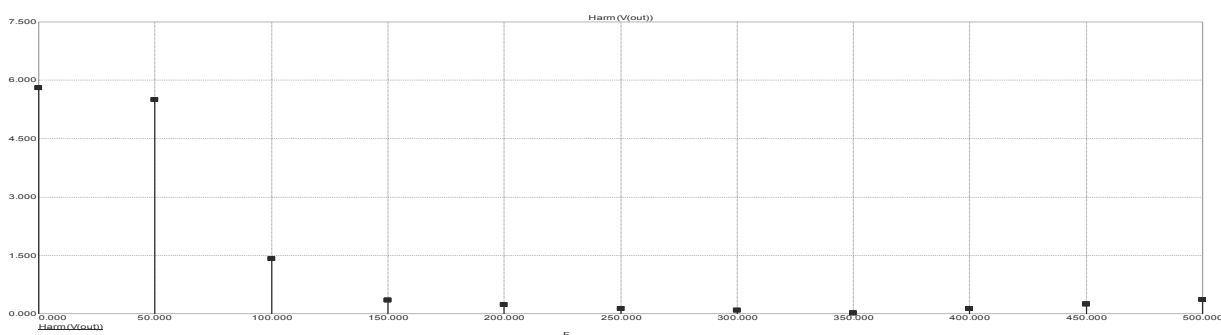


Рисунок 3.36 – Спектральна характеристика вихідного сигналу – іскріння менше 1балу

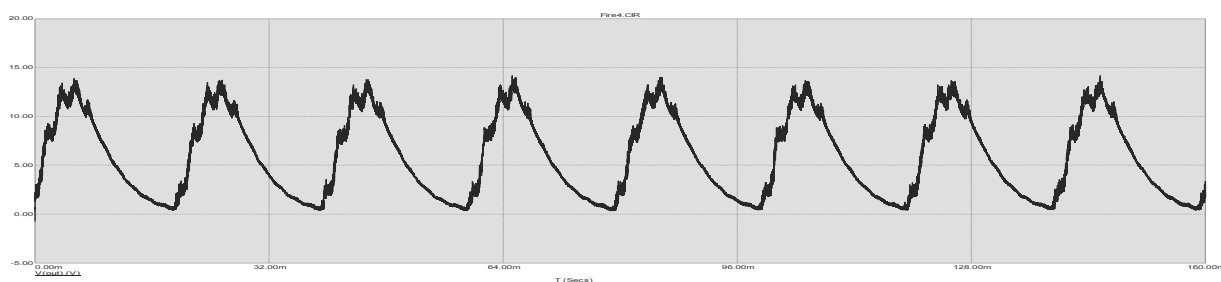


Рисунок 3.37 – Струм якіра, іскріння до 1,5балів

Деталізація на півперіоді сигналу – на рисунку 3.38.

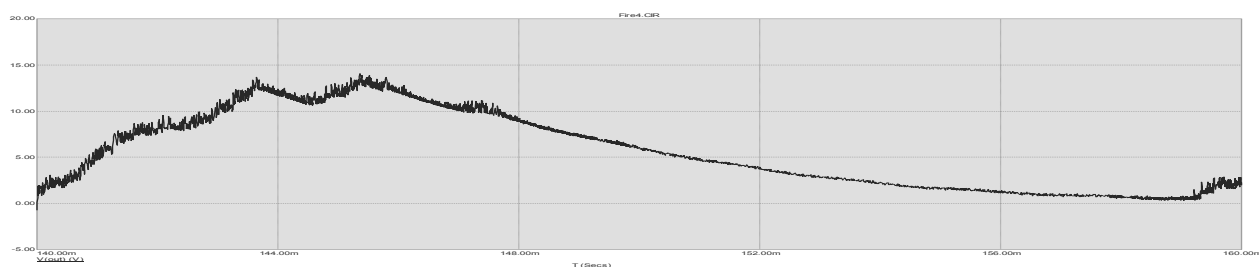


Рисунок 3.38 – Діаграма струму якіра з іскрінням –
півперіоду вихідного струм, із комутаційними осциляціями

3.4 Ідентифікація і аналіз процесів іскріння та кругового вогню в ДПС в ECAD

Проведемо аналіз «повторюваності» сигналу шляхом його автокореляції (функція $AC(V(out))$) вхідного сигналу (рисунок 3.39) в ECAD програмі MicroCap.

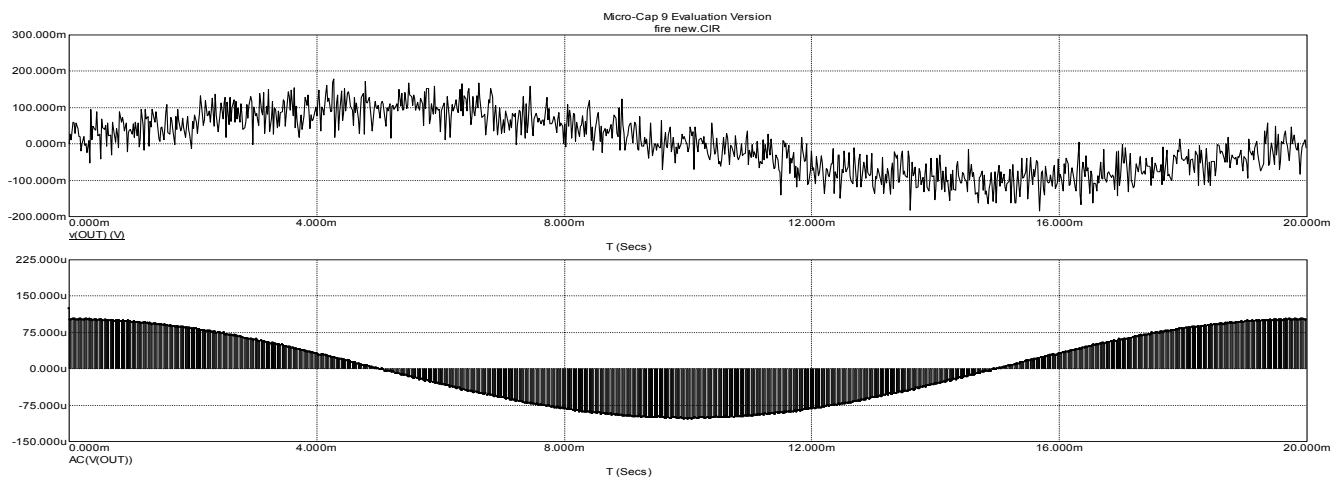


Рисунок 3.39 – Автокореляція сигналу – фільтрація шуму, виділення
синусоїдної складової при іскрінні 1,5балів

При підвищенні бальності іскріння, автокореляцій на характеристику – «розмивається» (рисунок 3.40), це може бути одним з критеріїв початку кругового вогню, але нечітким.

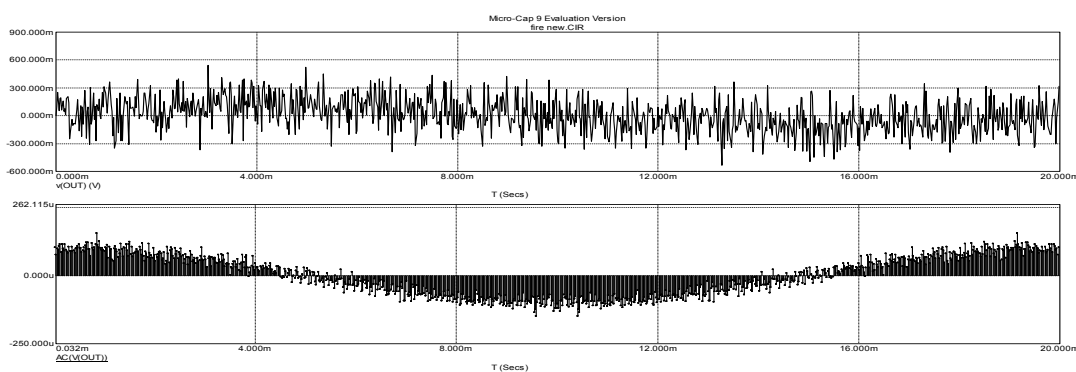


Рисунок 3.40– Автокореляція сигналу – фільтрація шуму, виділення синусоїдної складової при круговому вогні

Ще одним критерієм може бути сукупний коефіцієнт нелінійних викривлень (функція $THD\ HARM\ (V(out))$); результати аналізу осцилограми струму якіра наведено на рисунку 3.41.

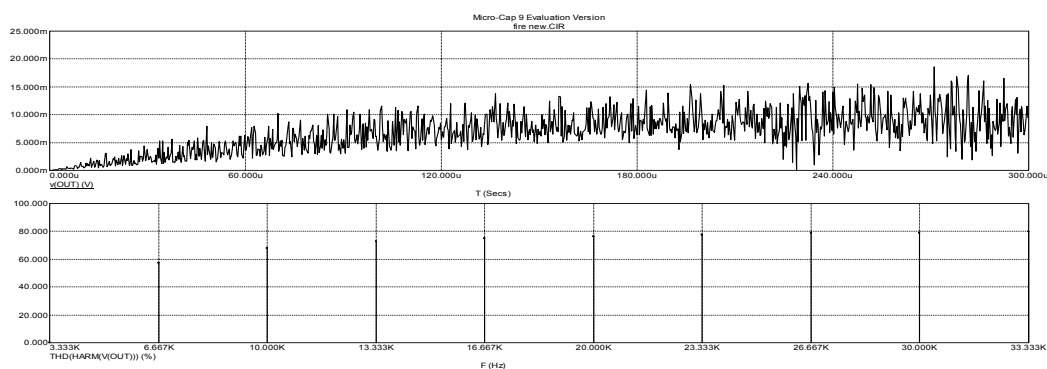


Рисунок 3.41 – Ідентифікація іскріння за результатами аналізу MC11

Якщо сумарні нелінійні викривлення (коефіцієнт гармонік) при інтенсивності іскріння 1,5 балів, сягає 80% – це свідчить про початок інтенсивного іскріння.

Варіант моделі процесу інтенсивного іскріння наведено на рисунку 3.42.

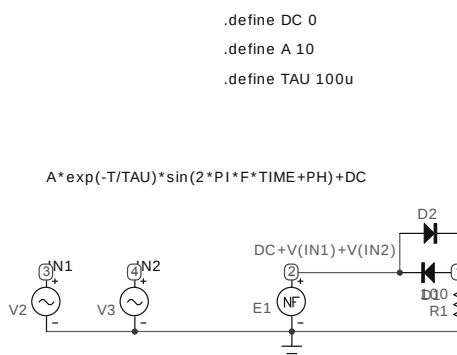


Рисунок 3.42 – Варіант моделі процесу іскріння

Функція моделюється близькими за частотами джерелами синусоїдального сигналу із випадковими відхиленнями амплітуди відносно її математичного очікування. Результати моделювання наведені на рисунку 3.43.

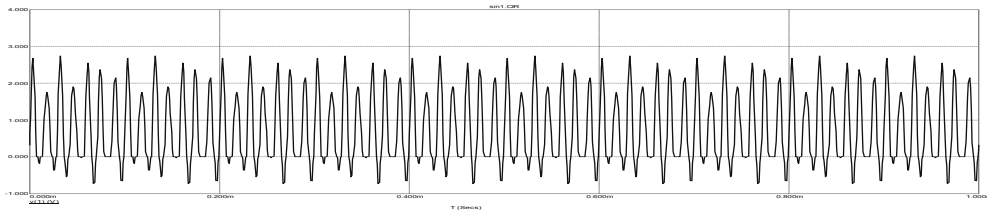


Рисунок 3.43 – Осцилограма струму якіра при інтенсивному іскрінні

В MC11 для проведення спектрального аналізу використовується група математичних FFT-функцій (задаються в графах *Y Expression* вікна *AnalysisLimits*) для обробки частотно-часової інформації з сигналу, яка отримана в результаті аналізу перехідних процесів та графіків АС-аналізу: $HARM(u[,BW])$ – визначає амплітудні значення (середню множину синусних та косинусних функцій) гармонік сигналу $u(t)$. BW – ширина смуги пропускання. У результаті повертаються величини, приведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3– Амплітудні значення гармонік сигналу для функції $HARM(u)$

№ відліку	Зміст
1	H_0 , амплітуда нульової гармоніки або постійна складова
2	H_1 , амплітуда 1-ої гармоніки
3	H_2 , амплітуда 2-ої гармоніки
...	...
N	H_N , амплітуда (N-1)-ої гармоніки

Приклади: $HARM(V(out))$ – амплітуди гармонік напруги ($V(out)$); $HARM(IC(Q1))$ – амплітуди гармонік струму $IC(Q1)$.

- $THD(S[,FR])$ – визначає поточний накопичуючий коефіцієнт гармонійних спотворень спектру S у відсотках відносно амплітуди гармоніки опорної частоти FR (таблиця 3.4); якщо частота FR не вказана, тоді відносно складової на частоті першої гармоніки, яка дорівнює $1/T_{max}$ в аналізі перехідних процесів.

Таблиця 3.4– Значення, отримані при використанні функції THD

№ відліку	Зміст
1	0
2	0
3	Рівень 2-ої гармоніки у % відносно 1-ої гармоніки
4	Рівні 2-ої і 3-ої гармоніки у % відносно 1-ої гармоніки
...	...
N	Сума усіх N-2 гармоніки у % відносно 1-ої гармоніки

Величина відліку з номером m функції THD визначається наступним чином:

$$THD_{m+1} = 100 \cdot \sqrt{\frac{H_2^2 + H_3^2 + H_4^2 + \dots + H_m^2}{H_1^2}}, \quad (3.25)$$

$$\text{де } H_m = \sqrt{[REAL(H_m)]^2 + [IMAG(H_m)]^2}.$$

Приклади: $THD(HARM(V(I)))$ – повний коефіцієнт гармонік напруги $V(I)$; $THD(HARM(I(DI)))$ – повний коефіцієнт гармонік струму $I(DI)$.

- $IHD(S[,FR])$ – визначає коефіцієнт нелінійних спотворень окремих складових спектра S у відсотках відносно амплітуди гармоніки опорної частоти FR (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5 – Значення, які повертає функція IHD

№ відліку	Зміст
1	0
2	0
3	Відношення амплітуд 2-ої до 1-ої гармоніки, виражене у %
4	Відношення амплітуд 3-ої до 1-ої гармоніки, виражене у %
...	...
N	Відношення амплітуд (N-1)-ої до 1-ої гармоніки, виражене у %

Величина відліку функції IHD з номером m визначається виразом:

$$IHD_{m+1} = \frac{100 \cdot \text{mag}(H_m)}{\text{mag}(H_1)}. \quad (3.26)$$

Приклади:

$IHD(HARM(V(A)))$ – індивідуальні коефіцієнти гармонік напруги $V(A)$;

$IHD(HARM(IB(Q1)))$ – індивідуальні коефіцієнти гармонік струму $IB(Q1)$.

$FFT(u)$ – визначає значення класичного прямого перетворення Фур'є дискретних відліків сигналу $u(t)$, тобто ряд коефіцієнтів Фур'є – комплексні величини, дійсна частина яких містить промасштабовану послідовність коефіцієнтів a_N , а уявна – промасштабовану послідовність коефіцієнтів b_N (таблиця 3.6).

Таблиця 3.6 – Значення класичного прямого перетворення Фур'є $FFT(u)$

Відлік	REAL(FFT())	IMAG(FFT())
1	$a_0 * N$	0
2	$a_1 * N/2$	$b_1 * N/2$
3	$a_2 * N/2$	$b_2 * N/2$
...	...	...
N	$a_{N-1} * N/2$	$b_{N-1} * N/2$

Функція FFT відрізняється від $HARM$ множником $N/2$ для гармонік з 1-ої по $(N-1)$ та множником N для 0-ої гармоніки. Приклади: $FFT(V(A))$ – пряме перетворення Фур'є напруги $V(A)$; $FFT(IB(Q1))$ – пряме перетворення Фур'є струму бази $IB(Q1)$. Спектральні характеристики у вікні FFT програми моделювання MC11, осцилограма струму та модель процесу зображенні на рисунку 3.44.

Спектральні характеристики, отримані при більшій кількості періодів зображенні на рисунку 3.45.

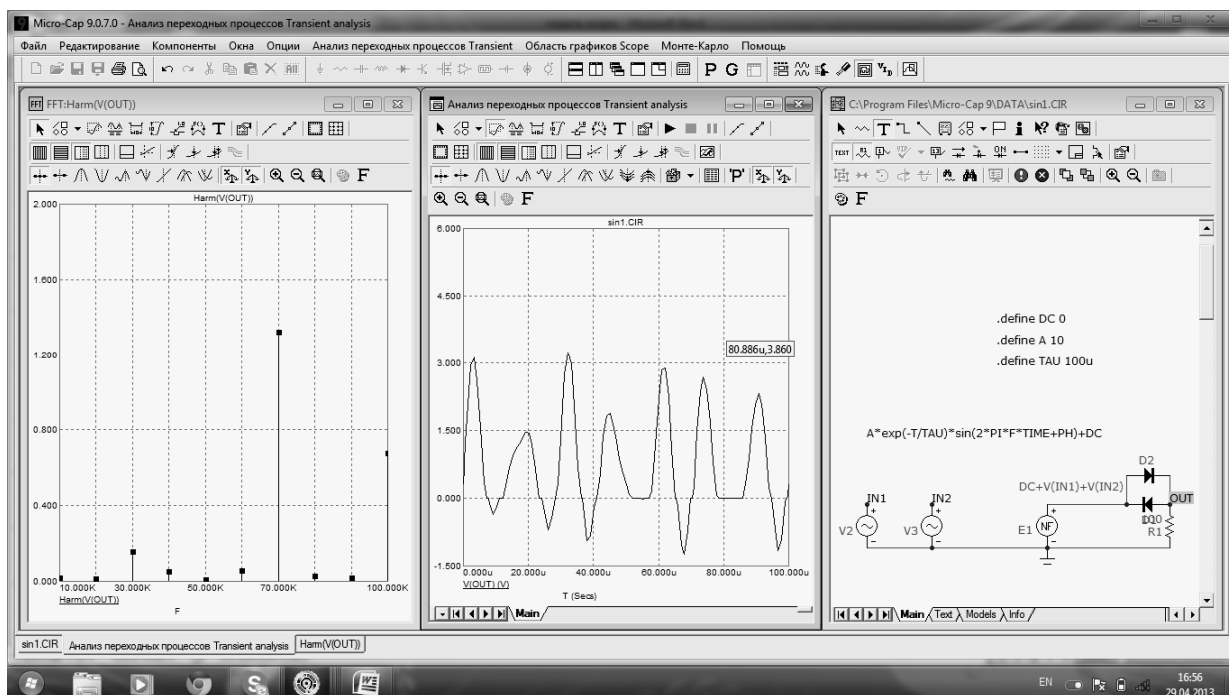


Рисунок 3.44 – Спектральні характеристики у вікні FFT

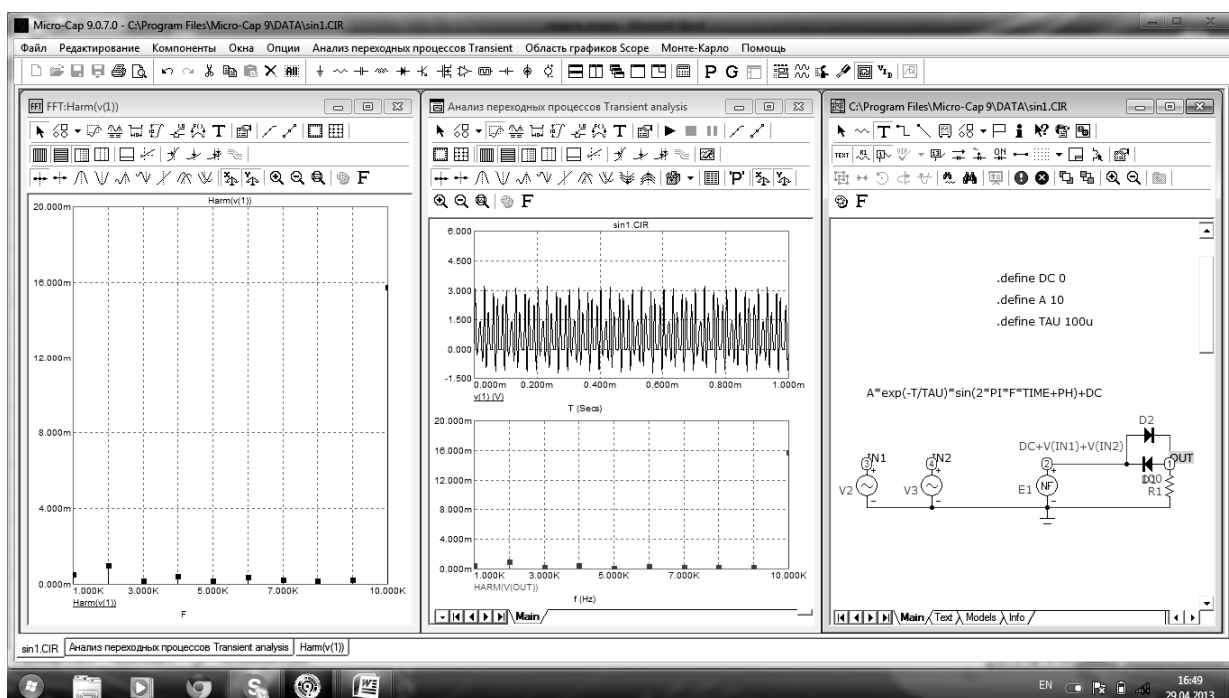


Рисунок 3.45 – Спектральні характеристики

Як бачимо, спектр має визначені спектральні складові, характерні для процесів комутації.

Варіант моделі процесу іскріння при старті та зупинці ДПС наведені на рисунку 3.46 (режим «старт-стоп»).

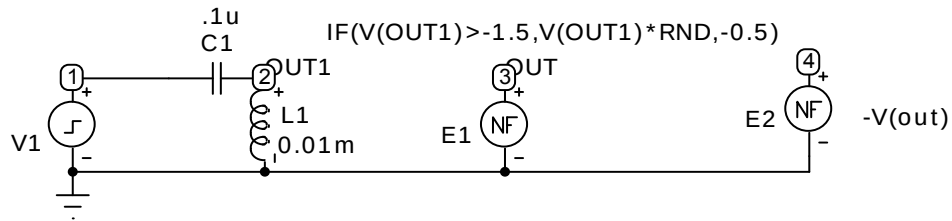


Рисунок 3.46 – Варіант моделі процесу іскріння

На осцилограмах (рисунок 3.47), отриманих по даній моделі, процес іскріння виділений окремо, тобто складова у 50 Гц відфільтрована та результати Фур'є-аналізу (функція *FFT_HARM* (*V(out)*))отримана для комутаційних процесів. Спектральні складові підвищеної амплітуди кратні частоті комутації.

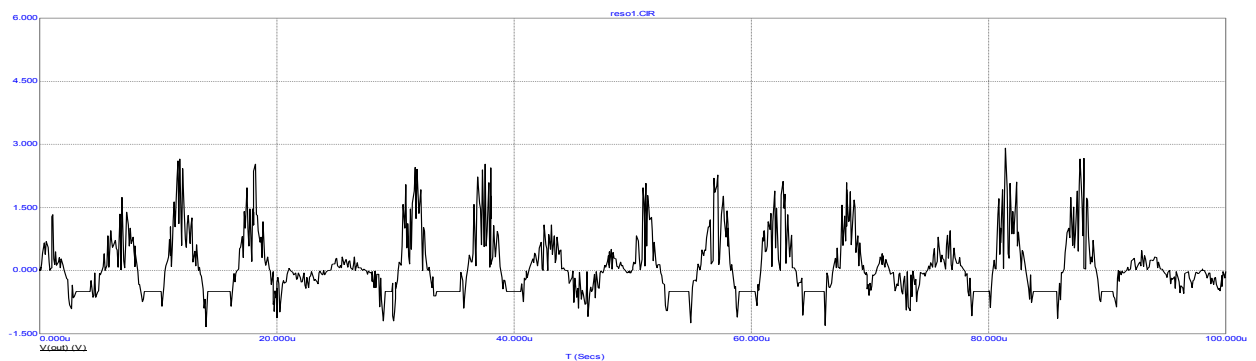
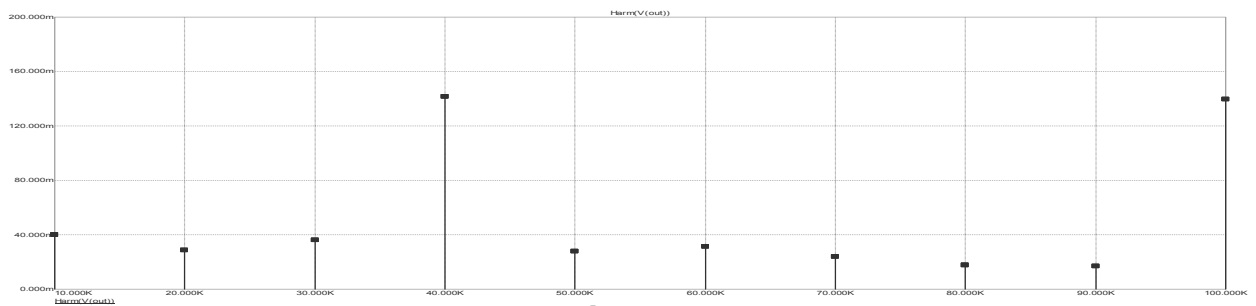


Рисунок 3.47 – Осцилограми після застосування фільтрування

Результати Фур'є-аналізу (спектральні характеристики) процесу іскріння надані на рисунку 3.48.

Рисунок 3.48 – Спектральні характеристики процесу іскріння
в режимі старт-стоп

Спектри перетворюються майже на суцільні, оскільки іскріння має стохастичний характер, щозображено на рисунках 3.49, 3.50.

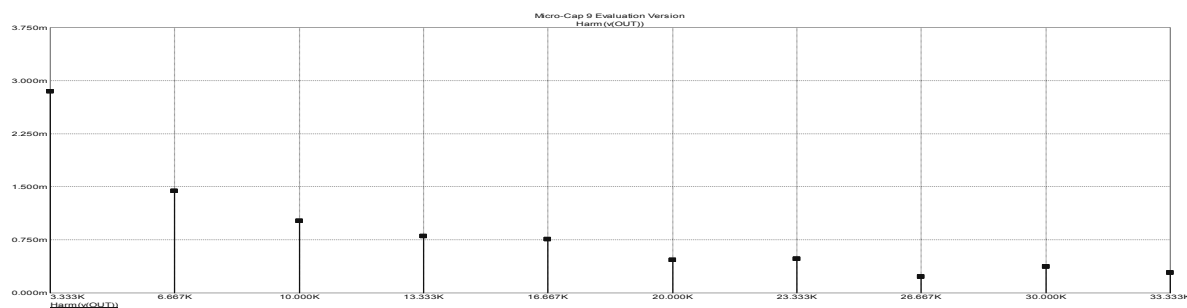


Рисунок 3.49 – Спектр – іскріння (менше 1.5 балів)

Спектр із низкочастотною складовою 50 Гц та частотою пульсації 3000 Гц та кратними частотами (іскріння та круговий вогонь) наведений на рисунку 3.48.

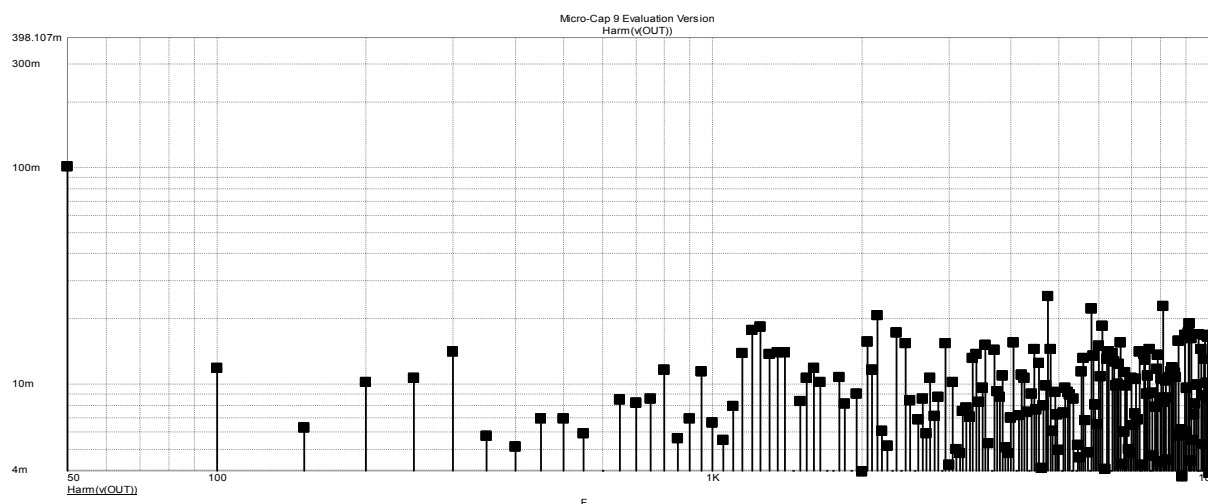


Рисунок 3.50 – Спектр із низкочастотною складовою 50 Гц та частотою пульсації 3000 Гц та кратними частотами (іскріння та круговий вогонь)

Осцилограми, стримані в момент переходу інтенсивного іскріння в круговий вогонь, наведений на рисунку 3.51.

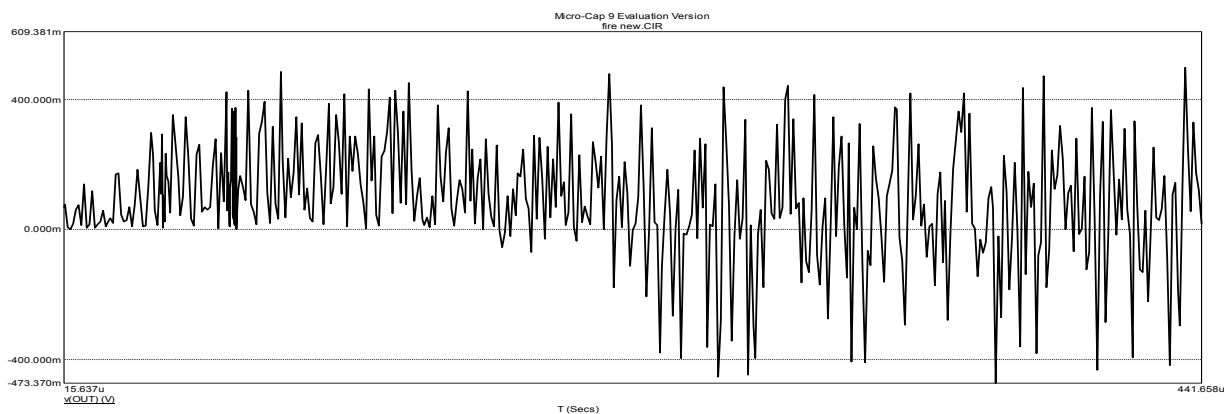


Рисунок 3.51 – Осцилограми струму якіра при інтенсивному іскрінні та круговому вогні

Як бачимо, спектр перетворюється майже на суцільний в області ВЧ, оскільки іскріння має стохастичний характер (плазма).

3.4.1 Методика ідентифікації процесу іскріння в програмі MC11

Для ідентифікації процесу іскріння виконаємо послідовність дій:

а) Запишемо у файл *file.cir* разковий сигнал, отриманий в процесі іскріння (рисунок 3.52 – верхня крива).

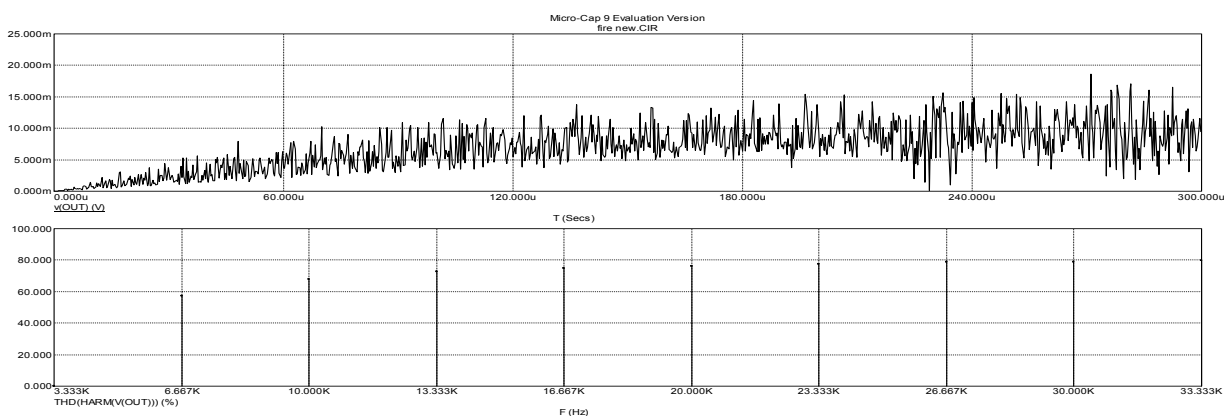


Рисунок 3.52 – Сумарні нелінійні викривлення (коефіцієнт гармонік)

б) Визначимо сумарні нелінійні викривлення, якщо вони більші за 80% – це свідчить із високою імовірністю про початок кругового вогню.

в) В ході моніторингу струму якіра, порівнювати отриманий сигнал із зразковим за допомогою процедури кореляції описаної вище.

Якщо неможливо визначити синусоїдну складову – це свідчить про початок кругового вогню.

3.5 Структура та алгоритм системи моніторингу

На рисунку 3.53 наведено структуру IBC (системи моніторингу) для ДПС.

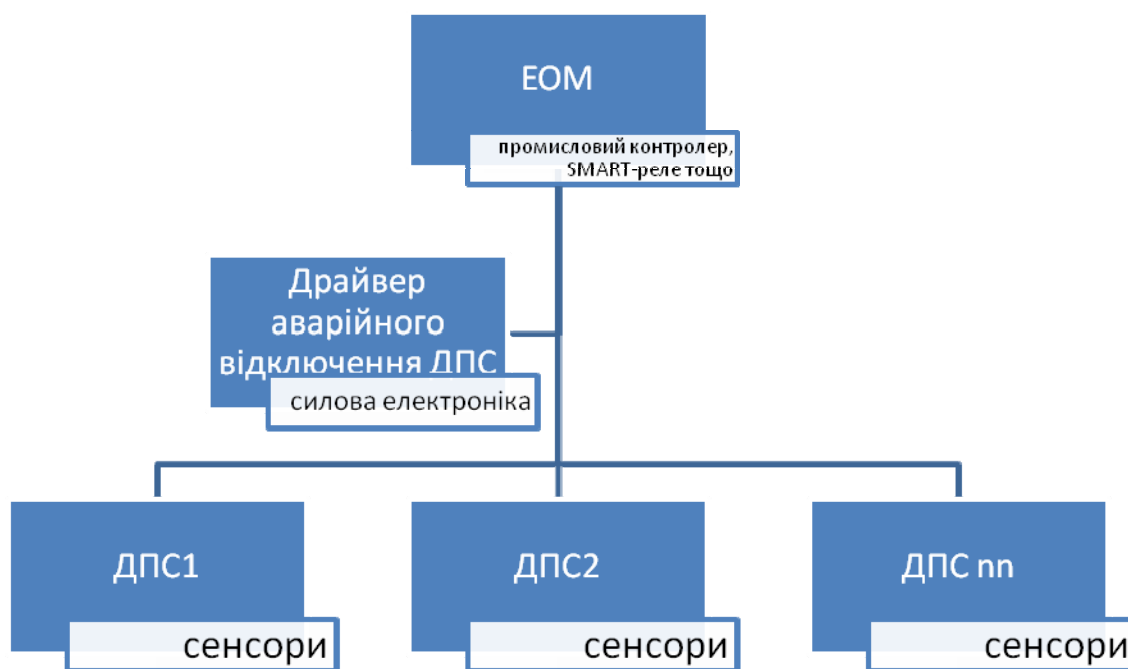


Рисунок 3.53 – Структура IBC

Структура має трьохрівневий ієрархічний порядок, при цьому використовує набагато менше апаратного та програмного забезпечення порівняно із [29,30]. На верхньому рівні засоби математичного аналізу та візуалізації результатів вимірювання поточних значень струму якіра ДПС, обробки результатів.

Апаратне забезпечення експериментальної системи моніторингу складається з датчику Холла [18], плати контролера Arduino із реалізованим на ньому електронним осцилографом [31-33] (Додаток А) та засобів передачі даних в персональний комп'ютер.

На середньому рівні знаходиться підсистема, що монтується до

електроприводу і складається з приладів силової електроніки, драйвери яких отримують команду від промислового контролера, або SMART реле [34], якщо результати аналізу характеристик за методиками, описаними вище вказують на початок небезпечних явищ (високобального іскріння, кругового вогню).

На рисунку 3.54 наведений алгоритм процесу моніторингу.

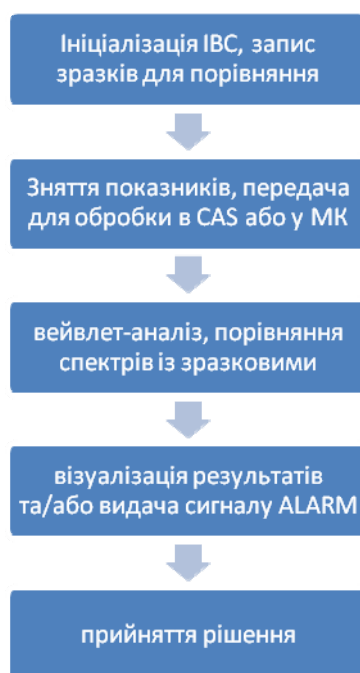


Рисунок 3.54 – Алгоритм процесу моніторингу

Якщо поточні результати свідчать про порушення нормальної роботи ДПС, він відключається на огляд та плановий ремонт. В іншому випадку, система моніторингу продовжує працювати в циклічному режимі.

Оскільки математичне моделювання та аналіз в режимі реального часу ставить жорсткі вимоги до апаратного забезпечення ІВС (що означає досить високу ціну обладнання), має сенс використовувати її для моніторингу кількох ДПС одночасно (якщо це можливо).

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

Одним з найбільш перспективних напрямів розвитку інформаційно-вимірювальних систем для автоматизованого електропривода є використання математичного моделювання в режимі реального часу. Вейвлет-перетворення є досить новим засобом дослідження спектральних характеристик фазових змінних, оскільки воно дозволяє отримати картину розвитку процесу, що, в свою чергу дозволяє прогнозувати стан системи. У випадку тягових двигунів, ціна яких та вартість ремонту є діже дорогими, використання ІВС є вкрай важливим.

При всіх перевагах тягових електроприводів з тяговими електродвигунами постійного струму відзначимо їхній основний і помітний недолік – наявність механічного контакту в щітково-колекторному вузлі тягового електродвигуна [35]. Проблеми (високобальне іскріння, круговий вогонь) значно погіршують техніко-економічні показники ДПС. Моніторинг ДПС, який здійснюється на основі запропонованої ІВС дозволяє запобігти появі цих небезпечних явищ, що підвищує термін служби ДПС та знижує вартість його ремонту/заміни.

Таблиця 4.1 – Порівняльні характеристики тягових електродвигунів [35,36]

Тип двигуна	Маса, кг	Середній ККД	Відносна вартість
Колекторний, постійного струму	99	0,84	1,0
Асинхронний, з коротко замкненим ротором	45	0,935	0,26
Синхронний з електромагнітним порушенням	55	0,93	0,32
Синхронний з постійними магнітами	45	0,935	0,26
Синхронний дисковий з постійними магнітами	34	0,96	0,20

Як бачимо, вартість ДПС, а отже і вартість ремонту порівняно із іншими двигунами значно вища, отже розробка системи моніторингу / ІВС для захисту ДПС є актуальним завданням.

Готові технічні рішення з автоматизації є комплексом програмного та апаратного забезпечення, можуть в себе включати і пуско-налагоджувальні роботи.

Так, фірма *Siemens* пропонує різні рішення для автоматизації електроприводу, в тому числі для моніторингу процесів в різних двигунах, в тому числі, в ДПС. Інформаційно-вимірювальні підсистеми систем автоматичного керування (САК) двигунами базуються на спеціалізованих промислових контролерах, вартість яких сягає \$1000 і вище [29]. Необхідні компоненти для автоматизації на базі апаратного та програмного забезпечення фірми *Siemens* представлені на рис.4.1 [30], та на спеціальному програмному та апаратному забезпеченні, яке поєднується із персональними комп'ютерами, сукупна вартість яких більше \$1000.

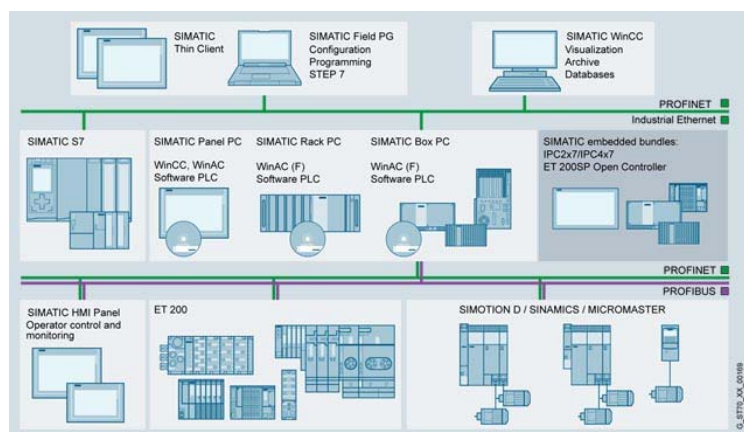


Рисунок 4.2 – Автоматизація на базі забезпечення фірми Siemens

Окремо необхідно придбати програму моніторингу на базі спеціалізованої SCADA системи для організації *HMI* людино-машинного інтерфейсу SIMATIC HMI operator control and monitoring systems (рис.4.2), які коштують від \$600, до яких обов'язково необхідно додавати витрати на апаратне забезпечення, а це також сотні доларів США[30].

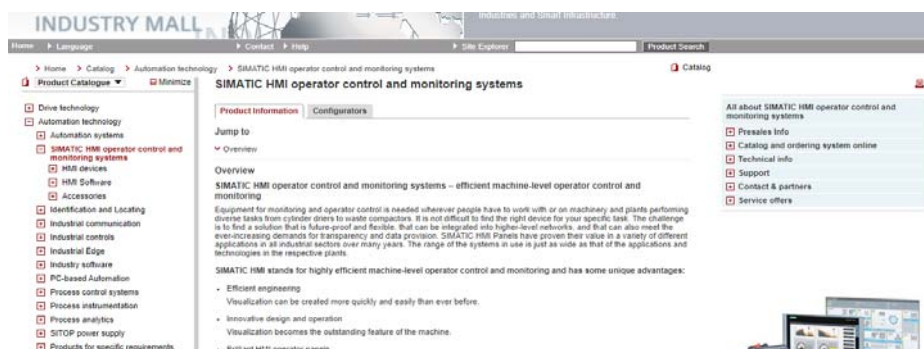


Рисунок 4.2 – Компоненти людино-машинного інтерфейсу системи моніторингу
SIMATIC HMI

Таблиця 4.2– Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Моніторинг та ідентифікація небезпечних явищ в ДПС, збирання даних в ІВС із аналізом спектру в режимі реального часу, передача даних в САК для керування ДПС	1. Моніторинг процесів в ДПС	Попередження аварії в ДПС (високобальне іскріння та круговий вогонь), подовження терміну використання
	2. Захист ДПС	Своєчасне відключення ДПС, економія на ремонті
	3. Розвиток забезпечення САК, ІВС, ECAD та CAS	Розвиток теорії та практики систем автоматичного керування та ІВС, автоматизованого електроприводу тощо

Таким чином, вартість комплексу для автоматизації на базі фірми Siemens коштує приблизно 280000 грн (\$10000). Альтернативна, запропонована в даній роботі система моніторингу спирається на наступні базові елементи: Цифровий осцилограф на Arduino, ціна 476 грн [32]; Датчик Холла 3144E Hall Sensors Module, ціна 25 грн [18]; Програма MatLab [28], яку можна придбати в двох версіях:

1. версія для студентів: Student license (ціна пакету 1600 грн (\$55) та 180 грн (\$6) за кожний додаток),
2. для фізичних осіб версія Home (ціна пакету приблизно 2750 грн (\$95) та 840 грн (\$29) за кожний окремий додаток).

Таким чином, сукупна вартість обладнання та програмного забезпечення в межах 10000 грн (\$344).

Таблиця 4.3– Попередня характеристика потенційного ринку

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Головні конкуренти	Siemens
		EATON
2	Динаміка ринку (якісна оцінка)	зростає
3	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Не обмежується автоматизованим електроприводом
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає

4.2 Визначення трудомісткості та тривалості робіт

Планування розробки та проведення досліджень ІВС для ДПС здійснюється за допомогою методу мережевого планування і управління (МПУ), що істотно знижує

терміни розробки. В результаті цього етапу визначаються тривалість і трудомісткість робіт з проектування системи [37].

Система МПУ включає:

- складання переліку етапів і визначення тривалості виконання робіт;
- побудова мережного графіка;
- розрахунок основних параметрів мережного графіка.

Весь комплекс розробки проекту підрозділяється на етапи. По кожному з етапів розраховується трудомісткість, виконавці і тривалість робіт. Так як в процесі розрахунку трудомісткості робіт є елемент невизначеності, розрахунок ведеться за допомогою імовірнісної оцінки згідно з формулою:

$$t_{oc} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5} \quad (4.1)$$

де t_{oc} – очікувана оптимальна оцінка часу виконання роботи;

t_{min} – мінімально необхідний час на виконання роботи при найбільш сприятливих умовах, днів;

t_{max} – максимальні витрати часу на виконання роботи при несприятливих умовах.

Правильність визначення t_{oc} перевіряється розрахунком дисперсії - розкиду між мінімальною і максимальною оцінками часу. Дисперсія являє собою середнє значення квадрата відхилення тривалості роботи від її очікуваного значення і визначається за формулою:

$$\sigma^2(t) = \left(\frac{t_{max} - t_{min}}{5} \right)^2 \quad (4.2)$$

Якщо $\sigma^2(t) \leq 1$, то ступінь невизначеності оцінки часу робіт по даному етапу мала. Розраховані згідно (4.1) – (4.2) характеристики робіт наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4– Загальна тривалість етапів робіт

№	Найменування роботи	Тривалість, дні			Дисперсія	Виконавці	
		$t_{\min}$	$t_{\max}$	$t_{\text{оч}}$		Спеціальність	Кількість б, чол.
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Уточнення проектного завдання	1	3	1,8	0,16	Інженер-електронік	1
2	Узгодження теми	2	5	3,2	0,36	Інженер-технолог	1
3	Ознайомлення з методами захисту та моніторингу ДПС	5	8	6,2	0,36	Інженер-електронік	1
4	Складання методики дослідження параметрів ДПС	5	8	6,2	0,36	Інженер-технолог	1
5	Підбір та вивчення літератури	5	8	6,2	0,36	Інженер-електронік	1
6	Спектральний аналіз струмів, отриманих в експерименті	12	15	13,2	0,36	Інженер-електронік	1
7	Складання методики ідентифікації процесів кругового вогню в ДПС	3	6	4,2	0,36	Інженер-електронік	1
8	Аналіз отриманої інформації	7	10	8,2	0,36	Інженер-електронік	1
9	Складання розділу з охорони праці	7	8	7,4	0,04	Інженер-електронік	1
10	Аналіз економічності проектного завдання	7	8	7,4	0,04	Інженер-електронік	1
11	Оформлення проектного завдання	5	7	5,8	0,16	Інженер-технолог	1
Загалом:		59	86	69,8			11

4.3 Побудова мережного графіка

Сітьовий графік являє собою інформаційно-динамічну модель, в якій зображуються взаємозв'язки і результати всіх робіт, необхідних для досягнення кінцевої мети розробки. Використовуючи таблицю 4.4, складено перелік робіт та подій (таблиця 4.5), побудовано мережний графік проведення НДР і розраховано основні параметри.

Таблиця 4.5– Перелік робіт мережного графіка

№	Код роботи	Найменування роботи	Тривалість, дн.
1	2	3	4
1	0–1	Уточнення проектного завдання	2
2	1–2	Узгодження теми	3
3	2–3	Ознайомлення з методами захисту та моніторингу ДПС	6
4	2–4	Складання методики дослідження параметрів ДПС	6
5	3–5,4–5	Підбір та вивчення літератури	6
6	5–6	Спектральний аналіз струмів, отриманих в експерименті	13
7	5–7	Складання методики ідентифікації процесів в ДПС	5
8	6–8,7–8	Аналіз отриманої інформації	8
9	8–9	Складання розділу з охорони праці	7
10	9–10	Аналіз економічної ефективності проектного завдання	7
11	10–11	Оформлення проектного завдання	7

На рисунку 4.3 зображено розрахований мережний графік.

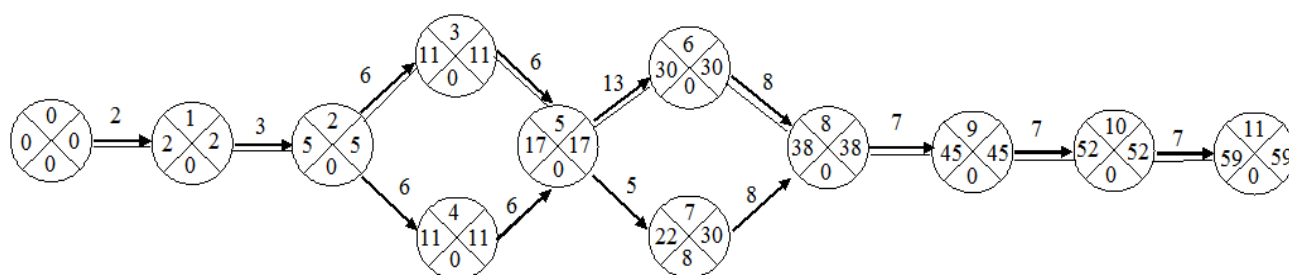


Рисунок 4.3–Мережний графік

Після проектування мережного графіка визначаємо його параметри.

Отримані результати наведені в таблицях 4.6, 4.7.

Таблиця 4.6– Параметри шляхів

№ шляху	Номери подій	Тривалість робіт	Довжина шляху	Резерв часу	K_n , %
1	2	3	4	5	6
1 Критичний	0-1-2-3-5-6-8-9-10-11	2-3-6-6-13-8-7-7-7	59	0	100
2	0-1-2-3-5-7-8-9-10-11	2-3-6-6-5-8-7-7-7	51	8	80
3	0-1-2-4-5-7-8-9-10-11	2-3-6-6-5-8-7-7-7	51	8	80

де K_n – напруженість шляху, яка визначається за формулою:

$$K_{Hi} = \frac{L_i - L_i^{kp}}{L_{kp} - L_i^{kp}} \quad (4.3)$$

де L_i – i -го довжина шляху;

L_i^{kp} – довжина i -го шляху на подіях де він співпадає з критичним;

L_{kp} – довжина критичного шляху.

Таблиця 4.7– Параметри робіт

Код роботи	t_{ij}	t_{ij}^{pn}	t_{ij}^{p3}	t_{ij}^{nn}	t_{ij}^{n3}	R_{ij}^n	R_{ij}^e
0-1	2	0	2	0	2	0	0
1-2	3	2	5	2	5	0	0
2-3	6	5	11	5	11	0	0
2-4	6	5	11	5	11	0	0
3-5	6	11	17	11	17	0	0
4-5	6	11	17	11	17	0	0
5-6	13	17	30	17	30	0	0
5-7	5	17	22	25	30	8	0
6-8	8	30	38	30	38	0	0
7-8	8	22	30	30	38	8	8
8-9	7	38	45	38	45	0	0
9-10	7	45	52	45	52	0	0
10-11	7	52	59	52	59	0	0

В таблицях використані позначення:

i – номер події, яка передуює роботі;

j – номер події, яка завершує роботу;

t_{ij} – тривалість виконання роботи;

t_{ij}^{pn} – ранній термін початку події;

t_{ij}^{p3} – ранній термін звершення події;

t_{ij}^{nn} – пізній термін початку події;

t_{ij}^{no} – пізній термін звершення події;

R_{ij}^n – повний резерв часу роботи;

R_{ij}^e – вільний резерв часу роботи.

Тривалість критичного шляху складає 59 днів. При послідовному проведенні дослідження вимагає 70 днів. Виконання НДР за параметрами сітьового планування дозволяє суттєво скоротити строки робіт (до 51 дня).

4.4 Розрахунок кошторису витрат на проведення НДР

У складі витрат на проведення дослідження систем моніторингу тягових електродвигунів постійного струму враховується вартість всіх ресурсів, необхідних для реалізації комплексу робіт [37].

З метою визначення витрат на проведення науково-дослідницької роботи складено кошторис витрат (таблиця 4.8)[37].

Таблиця 4.8 – Кошторис витрат на виконання НДР

Статті витрат	Сума	
	Грн.	частка, %
Матеріали	1344	1,71
Спеціальне устаткування	32427	40,46
Основна і додаткова заробітна плата персоналу	30060,44	37,50
Енергоносії	1505,09	19,02
Відрахування на соціальне страхування	6613,30	8,08
Накладні витрати	8199,1	10,23
Всього витрати на проведення НДР	80148,93	100

4.4.1 Розрахунок вартості матеріалів

На цю статтю відносяться витрати з придбання основних матеріалів для проведення досліджень, а також для виготовлення дослідних зразків (таблиця 4.9).

Таблиця 4.9– Розрахунок вартості матеріалів

Матеріал	Одиниця виміру	Витрати матеріалу, шт.	Ціна за одиницю, грн./шт.	Сума витрат, грн.
Папір	Пачка	3	105	315
Канцелярські товари	Штук	8	50	400
Плакати	Штук	10	21,5	215
Заправка картриджу на принтер	Штук	1	350	350
Разом				1280
Транспортно-заготівельні витрати				64
Всього з урахуванням транспортно-заготівельних витрат				1344

Ціни на матеріальні ресурси визначені за відповідними прайс-листами.

Транспортно-заготівельні витрати складають 5% від вартості матеріалів.

4.4.2 Розрахунок вартості енергоресурсів

В таблиці 4.10 наведений розрахунок вартості енергоресурсів

Таблиця 4.10 – Розрахунок вартості матеріалів

Найменування устаткування	Вид енерго-ресурсу	Установлена потужність, кВт	Тривалість використан-ня, год.	Тариф за кВт год, грн.	Вартість енергоресурсів, грн
Комп'ютер 1	Е/енергія	0,5	560	2,68	750,40
Комп'ютер 2	Е/енергія	0,5	560		750,40
Принтер	Е/енергія	0,1	16		4,29
Усього					1505,09

4.4.3 Спеціальне устаткування для науково - експериментальних робіт

В цій статті враховуються витрати на закупівлю, доставку і монтаж лабораторних установок, вимірювальних і регулюючих приладів, пристроїв, випробувальної апаратури і тому подібне (таблиця 4.11).

Таблиця 4.11 – Витрати на спеціальне устаткування

Перелік устаткування	Модель	Кількість	Ціна за одиницю, грн.
1	2	3	4
Ноутбук	Lenovo IP1-14ADA05 (82GW000CRA) PlatinumGrey	2	9999
Комп'ютерна миша	Миша бездротова Esperanza TM116R (5901299911549)	2	129
Принтер для ч/б друку	HP Laser07r (5UE14A)	1	3699
Програмне забезпечення (системне)	Microsoft 365 Personal	2	1539
Програмне забезпечення (прикладне), для мережі	Matlab+2 додатки	1	1920
Датчик Холла	3144E HallSensorsModule	2	50
Осцилограф на базі Arduino	Arduino Oscilloscope	1	476
Разом			29479
Транспортні витрати			2948
Всього з урахуванням транспортно-заготівельних витрат			32427

4.4.4 Розрахунок заробітної плати

Витрати по цій статті складаються з планового фонду заробітної плати усіх

категорій працівників, зайнятих в проведенні наукових досліджень [38]. Розрахунок заробітної плати зроблений на підставі даних про трудомісткість (таблиця 4.12).

Таблиця 4.12– Розрахунок основної заробітної плати

Посада	Кількість людей	Місячний оклад, грн.	Середньоденна з/п, грн.	Кількість робочих днів	Сума з/п, грн.
Інженер-електронік	1	9000	409,09	54	22090,90
Інженер-технолог	1	7500	327,27	16	5236,32
Всього					27327,22
Додаткова заробітна плата					2733,22
Разом					30060,44

Додаткова заробітна плата складає 10% від основної заробітної плати штатних працівників.

4.4.5 Відрахування на соціальні заходи

Ці витрати визначаються в розмірі 22 % від основної й додаткової заробітної плати і складають 6613,30 грн.

4.4.6 Накладні витрати

Накладні витрати (витрати, пов'язані з управлінням, утриманням і експлуатацією устаткування й приміщень, створенням необхідних санітарно-гігієнічних умов) по проведенню науково-дослідницької роботи визначені у відсотках (30 %) від основної заробітної плати її виконавців і складають 8199,1 грн.

4.4.7 Бальна оцінка економічної ефективності науково-дослідної роботи

Для теоретичних досліджень у більшості випадків важко чи навіть неможливо розрахувати економічний ефект, тому доцільно визначити їхню техніко-економічну ефективність з урахуванням наступних показників[37]:

- важливість дослідження;

- складності розробки;
- результативності й можливості використання.

Важливість теоретичного дослідження оцінюють по його призначенню:

- рішення проблемних питань;
- задоволення вимог спеціальної техніки; пошук принципово нових конструктивних і технологічних рішень і т.п.

Складність виконання роботи визначають порівнянням отриманих результатів даного дослідження з результатами відомих аналогічних досліджень з обліком грошових і трудових витрат на їхнє проведення.

Результативність НДР можна визначити по повноті рішень поставленого завдання: отриманий результат відповідає плановому, задовільний (часткове рішення) чи негативний.

Аналіз залежності між цими показниками й витратами на їхнє досягнення дає можливість кількісної оцінки техніко-економічної ефективності теоретичних НДР по формулі:

$$K_{\text{НДР}} = \frac{J^n \cdot R \cdot T}{B_{\text{НДР}} \cdot t_{\text{НДР}}} \quad (3.4)$$

де $K_{\text{НДР}}$ – рівень ефективності дослідження (коефіцієнт техніко-економічної ефективності НДР);

$J = 4$ – важливість роботи. Таке значення обрали, тому що результати роботи являються базовим матеріалом для систем моніторингу тягових ДПС;

$R = 5$ – результативність роботи. Обрали таке значення, тому що всі поставлені дослідницькі задачі виконано. Розроблено математичне та програмне забезпечення ІВС для ідентифікації небезпечних явищ в ДПС;

$T = 5$ – технічна складність виконання НДР, тому що при виконанні розрахунків використовувався спектральний аналіз.

$B_{\text{НДР}} = 80148,93$ тис. грн – витрати на проведення НДР;

$t_{\text{НДР}} = 59$ днів – час проведення НДР;

$n = 4$ – показник використання результатів НДР

При значенні $K_{НДР} \geq 1$ дослідницька робота вважається ефективною.

Отже, розрахуємо $K_{НДР}$:

$$K_{НДР} = (4^4 \cdot 5 \cdot 5) / (80148,93 \cdot 0,16) = 1,98$$

Отже, рівень ефективності дослідження $K_{НДР} = 1.98$, що більше 1, тому робимо висновок, що дана дослідницька робота є ефективною.

4.5 Висновки

При послідовному проведенні дослідження вимагає 70 днів. Виконання НДР за параметрами сітьового планування дозволяє скоротити строки робіт до 59 днів.

При виконанні дослідження отримали такі результати: кошторис витрат на виконання НДР складає 80148,93грн.

Економічна ефективність науково-дослідницької роботи $K_e = 1,98$, що більше 1, це свідчить про те, що дослідницьку роботу можна вважати ефективною.

Розроблена система моніторингу дозволяє суттєво зменшити витрати на ремонт тягових електродвигунів та збільшити ресурс безперебійної роботи.

Отримані наукові результати можуть бути використані для розробки новітніх ІВС та САК для автоматизованого електроприводу.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Аналіз потенційних небезпек

Математичне забезпечення ІВС для контрольованого двигуназа темою магістерської роботи розробляється на персональному комп'ютері, а отже при роботі з комп'ютером на людину можуть впливати небезпечні виробничі фактори [39-43]:

- ураження електричним струмом;
- виникнення пожежі;
- можливість механічного травмування;
- опіки в результаті випадкового контакту з гарячими поверхнями всередині лазерного принтера.

До шкідливих фізичних виробничих факторів належать :

- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищений рівень статичної електрики;
- небезпека ураження електричним струмом;
- знижена або підвищена вологість і рухливість повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму;
- підвищені рівні запиленості повітря робочої зони;
- підвищений рівень вібрації;
- підвищений рівень інфразвукових коливань;
- рівень ультразвуку;
- підвищена або знижена іонізація повітря;
- підвищений рівень іонізуючих випромінювань у робочій зоні;
- підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- підвищена напруженість електричного поля;
- підвищена напруженість магнітного поля;

- відсутність або нестача природного світла;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена яскравість світла;
- знижена контрастність;
- прямий і відбитий блиск;
- підвищена пульсація світлового потоку

До психофізіологічних виробничих факторів належать:

- напруга зору;
- напруга уваги;
- інтелектуальні та емоційні навантаження;
- тривалі статичні навантаження;
- монотонність праці;
- великі інформаційні навантаження;
- нераціональна організація робочого місця (ергономічні фактори).

До біологічних виробничих факторів належать

- кондиціонери;
- вентиляційні системи.

5.2 Заходи з забезпечення безпеки

Для приміщень, офісів, лабораторій, обладнаних персональними комп'ютерами (далі ПК) із моніторами, визначаються ергономічні характеристики моніторів [43].

Відповідно до вимог розділу «Мінімальні вимоги з охорони праці», директиви ЕС 90/270 ЕЕС виконані основні вимоги до моніторів, які жорстко регламентують безпечні умови роботи і захист здоров'я осіб, що працюють з комп'ютерами:

- символи на екрані чіткі і добре розрізняються;
- зображення позбавлене блимання;
- яскравість та / або контрастність легко регулюються;
- екрани вільні від відблисків і відбиття;

- випромінювання знижені до надзвичайно малих рівнів.

Більшість шкідливих факторів перелічені в [39-49].

Вимоги електробезпеки у приміщеннях, де встановлені електронно-обчислювальні машини і персональні комп'ютери (далі – ЕОМ) відображені у ДНАОП 0.00-1.31-99. Відповідно до цього нормативного документу під час проєктування систем електропостачання, монтажу основного електрообладнання та електричного освітлення будівель та приміщень для ЕОМ необхідно дотримуватись вимог Правил влаштування електроустановок(ПВЕ), ПТЕ, ПВЕ, ВСН 59-88 "Электрооборудование жилых и общественных зданий. Нормы проектирования", СН 357-77 "Инструкция по проектированию силового осветительного оборудования промышленных предприятий", Правил пожежної безпеки в Україні та інших нормативних документів, що стосуються штучного освітлення і електротехнічних пристроїв, а також вимог нормативно-технічної експлуатаційної документації заводу-виробника[40-49].

Лінія електромережі для живлення ЕОМ, периферійних пристроїв ЕОМ та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ЕОМ виконується як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів і прокладається від стійки групового розподільчого щита, розподільчого пункту до розеток живлення

У приміщенні, де одночасно експлуатується або обслуговується більше п'яти персональних ЕОМ, на помітному та доступному місці встановлено аварійний резервний вимикач, який може повністю вимкнути електричне живлення приміщення, крім освітлення.

Неприпустимим є підключення ЕОМ, периферійних пристроїв ЕОМ та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ЕОМ до звичайної двопровідної електромережі, в тому числі — з використанням перехідних пристроїв.

При розташуванні в приміщенні за його периметром до 5 персональних ЕОМ, використанні трипровідникового захищеного проводу або кабелю в оболонці з

негорючого або важко горючого матеріалу дозволяється прокладання їх без металевих труб та гнучких металевих рукавів.

Металеві труби та гнучкі металеві рукави заземлені. Заземлення відповідає вимогам ДНАОП 0.00-1.21-98 "Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів". Заземлені конструкції, що знаходяться у приміщеннях (батареї опалення, водопровідні труби, кабелі із заземленим відкритим екраном тощо), мають бути надійно захищені діелектричними щитками або сітками від випадкового дотику.

Конструкція знімної підлоги забезпечує:

- вільний доступ, до кабельних комунікацій під час обслуговування;
- стійкість до горизонтальних зусиль при частково знятих плитах;
- вирівнювання поверхні підлоги за допомогою регулювальних опорних елементів;
- взаємозамінюваність плит.

Є неприпустимими:

- експлуатація кабелів та проводів з пошкодженою або такою, що втратила захисні властивості за час експлуатації, ізоляцією; залишення під напругою кабелів та проводів з неізольованими провідниками;
- застосування саморобних продовжувачів, які не відповідають вимогам ПВЕ до переносних електропроводок;
- застосування для опалення приміщення нестандартного (саморобного) електронагрівального обладнання або ламп розжарювання;
- користування пошкодженими розетками, розгалужувальними та з'єднувальними коробками, вимикачами та іншими електровиробами, а також лампами, скло яких має сліди затемнення або випинання;
- підвішування світильників безпосередньо на струмопровідних проводах, обгортання електроламп і світильників папером, тканиною та іншими горючими матеріалами, експлуатація їх зі знятими ковпаками (розсіювачами);
- використання електроапаратури та приладів в умовах, що не відповідають вказівкам (рекомендаціям) підприємств-виробників.

5.3 Заходи з промислової санітарії та гігієни праці

Робочі місця офісних працівників, обладнані персональними комп'ютерами (далі – робочі місця), повинні відповідати вимогам «Правил охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин», затверджених Наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 26.03.2010 року № 65 (Правила), та «Державних санітарних правил і норм роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин», затверджених постановою Головного державного санітарного лікаря України від 10.12.98N7 (ДСанПіН 3.3.2-007-98). Правила поширюються на всіх суб'єктів господарювання незалежно від форм власності, які у своїй діяльності здійснюють роботу, пов'язану з персональними комп'ютерами, у тому числі на тих, які мають робочі місця, обладнані персональними комп'ютерами і периферійними пристроями. Зазначені нормативно-правові акти встановлюють санітарно-гігієнічні вимоги до приміщення, в якому розташоване робоче місце, власне до робочого місця, освітлення, рівнів вібрації і шуму, мікроклімату в приміщенні тощо[48,49].

Будівлі та приміщення, де розміщені робочі місця, повинні відповідати вимогам нормативно-технічної та експлуатаційної документації виробника персональних комп'ютерів ДСанПіН 3.3.2-007-98 та Правил. Будівлі та приміщення, де розміщені робочі місця операторів, мають бути не нижче другого ступеня вогнестійкості. Для всіх будівель і приміщень, де знаходяться робочі місця, повинно бути визначено клас зони згідно з НПАОП 40.1-1.01-97. Відповідне позначення повинно бути нанесено на вхідних дверях кожного приміщення. Робота на ПЕОМ по тяжкості відноситься до категорії ІА чи ІБ. Площа приміщення має бути не менше 6,0 кв. м. із розрахунку на одне робоче місце, а об'єм – не менше 20,0 м³.

Віконні прорізи приміщень для роботи з персональними комп'ютерами мають бути обладнані регульованими пристроями (жалюзі, завіски, зовнішні козирки). Для внутрішнього оздоблення приміщень з персональними комп'ютерами слід

використовувати дифузно-відбивні матеріали з коефіцієнтами відбиття для стелі 0,7-0,8, для стін 0,5-0,6. Покриття підлоги повинне бути матовим з коефіцієнтом відбиття 0,3-0,5. Поверхня підлоги має бути рівною, неслизькою, з антистатичними властивостями. Забороняється для оздоблення інтер'єру приміщень з персональними комп'ютерами застосовувати полімерні матеріали (деревинно-стружкові плити, шпалери, що миються, рулонні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик тощо), що виділяють у повітря шкідливі хімічні речовини. Полімерні матеріали для внутрішнього оздоблення приміщень з персональними комп'ютерами можуть бути використані при наявності дозволу органів та установ державної санітарно-епідеміологічної служби. Приміщення можуть обладнуватись шафами для зберігання документів, магнітних дисків, полицями, стелажми, тумбами тощо з урахуванням вимог до площі приміщень [41,42].

При розміщенні робочих столів з персональними комп'ютерами слід дотримувати:

- відстань між бічними поверхнями персональних комп'ютерів 1,2 м.;
- відстань від тильної поверхні одного персонального комп'ютера до екрана іншого – 2,5 м.

Конструкція робочого столу має відповідати сучасним вимогам ергономіки і забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні використовуваного обладнання (дисплея, клавіатури, принтера) і документів. Висота робочої поверхні робочого столу має регулюватися в межах 680-800 мм, а ширина і глибина – забезпечувати можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: 600-1400мм, глибина – 800-1000мм).

Робочий стілець має бути підйомно-поворотним, регульованим за висотою, з кутом і нахилу сидіння та спинки і за відстанню від спинки до переднього краю сидіння поверхня сидіння має бути плоскою, передній край – заокругленим. Регулювання за кожним із параметрів має здійснюватися незалежно, легко і надійно фіксуватися. Поверхня сидіння і спинки стільця має бути напівм'якою з нековзним, повітронепроникним покриттям, що легко відчищається та не електризується.

Робочі місця слід розташовувати відносно світових прорізів так, щоб природне світло падало переважно з лівого боку. Монітор має розташовуватися на оптимальній відстані від очей користувача, що становить 600-700мм, але не ближче ніж за 600мм з урахуванням розміру літерно-цифрових знаків і символів. Розташування екрана монітору має забезпечувати зручність зорового спостереження у вертикальній площині під кутом +30 градусів до нормальної лінії погляду працівника. Клавіатуру слід розташовувати на поверхні столу на відстані 100-300 мм від краю, звернутого до працюючого. У конструкції клавіатури має передбачатися опорний пристрій (виготовлений із матеріалу з високим коефіцієнтом тертя, що перешкоджає мимовільному її зсуву), який дає змогу змінювати кут нахилу поверхні клавіатури у межах 5-15 градусів[43].

На робочому місці користувачів повинні забезпечуються оптимальні параметри мікроклімату. На роботах, вироблених сидячи і не потребують фізичного напруження, температура повітря повинна бути в холодний період року від 22 до 24°C, теплий період року – від 23 до 25 ° С. Відносна вологість повітря на постійних робочих місцях повинна становити 40-60%, швидкість руху повітря повинна бути 0,1 м / с. Для підвищення вологості повітря в приміщеннях слід застосовувати зволожувачі повітря у відповідності до ГОСТ 12.1.005-88, СН 4088-86.

Приміщення, в яких встановлені персональні комп'ютери, повинні мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН в.25-28-2006.

- Робочі столи слід розміщувати таким чином, щоб дисплеї/ термінали були орієнтовані бічною стороною до світлових прорізів, а природне світло падало переважно ліворуч.

- Штучне освітлення в приміщеннях для експлуатації ПЕОМ повинне здійснюватися системою загального рівномірного освітлення.

- Освітленість на поверхні столу в зоні розміщення робочого документа повинна бути 300 - 500 лк.

- Слід обмежувати відбиту блискість на робочих поверхнях (екран, стіл, клавіатура та ін.) За рахунок правильного вибору типів світильників і розташування робочих місць по відношенню до джерел природного та штучного освітлення, при

цьому яскравість відблисків на екрані ПЕОМ не повинна перевищувати 40 кд / м² і яскравість стелі не повинна перевищувати 200 кд / м².

- Рівні шуму на робочих місцях користувачів персональних комп'ютерів не повинні перевищувати значень, встановлених СанПіН 2.2.4 / 2.1.8.562-96 і становлять не більше 50 дБА[41].

- При виконанні робіт з використанням ПЕОМ у виробничих приміщеннях рівень вібрації не повинен перевищувати допустимих значень вібрації для робочих місць (категорія 3, тип «в») відповідно до діючих санітарно-епідеміологічними нормативами.

- Устаткування, що становить джерело шуму (АЦП, принтери тощо), слід розташовувати поза приміщеннями, де знаходяться робочі місця. Для забезпечення допустимих рівнів шуму на робочих місцях слід застосовувати засоби звукопоглинання, вибір яких має обґрунтовуватись спеціальними інженерно-акустичними розрахунками.

Для зниження впливу електростатичного поля необхідно

- встановлювати нейтралізатори статичної електрики;
- підтримувати в приміщенні відносну вологість не нижче 45-50% (чим сухіше повітря, тим більше електростатичний заряд);
- підлогу в приміщенні застелити антистатичним лінолеумом і щодня проводити вологе прибирання;
- обмежити кількість полімерних матеріалів в приміщенні;
- протирати екран і робоче місце спеціальної антистатичної серветкою; для зняття заряду кілька разів на день мити руки і обличчя водою, а також періодично торкатися металевих предметів.

Розрахунок нормалізації теплового режиму

Визначаємо значення прямої $q_{B.П.}$ та розсіяної $q_{B.P.}$ сонячної радіації о 18 годині для розташування приміщення на північному заході:

$$q_{B.П.} = 426 \text{ ккал} / (\text{год} * \text{м}^2); q_{B.P.} = 93 \text{ ккал} / (\text{год} * \text{м}^2) \quad (5.1)$$

Кількість теплоти, що надходить до приміщення через подвійне скління для розрахункової години розраховуємо:

$$q_0 = (q_{B.II.} + q_{B.P.})K_1R_2 = (426 + 93) * 0.9 * 1.58 = 558.25 \text{ ккал} / (\text{год} * \text{м}^2) \quad (5.2)$$

$$q_1 = q_{B.P.}K_1R_2 = 93 * 0.9 * 1.58 = 132.25 \text{ ккал} / (\text{год} * \text{м}^2) \quad (5.3)$$

Площа віконного прорізу, яка опромінюється сонячною радіацією складає:

$$F_{\text{пр}} = F_{O.C.} - F_P = 2.4 - 0.27 = 2.13 \text{ м}^2 \quad (5.4)$$

Загальна кількість теплоти, яка надходить до приміщення через віконний проріз, визначається за формулою:

$$Q_{C.пр.} (q_0 F_n + q_1 F_p) K_{відн} = (558.25 * 2.13 + 132.25 * 0.27) = 1224.7 \text{ ккал} / (\text{год} * \text{м}^2) \quad (5.5)$$

Виділення теплоти від штучного освітлення розраховують:

$$Q_{осв} = 860 * N_{осв} = 860 * 0.5 * 0.8 = 344 \text{ ккал} / \text{год} \quad (5.6)$$

Розрахунок відселення теплоти людьми, що знаходяться в приміщенні:

$$Q_l = 860 + 130 * 6 * 0.85 = 1443 \text{ ккал} / \text{год} \quad (5.7)$$

Загальна кількість теплоти в розраховану годину в липні, яку необхідно відвести за допомогою кондиціонування, визначається сумою теплоти джерел теплонадходження:

$$Q_{заг} = Q_{с.пр.} + Q_{осв} + Q_l = 1224.7 + 344 + 1443 = 3011.7 \text{ ккал} / \text{год} \quad (5.8)$$

5.4 Заходи з пожежної безпеки

Пожежна безпека забезпечується виконанням вимог Правил пожежної безпеки в Україні, НПАОП 0.00-1.28-10, ГОСТ 12.1.004-91 «Пожежна безпека. Загальні

вимоги". Будинки й ті їх частини, в яких розташовуються ПЕОМ, мають ступінь вогнестійкості не нижче II [39,40,49]. Приміщення оснащені системою автоматичної пожежної сигналізації з димовими сповіщувачами та переносними вуглекислотними вогнегасниками з розрахунку 2 штуки на кожні 20 м² площі приміщення з урахуванням гранично допустимих концентрацій вогнегасної речовини. Виходячи з наданих характеристик вашої організації, а саме орендований офіс в бізнес-центрі, влаштовувати в приміщенні стенд з пожежної безпеки не обов'язково. Досить вивісити на видному місці інструкцію про заходи пожежної безпеки (пункт 3.5 Правил пожежної безпеки в Україні).

Вогнегасники слід встановлювати у легкодоступних та помітних місцях (коридорах, біля входів або виходів з приміщень), а також в пожежонебезпечних місцях, де найбільш вірогідна поява осередків пожежі. При цьому необхідно забезпечити їх захист від попадання прямих сонячних променів та безпосередньої (без загороджувальних щитків) дії опалювальних та нагрівальних приладів.

Вибір типу та необхідна кількість вогнегасників визначається відповідно до Типових норм належності вогнегасників (далі – Типові норми), затверджених наказом Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій.

Слід передбачати також; по одному вогнегаснику вуглекислотному з величиною заряду вогнегасної речовини 3 кг і більше:

- на 20 м² площі підлоги в офісних приміщеннях, підсобних приміщеннях, електрощитових, вентиляційних камерах і технічних приміщеннях;
- на 50 м² площі підлоги приміщень архівів, бібліотек, музеїв тощо.

Приміщення, в яких розміщені комп'ютери, слід оснащувати переносними вуглекислотними вогнегасниками з розрахунку один вогнегасник ВВК-1,4 (позначення – ОУ-2), або ВВК-2 (позначення – ОУ-3), один ВВПА-400 на три ПК, але не менш ніж один вогнегасник цих типів на приміщення (п. 3.10 Типових норм). Ця вимога також стосується будівель та приміщень, обладнаних будь-якими типами установок для пожежогасіння, в тому числі пожежної сигналізації та/або пожежними кранами (п. 6.4.8 Правил пожежної безпеки в Україні).

Згідно п. 6.4.23 Правил пожежної безпеки України, відповідальними особами за повне і своєчасне оснащення всіх об'єктів вогнегасниками, іншими засобами пожежогасіння тощо, забезпечення їхнього технічного обслуговування, навчання працівників правилам користування – є власники/орендарі об'єктів.

5.5 Заходи з забезпечення безпеки у надзвичайні ситуації

Кожен об'єкт в залежності від особливостей виробництва та інших характеристик має свою специфіку, але об'єкти мають і багато спільного: виробничий процес здійснюється, як правило, в середині будівель і споруд, які в більшості випадків виконані з уніфікованих елементів, територія об'єктів насичені інженерними, комунальними та енергетичними мережами. Все це дає підставу вважати, що для виробничих об'єктів, незалежно від профілю виробництва та призначення, можна визначити загальні фактори, які впливають на підготовку об'єкта до роботи в надзвичайних ситуаціях мирного, або воєнного часу.

До таких факторів належать: район розміщення об'єкту, внутрішнє планування, забудова території, мережі та системи (енерго- водо-постачання тощо), технологічний процес, системи керування, підготовленість об'єкту до відновлення та інше [42].

Спочатку проводиться аналіз топографії: розміщення об'єкту, характер території, яка оточує, її структура, тип забудови; наявність на цій території підприємств, які можуть стати джерелами виникнення факторів вторинного ураження (наприклад, об'єкти хімічної промисловості), природні умови та навколишня місцевість (наприклад, лісові масиви як джерела можливих пожеж), рельєф; наявність шляхів та ін.

Наприклад, для підприємств, розміщених по берегах водойм, нижче від греблі, необхідно враховувати можливість підтоплення, встановити максимальні рівні затоплення, час припливу хвилі прориву тощо.

Встановлюються також основні особливості конструкції, для чого вказуються технічні дані, необхідні для таких розрахунків: дії ударної хвилі, світлового випромінювання, інших вторинних факторів ураження. Встановлюються конструкція, поверхня, довжина і висота, вид каркасу, перекриття, заповнення стін, світлові отвори, тип покрівлі тощо; оцінюється вогнестійкість споруди. Вказується, яка кількість працівників і службовців може одночасно перебувати в будівлі (найбільша працююча зміна), наявність вбудованих і близько розміщених сховищ.

При оцінці внутрішнього планування території визначається такі фактори: вплив густоти й типу забудови, можливість виникнення та розповсюдження пожежі, можливість завалів входів у сховища та проходів між спорудами. Особлива увага звертається на ділянки, де можуть виникнути вторинні фактори ураження. На території об'єкту такими джерелами є: ємності з легкозаймистими рідинами і сильнодіючими отруйними речовинами; склади вибухонебезпечних речовин і вибухонебезпечні технологічні установки, технологічні комунікації, руйнування яких може викликати пожежу, вибухи і загазованість ділянки, склади легкозаймистих матеріалів, холодильні установки, які використовують аміак та інші.

Вивчення технологічного процесу проводиться з розрахунком специфіки виробництва і змін у виробничому процесі в надзвичайних ситуаціях (можлива зміна технології, часткова зупинка виробництва, переключення на виробництво нової продукції і т.д.) [42].

Досліджується спроможність існуючого процесу виробництва в стислі строки перейти на технологічний процес для випуску нової продукції. Даються характеристики верстатного і технологічного обладнання. Визначається унікальне і особливо важливе обладнання. Оцінюється насиченість виробництва апаратурою автоматичного управління і контрольно-вимірювальними приладами.

Досліджується можливість автономної роботи окремих верстатів, ділянок технологічного процесу (верстатних груп, конвеєрів і т.д.) об'єкту. Це дозволить надалі обґрунтовано визначити необхідні запаси деталей, вузлів і обладнання, а в

ряді випадків передбачити необхідність змін в технологічному процесі в напрямку його спрощення чи підвищення надійності найбільш вразливих ділянок.

На підприємствах, зв'язаних із застосуванням значної кількості сильнодіючих отруйних і горючих речовин, встановлюється їх кількість, оцінюються токсичні властивості, вибухо- і пожежонебезпечність, надійність і безпечність їх зберігання. Визначається необхідний мінімум запасів цих речовин, які можуть перебувати на території об'єкту, і місце зберігання решти в заміській зоні.

При аналізі технологічного процесу детально вивчаються можливості безаварійної зупинки виробництва. Особливу увагу приділяють дослідженню систем енергопостачання [42].

Визначається залежність роботи об'єкту від зовнішніх джерел енергопостачання, характеризуються внутрішні джерела; підраховується необхідний мінімум електроенергії, газу, води, пари, стиснутого повітря і інших видів енергопостачання в надзвичайних ситуаціях. Досліджуються енергетична мережа і комунікації: наземні, підземні, проведені по естакадах, траншеях, по фунті, по стінах споруд. Вивчається забезпеченість об'єкту автоматичними пристроями, які дозволяють при необхідності зробити дистанційне, відключення окремих ділянок або всієї системи даного виду енергопостачання [39,42].

При розгляді системи водопостачання звертається увага на захист споруд і водозбірників на підземних джерелах води від радіоактивного, хімічного і біологічного зараження. Визначається надійність функціонування системи пожежогасіння, можливість переключення систем водопостачання з дотриманням санітарних правил.

Особлива увага приділяється вивченню систем газопостачання, оскільки газ з джерела енергії може перетворитись у дуже агресивний вторинний фактор ураження. Перевіряється можливість автоматичного відключення подачі газу на об'єкт, в окремих цехах і на ділянках виробництва, дотримання всіх вимог інструкції по зберігання і трансформуванню газу. Жорсткі вимоги висуваються до надійності і безпеки функціонування систем і джерел постачання сильнодіючими отруйними речовинами, киснем, вибухонебезпечними і горючими речовинами.

Дослідження системи управління об'єктів проводиться на основі вивчення стану пунктів управління і вузлів зв'язку, надійності системи управління виробництвом, надійності зв'язку з позаміською зоною, розстановки сил, забезпечення керівництва виробничою діяльністю об'єкту в усіх підрозділах підприємства. Визначаються також джерела поповнення робочої сили, аналізуються можливості взаємозаміни керівного складу об'єкту. Особлива увага приділяється вивченню системи оповіщення.

При аналізі системи матеріально-технічного постачання дається коротка характеристика цієї системи в нормальних умовах і можливих змін в зв'язку з переходом на випуск нової продукції, встановлюється залежність виробництва від постачальників, виявляються найбільш важливі поставки сировини, деталей і комплектуючих виробів, без яких виробництво не може продовжуватись. Оцінюються наявні і плановані запаси (кількість, номенклатура) і можливі строки продовження роботи без постачання, доцільно досліджувати можливі заходи поповнення запасів до норми, надійність їх зберігання і доставки. Розглядаються питання реалізації готової продукції, а також її зберігання.

Підготовка об'єкту до відбудови виробництва визначається на основі вивчення характеру виробництва, складності його устаткування, підготовленості персоналу до відбудовних робіт, запасів матеріалів, деталей та устаткування. Необхідно вивчити також можливості будівельних і ремонтних підрозділів підприємства, а також можливості обслуговуючих об'єкт будівельних і монтажних організацій. Слід розглянути виробничу, будівельно-монтажну і проєктну документацію для проведення відбудовних робіт і визначити умови її зберігання.

Безпосередньо відбудова виробництва при ураженні об'єкту не входить і в завдання цивільної оборони. Разом з тим готовність об'єкту поновити випуск продукції є важливим показником тривалості його роботи, що обумовлює необхідність завчасної підготовки [39,42].

Дані, отримані при аналізі перерахованих факторів, використовуються при визначенні фізичної витривалості елементів об'єкту і оцінці тривалості його праці.

ВИСНОВКИ

Оскільки метою магістратської роботи є розробка ІВС для ідентифікації кругового вогню, в даній роботі були представлені результати як експериментальних так і теоретичних досліджень цього явища. Визначено, що круговий вогонь породжується наступними причинами:

- дефектами електромагнітного характеру, що в основному викликане неточністю установки нейтралі, асиметрією магнітного ланцюга, нерівномірністю віз–задушливих зазорів головних і додаткових полюсів;
- дефектами механічного характеру обумовлені порушенням необхідних сил натискання на щітки, нерівностями і овальністю колектора та інше;
- дефектами електромагнітного і механічного характеру доцільно ідентифікувати під час проведення ремонту на холостому ході при зниженій напрузі і при незалежному збудженні.

Круговий вогонь ідентифікується за наступними ознаками:

- у справних і несправних тягових електродвигунів на різнополярних щіткотримачах виникають пульсації напруги;
- пульсації напруг на різнополярних щітках є випадковими, особливо в умовах масового виробництва (ремонті). Кореляційні та спектральні характеристики процесу пульсацій також істотно відрізняються у справних і несправних електричних машин і тягових електродвигунів;
- аналіз осцилограм пульсацій напруги показує, що характеристики пульсацій напруги під час розгону якоря і в сталому режимі мають відмінність. При цьому дефекти електромагнітного і механічного характеру різним чином впливають на появу пульсацій.

Виконаний математичний аналіз експериментальних характеристик під час комутації, іскріння та процес розвитку кругового вогню в різних режимах роботи ДПС. Проведений FFT–аналіза часово-частотний розклад отриманих характеристик за допомогою вейвлет-перетворення показав, що існують певні

критерії, що свідчать про початок кругового вогню:

1. сукупні нелінійні викривлення більше 80%;
2. автокореляція майже не виділяє синусоїдну складову;
3. вейвлет-спектрограми розвитку кругового вогню мають характерну зміну забарвлення: з плавних кольорових переходів, властивих гармонічним сигналам, переходить до різких змін кольорів, характерних до пульсацій;
4. в Фур'є спектрі з'являється багато ВЧ гармонік значної амплітуди;
5. спектр, отриманий віконним швидким перетворенням Фур'є (FFT) змінюється: зростають амплітуди DC – складової, кількість та амплітуди ВЧ – складових; спектр фактично перетворюється на суцільний;
6. змінюється картина вейвлет-перетворень: при безперервному 1–Дперетворенні спектрально-часова характеристика стає майже вся вкрита "плямами", що відповідає зонам інтенсивного іскріння.

При появі цих ознак можна рекомендувати відключення ДПС, оскільки ці фактори означають високу вірогідність виникнення кругового вогню. Своєчасне виявлення причин кругового вогню та його «попередників», що виникають під час комутації, дозволять подовжити термін експлуатації ДПС.

Використання вейвлет–перетворень для ідентифікації процесу іскріння та кругового вогню є більш доцільним, ніж віконне перетворення Фур'є, оскільки ці процеси не є стаціонарними.

При послідовному проведенні дослідження вимагає 70 днів. Виконання НДР за параметрами сітьового планування дозволяє скоротити строки робіт до 59 днів, кошторис витрат на виконання НДР складає 80148,93 грн. Економічна ефективність науково-дослідницької роботи $K_e=1,98$, що більше 1, це свідчить про те, що дослідницьку роботу можна вважати ефективною.

В розділі охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях виконано аналіз потенційних небезпек при роботі за комп'ютером, розроблено заходи із забезпечення техніки безпеки, виробничої санітарії та гігієни праці та пожежної безпеки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: Підручник / В.П. Бабак, С.В. Бабак, В.С. Єременко та ін.; за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака / 2-е вид., перероб. і доп. – К.: Ун-т новітніх технологій; НАУ, 2017. – 496 с.
2. **Паламар, Михайло.** Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів. [Текст] / Михайло Паламар, Михайло Стрембіцький, Андрій Паламар; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. – 150 с.
3. TheCompleteGuideto DC Motors [Electronicresource]. – Access mode: <https://uk.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=ideas-and-advice/dc-motors-guide>
4. DC Motors. Electronics-tutorial [Electronicresource]. – Access mode: https://www.electronics-tutorials.ws/io/io_7.html
5. DC Motor – Thepioneerofelectricmotors [Electronicresource]. – Access mode: <https://harmonicdrive.de/en/glossary/dc-motor-the-pioneer-of-electric-motors>
6. Sparking in DC Generators. [Electronicresource]. – Access mode: <https://www.2braces.com/electrical/sparking-dc-generators>
7. Maintenance and Troubleshooting of Electric Motors [Electronicresource]. – Access mode: <http://www.maintenanceworld.com/maintenance-and-troubleshooting-of-electric-motors/>
8. Handbook of Electric Machines – Infineon Technologies. [Electronicresource]. – Access mode: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-motorcontrol_handbook-AdditionalTechnicalInformation-v01_00-EN.pdf
9. Motors Week: Brushes, Sparking, and Machine Maintenance. [Electronicresource]. – Access mode: <https://www.manufacturing.net/home/article/13216590/motors-week-brushes-sparking-and-machine-maintenance>

10. Причины искрения и способы улучшения коммутации / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.motor-remont.ru/books/book129/book129p14.htm>
11. Круговой огонь на коллекторе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://wap.motor-remont.ru/books/book220/book220p20.htm>
12. **Осадченко, А.А.** Прогнозування ресурсу тягових електродвигунів [Текст] / А.А.Осадченко, О.Л.Рапопорт, А.Б.Цукублін, В.В.Щербатов // Вісті Вузів “Електромеханіка”. – 2006. – №3. – С. 24–28.
13. **Осадченко, А.А.** Моніторинг щеточно-колекторного вузла тягового електродвигуна при експлуатації [Текст] / А.А.Осадченко, О.Л.Рапопорт, А.Б.Цукублін // Вісті ТПУ – №7, 2005. – С. 36–39.
14. Устройство для диагностики работы щеточно-контактного аппарата электрической машины [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/207/2071076.html>
15. **Карасьов, М. Ф.** Оптимальна комутація машин постійного струму [Текст] / М. Ф. Карасьов. – М. : Транспорт, 1967. – 180 с.
16. **ГОСТ 183–74.** Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования. М., 1974
17. Физико-технические основы и принцип работы измерительного преобразователя магнитного поля – датчика Холла [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://sensorse.com/page16.html>
18. 3144E HallSensorsModule [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=%C4%E0%F2%F7%E8%EA%20%D5%EE%EB%EB%E0>
19. **ГОСТ 15543–70.** Изделия электротехнические. Исполнения для различных климатических районов. Общие технические требования в части воздействия климатических факторов внешней среды. М., 1983.
20. **ГОСТ 15150–69.** Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории,

условия эксплуатации, хранения и транспортирования в частивоздействия климатических факторов внешней среды.

21. **ГОСТ 17516–72.** Изделия электротехнические. Условия эксплуатации в частивоздействия механических факторов внешней среды.

22. **Vasylenko, O.V.** Informationsystemfor DC motor`s dataacquisition / O.V. Vasylenko // Тези доповідей VIII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій»: тези доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції (07-09 жовтня 2020 р., м. Запоріжжя). – Запоріжжя: ЗНТУ, 2020. – 264 с., С.176-177.

23. **Скіданов, В.М.** Порівняльний аналіз систем тягових приводів автономного електротранспорту Автоматизація і інформаційні технології [Текст] / В.М. Скіданов, Т.О. Забава. // ГБДММ – № 76, 2010 – С.45-52.

24. **Астафьева, Н.М.** Вейвлет–анализ: Основы теории и примеры применения. – [Текст] / Н.М. Астафьева; Успехи физических наук., 1996, т.166, № 11, стр. 1145–1170.

25. ComputerAlgebraSystem[Electronicresource]. – Access mode: <https://www.mathworks.com/discovery/computer-algebra-system.html>

26. Micro-Cap 12, ElectronicCircuitAnalysisProgramReferenceManual, SpectrumSoftware [Electronicresource]. – Access mode: <http://www.spectrum-soft.com/download/rm12.pdf/document> (inEnglish)

27. **Дьяконов, В. П.** MATLAB R2007/2008/2009 для радиоинженеров[Текст] / В. П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 976 с.

28. MathWorksStore [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mathworks.com/store/productIndexLink.do>

29. SIEMENS. PC-basedAutomation [Electronicresource]. – Access mode: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6AU1320-4DE65-3AF0>

30. SIMATIC IndustrialAutomationSystems [Electronicresource]. – Access mode: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/5009999?tree=CatalogTree>

31. Найпростіший осцилограф на платі Arduino [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://geekmatic.in.ua/ua/arduino_oscilloscope.
32. Цифровий осцилограф на Arduino [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?page=0&name=%EE%F1%F6%E8%EB%EB%EE%E3%F0%E0%F4&okbutton=Search>
33. Програмування осцилографа на ArduinoProcessing[Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://processing.org/>
34. Moeller: електрооборудование и средства автоматизации Moeller, Украина К.: 2020.– [Електронний ресурс].– Режим доступу: <http://www.moeller.com.ua>.
35. **Кулагін, Д. О.** Особливості вибору тягових електро-двигунів для побудови систем рухомих електротехнічних комплексів / Д. О. Кулагін , Б. С. Чернецький // Technologyauditandproductionreserves – № 2/1(22), 2015. – С.37-42.
36. **Кулагін, Д. О.** Проектування систем керування тяговими електропередачами моторвагонних поїздів [Текст]: монографія / Д. О. Кулагін. — Бердянськ: ФО-П Ткачук О. В., 2014. — 154 с.
37. **Рахматуллин, Р. Р.** Расчет технико-экономических показателей и определение экономического эффекта [Текст] / Р.Р. Рахматуллин. – М.: Бибком, 2017. – 169 с.
38. Посадові оклади за ЄТС 2020 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://buhgalter.com.ua/dovidnik/posadovi-okladi-za-ets/posadovi-okladi-za-yets-2020-2021-proekt/>
39. **Жидецкий, В. Ц.** Основы охраны труда: учебник. – Издательство 2-й, доповнене. / В. Ц. Жидецкий, В. С. Джигирей. – Львів: Афіша, 2000. – 351с.
40. **ГОСТ 12.0.003–91.** Небезпечні і шкідливі виробничі фактори. М., 1991.
41. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» у дипломних роботах студентів освітнього ступеню «Магістр» та освітніми програмами: «Безпека інформаційних і комунікаційних систем», «Системи технічного захисту інформації, автоматизація її обробки», 125 –

«Кібербезпека» / Укл.: Ю.В. Якімцов – Запоріжжя: каф. ОПіНС, НУ «Запорізька політехніка», 2020 – 28 с.

42. Методичні вказівки до лабораторного заняття «Дослідження захисних властивостей засобів індивідуального захисту населення» з дисципліни «Цивільний захист і охорона праці в галузі»: для студентів усіх спеціальностей та форми навчання. Укл. : М. О. Журавель, С. М. Журавель – Запоріжжя: Каф. ОП і НС. НУ «Запорізька політехніка», 2019 р. – 28 с.

43. **ДСанПІН 3.3.2.007–98.** Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно–обчислювальних машин, 1999 р. 39с. – 50с., с.11 – 15

44. **ГОСТ 12.1.012 – 90.** Вибрационная безопасность. М., 1991.

45. **ГОСТ 11929–87 (СТ СЭВ 828–77)** Машины электрически вращающиеся. Общие методы испытаний. Определение уровня шума [Текст].

46. **ГОСТ 12.1.005–88.** Общие санитарно–гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [Текст]. М., 1989г.

47. Правила устройства электроустановок. ПУЭ – Украина. – К.: «Форт» , 2009 – 704с.

48. **ДБН В.2.5–28–2006.** Природне і штучне освітлення. Чинний з 2006–10–01. – Мінбуду України Державне підприємство «Укрархбудінформ». – К., 2006. – 76 с.

49. Пожарная безопасность [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://s.compcentr.ru/01/01–04.html>

Додаток А

Методика програмування електронного осцилографа для системи моніторингу

Контролери Arduino можна використовувати як найпростіший осцилограф, для спостереження за швидко-змінюваними електричними сигналами [31]. Завантажуємо програму Processing [33](запускається з *exe*-файлу). Відкриваємо Arduino IDE та вставляємо наступний код:

```
#define ANALOG_IN 0
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  //Serial.begin(115200);
}
void loop() {
  int val = analogRead(ANALOG_IN);
  Serial.write( 0xff);
  Serial.write( (val >> 8) & 0xff);
  Serial.write( val & 0xff);
}
```

Завантажуємо цей код в контролер Arduino.

Відкриваємо програму Processing та вставляємо в неї наступний код:

```
import processing.serial.*;
Serialport; // Створення об'єкта класу
Serialintval; // Дані, що отримуються з сом-порта
int [] values;
float zoom;
void setup()
{
  size(1280, 480);

  // Відкриваємо порт, до якого підключена плата
  // контролера використовуючи швидкість (9600 bps)
  port = new Serial(this, Serial.list()[0], 9600);
  values = new int[width];
  zoom = 1.0f;
  smooth();
}
int getY(int val) {
  return (int)(height - val / 1023.0f * (height - 1));
}
int getValue() {
  int value = -1;
  while (port.available() >= 3) {
    if (port.read() == 0xff) {
      value = (port.read() << 8) | (port.read());
    }
  }
  return value;
}
```

```

    }
    voidpushValue(intvalue) {
        for (int i=0; i<width-1; i++)
            values[i] = values[i+1];
        values[width-1] = value;
    }
    voiddrawLines() {
        stroke(255);
        intdisplayWidth = (int) (width / zoom);
        int k = values.length - displayWidth;
        int x0 = 0;
        int y0 = getY(values[k]);
        for (int i=1; i<displayWidth; i++) {
            k++;
            int x1 = (int) (i * (width-1) / (displayWidth-1));
            int y1 = getY(values[k]);
            line(x0, y0, x1, y1);
            x0 = x1;
            y0 = y1;
        }
    }
    voiddrawGrid() {
        stroke(255, 0, 0);
        line(0, height/2, width, height/2);
    }
    voidkeyReleased() {
        switch (key) {
            case '+':
                zoom *= 2.0f;
                println(zoom);
                if ( (int) (width / zoom) <= 1 )
                    zoom /= 2.0f;
                break;
            case '-':
                zoom /= 2.0f;
                if (zoom< 1.0f)
                    zoom *= 2.0f;
                break;
        }
    }
    voiddraw()
    {
        background(0);
        drawGrid();
        val = getValue();
        if (val != -1) {
            pushValue(val);
        }
        drawLines();
    }
}

```

Натискаємо кнопку пуск цієї програми для візуалізації часового графіку сигналу на аналоговому вході А0 контролера. COM-порт має бути в системі тільки один. Можна збільшувати частоту дискретизації осцилографа, збільшуючи швидкість COM-порту в контролері та в програмі Processing.