

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерно-технологічний факультет**  
**Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

До захисту  
Допускається  
Завідувач кафедри енергетики та  
електротехнічних систем

---

доцент Чепіжний А.В.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження системи захисту електродвигунів  
на основі мікропроцесорних пристроїв»

Виконав

---

(підпис)

Москович В.О.  
(прізвище, ініціали)

Група

ЕТЕС 2301-1м

(Науковий) керівник:

---

(підпис)

Чепіжний А.В.  
(прізвище, ініціали)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерно-технологічний факультет**  
**Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри енергетики та  
електротехнічних систем

доцент \_\_\_\_\_ Чепіжний А.В.  
(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ року

**ЗАВДАННЯ**  
**НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ**  
**ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

*Москович Віталій Олексійович*

(прізвище, ім'я та по батькові)

**1. Тема роботи:** Дослідження системи захисту електродвигунів на основі мікропроцесорних пристроїв

керівник роботи: Чепіжний Андрій Володимирович, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджено наказом по закладу вищої освіти від «26» 02 2024 р. № 572/ос

**2. Термін подання здобувачем закінченої роботи** «11» 11 2024 р.

**3. Вихідні дані до роботи** показники роботи електродвигунів, технічні характеристики електродвигунів, нормативні документи для проведення досліджень, стандарти.

**4. Зміст пояснювальної записки** (перелік питань, що підлягають розробці):

1 Визначення особливостей організації захисту електродвигунів.

2 Формування показників аналізу аварійних процесів електродвигуна.

3 Дослідження особливостей роботи мікропроцесорного захисту електродвигуна.

4 Охорона праці.

5 Економічне обґрунтування.

Висновки та пропозиції.

Список використаної літератури.

Додатки.

**5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:**

Презентаційний матеріал виконаний в програмі Power Point

**6. Консультанти розділів роботи:**

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата

**КАЛЕНДАРНИЙ ГРАФІК**

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 15.08.2024 р.	
2	Складання плану роботи	до 23.08.2024 р.	
3	Написання вступу	до 26.08.2024 р.	
4	Підготовка розділу «Розділ 1»	до 28.08.2024 р.	
5	Підготовка розділу «Розділ 2»	до 16.09.2024 р.	
6	Підготовка розділу «Розділ 3»	до 14.10.2024 р.	
7	Підготовка розділу «Розділ 4»	до 21.10.2024 р.	
8	Написання висновків та пропозицій	до 28.10.2024 р.	
9	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2024 р.	
10	Подання роботи на рецензування	до 05.11.2024 р.	
11	Подання до попереднього захисту	до 12.11.2024 р.	

**Здобувач вищої освіти**

\_\_\_\_\_

(підпис)

**(Москович В.О.)**

(прізвище, ініціали)

**(Науковий) керівник  
дипломної роботи**

\_\_\_\_\_

(підпис)

**(Чепіжний А.В.)**

(прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Дослідження системи захисту електродвигунів на основі мікропроцесорних пристроїв. Магістерська робота / Москович Віталій Олексійович – Суми: СНАУ, 2024 р. – 47 с.

В роботі проведено аналіз основних можливих причин виникнення можливих аварій електродвигунів та причин, що приводять до виникнення несправностей.

Проведено аналіз особливостей захисту електродвигунів та визначення параметрів для виконання мікропроцесорного захисту. Визначено основні параметри для аналізу системи захисту.

Виконано аналіз процесів, що відбуваються в електродвигунах та сформовано математичну модель процесу. Математична модель дозволяє вирішити питання моделювання системи захисту з врахуванням зміни основних величин.

Проведено дослідження використання вставки спрацювання для захисту електродвигунів від різноманітних параметрів роботи електродвигуна.

В роботі проведено аналіз заходів з охорони праці та виконано підтвердження роботи системи захисту з використанням мікропроцесорної техніки.

**Ключові слова:** мікропроцесорний захист, вставка спрацювання, струм, насправність, тепловий режим, електродвигун, аварійний режим, усталений режим роботи електродвигуна.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ОРГАНІЗАЦІЇ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ.....	8
1.1 Визначення основних причин виникнення несправностей в електродвигунах.....	8
1.2 Особливості роботи захисту електродвигуна.....	14
1.3 Особливості вдосконалення систем для виконання захисту електродвигунів.....	18
Висновки до розділу.....	20
2 ФОРМУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ АНАЛІЗУ АВАРІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА.....	21
2.1 Аналіз якісних показників перетворення енергії в електродвигуні в якості критерію для проведення оцінки його роботи.....	21
2.2 Аналіз особливостей використання вейвлет-перетворення при проведенні контролю електродвигуна.....	23
2.3 Математичне моделювання електродвигуна з врахуванням їх особливостей.....	26
Висновки до розділу.....	29
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА.....	30
3.1 Особливості роботи електродвигуна в режимі пуску та формування схем мікропроцесорного захисту.....	30
3.2 Дослідження регулювання з використанням вставки спрацювання.....	33
Висновки до розділу.....	36
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	37
Висновки до розділу.....	39
5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	40
Висновки до розділу.....	42

	5
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	45
ДОДАТОК А.....	49

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Електродвигуни є доволі важливим елементом будь якого виробництва. Виходячи з цього необхідною умовою є вирішення питання дослідження елементів захисту електродвигунів від різноманітних параметрів. На сьогодні існує багато досліджень, що пов'язані з аналізом роботи систем захисту. Доволі якісною системою захисту є системи на основі мікропроцесорного захисту. Дані системи дозволяють вирішити питання комплексного захисту з проведенням якісного аналізу основних параметрів роботи електродвигуна.

Мікропроцесорний захист є окремим елементом, що в своїй структурі має набір датчиків та різноманітних пристроїв для забезпечення захисту. Обробка інформації здійснюється з використанням мікропроцесорної техніки, контроль також. Виходячи з цього можна врахувати максимальну кількість негативних факторів впливу на усталену роботу електродвигуна та сформувані потрібний захист на основі мікропроцесору. Дані системи на сьогодні набирають доволі значного розповсюдження через простоту та зрозумілість в організації процесу, а також через можливість комплексного захисту набору різних електродвигунів.

Виходячи з цього дослідження систем мікропроцесорного захисту є доволі актуальною темою та потребує подальших досліджень.

*Мета та задачі дослідження.* Дослідження особливостей організації захисту електродвигунів на основі мікропроцесорних пристроїв з визначенням основних параметрів їх роботи при несиметрії мережі.

Для проведення дослідження нами пропонується вирішити наступні задачі:

1. Визначення основних несправностей електродвигунів.
2. Аналіз основних методів проведення дослідження систем мікропроцесорного захисту.
3. Визначення алгоритмів роботи мікропроцесорного захисту з аналізом впливу на них несиметрії напруги мережі.

**Об'єктом дослідження** в роботі є мікропроцесорні пристрої для виконання захисту електродвигунів від неусталених режимів роботи.

**Предметом дослідження** в роботі є параметри роботи мікропроцесорного захисту електродвигуна при несиметрії напруги в мережі.

**Методи дослідження.** При виконанні дослідження мікропроцесорної техніки застосовувався вейлвет-аналіз з використанням математичного моделювання процесів в електродвигуні.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в отриманні даних роботи мікропроцесорних систем захисту для електродвигуна, що може бути реалізована на виробництві з врахуванням несиметрії напруги.

# 1 ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ОРГАНІЗАЦІЇ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

## 1.1 Визначення основних причин виникнення несправностей в електродвигунах

Всі несправності електричних двигунів в основному приводять до виходу з ладу. При цьому виникає початково порушення роботи в нормальному режимі. Причини несправностей електродвигунів є доволі різноманітними. В своїй більшості основними причинами є певного роду несвоєчасне усунення дефектів в різному обладнанні. Також причинами можуть бути неякісне виготовлення елементів двигуна, неправильний монтаж, ремонт чи навіть експлуатація.

Найбільш розповсюдженими серед всіх електричних двигунів є саме асинхронні електродвигуни, частка яких серед всіх становить близько 60%. Виходячи з цього пропонується провести дослідження саме для даного типу електродвигунів. Основними перевагами даних електродвигунів є те, що вони є більш надійними та простими конструкційно та мають доволі високий ККД. При цьому в експлуатації дані електродвигуни є найбільш простими.

Для початку необхідною умовою є проведення аналізу основних пошкоджень даних електродвигунів. Основними з них є:

- обрив різних фаз – до 50 %;
- заклинювання – до 25 %;
- пошкодження обмоток в статорі – до 20 %;
- довготривалі навантаження – до 15 %.

Виходячи з вищенаведеного можна сказати, що більшість електродвигунів виходить через пошкодження фаз. При цьому доволі велика кількість електродвигунів виходить також через теплове перевантаження. Дана причина спричиняє фактично близько 20 % від загальної кількості пошкоджень.

93 % пошкоджень в електродвигунах асинхронних виникає саме через пошкодження його обмоток. На пошкодження ізоляції фактично припадає 5%

- міжфазної ізоляції та лише 2 % - пазової ізоляції. Пошкодження ізоляції в основному виникає через різного роду виткові замикання.

При проведенні аналізу фактично вказують дві з них:

- механічні пошкодження, що виникають в результаті різноманітних пошкоджень підшипникових вузлів;

- замикання, що пов'язані з проблемами з ізоляцією.

Для більш детального розуміння пропонується провести графічний аналіз особливостей виникнення несправностей різних електродвигунів (рис. 1.1).

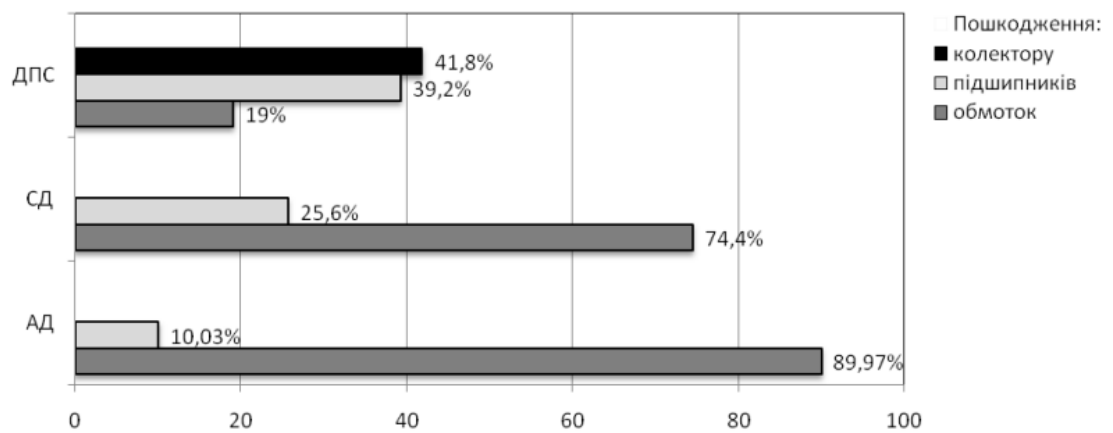


Рисунок 1.1 – Основні причини поломок електродвигунів

Доволі важливим показником є термін експлуатації електродвигуна. При цьому необхідно враховувати залишок до проведення наступного різновиду ремонту. Відповідно до терміну експлуатації електродвигунів спостерігається розподіл наведений на рисунку 1.2.

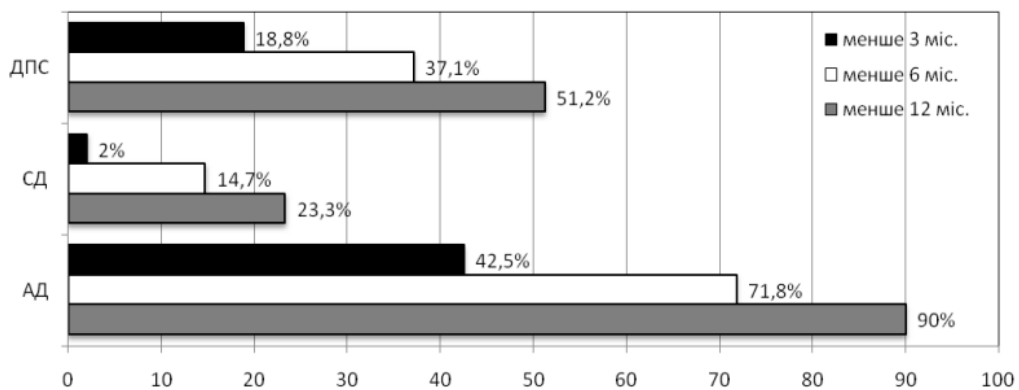


Рисунок 1.2 – Розподіл відмов залежно від терміну експлуатації електродвигунів

Виходячи з даних діаграм можна зазначити, що доволі багато відмов виникає саме в асинхронних електродвигунах. При цьому фактично 90 % відмов виникає в період до 12 місяців.

В результаті подібного групування та проведення аналізу необхідно зауважити, що всі причини можна умовно поділити на три різні групи:

- умови в яких експлуатується електродвигун;
- якість виконання ремонту;
- умови для проведення зберігання та транспортування.

Необхідно зазначити, що умови в яких експлуатується електродвигун є фактично однією з найбільш важливих. Даний показник фактично впливає на роботу в різного роду ненормальних чи навіть аварійних режимах.

Для електричного двигуна найбільш небезпечним є виникнення певних надструмів, що виникають під дією різноманітних фізичних процесів саме в електродвигуні. Подібні надструми спричиняють в електродвигуні різноманітні термічні впливи, а також динамічні впливи. Необхідно зазначити, що надструми мають короточасний вплив з перевищенням нормальної величини струму чи навіть магнітного навантаження.

Надструми характеризуються значенням пускових струмів. Дані струми виникають в результаті зовнішніх коротких замикань. При цьому до місця пошкодження посиляється струм, що має значення близьке до пускового. Також посиляється величина струму, що відповідає максимальному значенню обертового моменту.

Динамічний вплив характеризується певним початковим значенням температури, що виникає в активних частинах електродвигуна. В результаті виникнення подібного розподілу може виникати певний нагрів різних елементів з можливим точковим перегрівом елементів.

Перегрів електродвигуна характеризується появою певних короточасних перевантажень за величиною струму. Даний стрибок веде до зміни масштабу процесу тепловиділення. При цьому розподіл тепла в активних частинах електродвигуна не відбувається.

Перевантаження призводить в основному до пошкоджень через теплове навантаження. Внаслідок даного впливу спостерігаються порушення поля джерела виникнення теплоти. Прояв даного явища спостерігається через температурні деформації та різного роду напруження. При цьому всі ці процеси формують технічний стан електродвигуна в загальному вигляді.

Перегрів електродвигуна може спричинити, як механічну частину електродвигуна так і електричну. Перегрів викликає обвуглювання різного роду ізоляції при цьому під дією пікових значень струму доволі рідко виникає плавлення проводу в ізоляції. В деяких випадках температурне пошкодження ізоляції електродвигуна може призвести до певних незворотних змін.

Такі режими є певного роду аномальними, з виникненням електромагнітної та різного роду електромеханічної ситуації. Основними аномаліями є високе значення місцевого нагріву, що зумовлений високими питомими втратами в активних місцях електродвигуна.

Необхідно зазначити, що питання температурної стійкості електродвигуна пов'язується з інтенсивним процесом старіння ізоляції під дією доволі високих температур.

Однією з особливостей зміни умов охолодження є аварії, що пов'язані з швидким зменшенням інтенсивності по відводу тепла через порушення в роботі системи охолодження електродвигуна. Нормально працюючий електричний двигун має незначні коливання температури, що зумовлені його навантаженням та умовами експлуатації.

За умови обриву фази доводиться брати до уваги надструми адже можуть бути обертання ротора в той час коли в обмотках проходить значні струми.

Не останню роль в якісній роботі електродвигуна відіграє якість електричної енергії. За умови значних відхилень від якісних показників електроенергії двигун може фактично повністю не працювати. Найбільший вплив на роботу електродвигуна має несиметрія напруги та відсутність її синусоїдальності. Несиметрія напруги призводить до того, що виникають значні зміни в фізичних процесах роботи електродвигуна.

Низький опір та певної напруги зворотної послідовності призводить до виникнення несинусоїдальності струму. При цьому також відбувається збільшення активного опору та в результаті виникає значне збільшення витрати електродвигуном активної потужності. В кінцевому випадку виникає перегрівання частин електродвигуна та його обмоток.

На чьогодні існують дослідження, де при використанні електродвигуна з роботою в підвищених температурних режимах на 8°C термін експлуатації фактично зменшується приблизно в 2 рази.

Для проведення порівняльного аналізу пропонується виконати аналіз роботи асинхронного двигуна при режимах різної несиметрії напруги (таблиця 1.1)

Таблиця 1.1 – Значення роботи електродвигуна за умови різних значень несиметрії напруги в мережі

Характеристики двигуна	Несиметрія напруги, %			
	0	2,0	3,5	5,0
Струм зворотної послідовності, %	0	15	27	38
Струм статора, %	100	101	104	107,5
Збільшення втрат, %:				
- середнє в статорі	0	2	8	15
Максимальне:				
- у статорі	0	33	63	93
- у роторі	0	12	39	76
- загальне в АД	0	8	25	50
Збільшення температури, °C:				
- клас А	60	65	75	90
- клас В	80	86	100	120

В результаті зменшення напруги значно зменшується і обертовий момент електродвигуна. Цей ефект виникає через збільшення ковзання. При тривалому зменшенні напруги можливо значне гальмування та можлива повна зупинка електродвигуна.

Після відновлення напруги виникає певний самостійний пуск електродвигуна з проходженням по обмоткам струмів з значним перевищенням від нормальних величин. Даний процес є короткотривалим але може бути небезпечним. Подібні процеси можуть виникати в результаті

пониження напруги в мережі та ввімкненням в неї великої кількості електродвигнів.

При умові тривалої експлуатації та значного зношення параметри електродвигуна фактично повністю можуть не відповідати його паспортним даним. В кінцевому випадку може виникати аварійна зупинка електродвигуна.

Іншою проблемною причиною є підвищена вібрація електродвигуна. Вібрація в основному виникає через виникнення динамічних зусиль, які в кінцевому випадку є певним джерелом вібрації. Вібрація може спричиняти різноманітні дефекти, зміну нормального режиму його роботи чи навіть пошкодження його елементів. необхідно зазначити, що саме вібрація виникає через значні ушкодження електродвигуна.

Динамічні зусилля можна поділити на наступні групи: механічні, аеродинамічні та електромагнітні. Серед даних груп зусиль найбільш розповсюдженими серед них є саме механічні зусилля. Все це змушує виникати вібрацію та приводить до пошкодження запресувань елементів електродвигуна, пошкодженні зварюваних швів чи порушенні щільності в різних з'єднаннях. Вібрація в підшипниках також призводить до збільшення температурного режиму електродвигуна.

Іншим джерелом виникнення вібрації є магнітні сили, що викликають певні пульсації. Подібний процес призводить до виникнення вібрації саме в статорі.

Аеродинамічні сили виникають в основному в електродвигунах високошвидкісних. Дані сили є певними прямими чи непрямыми. До них відносять різноманітні розбалансування вентиляторної крильчатки, а також поганий відвід повітря.

Подібна дія в першу чергу проявляється на підшипниках кочення з подальшим руйнуванням даного вузла. При руйнуванні підшипникового вузла виникає фактично повна зупинка електродвигуна.

Фактично повністю дана група пов'язана з проведенням якісних ремонтів. В результаті певного роду відсутності якісного ремонту або встановлення неякісних деталей виникають повністю вищеописані проблеми.

В більшості ненормальної роботи впливає фактично несиметрія напруги. Для подальшого аналізу пропонується розглянути схему виникнення основних причин ненормальної роботи електродвигуна (рис. 1.3).

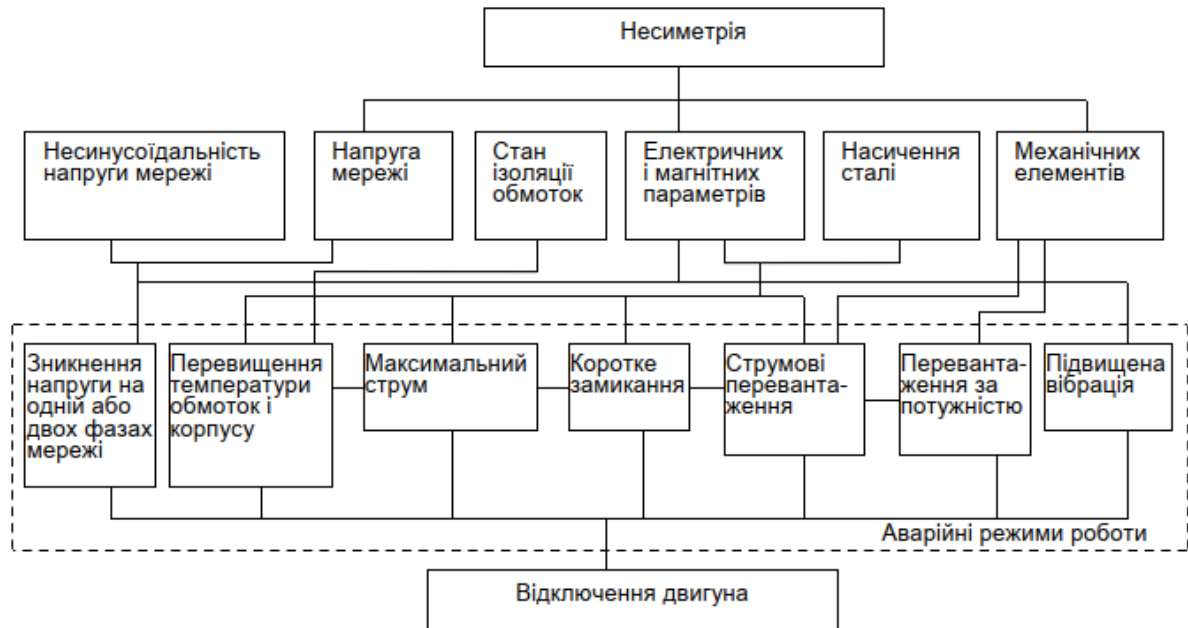


Рисунок 1.3 – Схема та зв'язок основних причин ненормальної роботи електродвигуна

Дана схема (рис. 1.3) дозволяє проводити певні розподіли між загальним станом електродвигуна та його параметрами. Дана схема дозволяє проводити аналіз електродвигуна в цілій системі де починається все з мережі, електричного двигуна та подальшим навантаженням на ньому.

## 1.2 Особливості роботи захисту електродвигуна

Забезпечення нормальної роботи електродвигуна проходить з використанням різноманітного захисту, що складається з різних пристроїв. Відповідно до ПУЕ, на електродвигуни встановлюється пристрої захисту від короткого замикання. Додатково встановлюється система захисту від замикань на землю. Обов'язковою умовою є захист від перевантаження та від мінімального значення напруги. Також є певний перелік і інших захистів, що вказуються в ПУЕ.

На практиці для захисту електродвигуна доволі часто використовують захист від можливого обриву фази. Також доволі часто встановлюють захист для обмеження числа пусків чи від зміни значення струму та потужності. Додатково може встановлюватись захист від заклинювання або повного гальмування робота.

Подібні системи захисту реалізуються різноманітними реле в тому числі і мікропроцесорний захист. На рисунку 1.4 наведено основну схему можливого варіанту захисту електродвигуна.

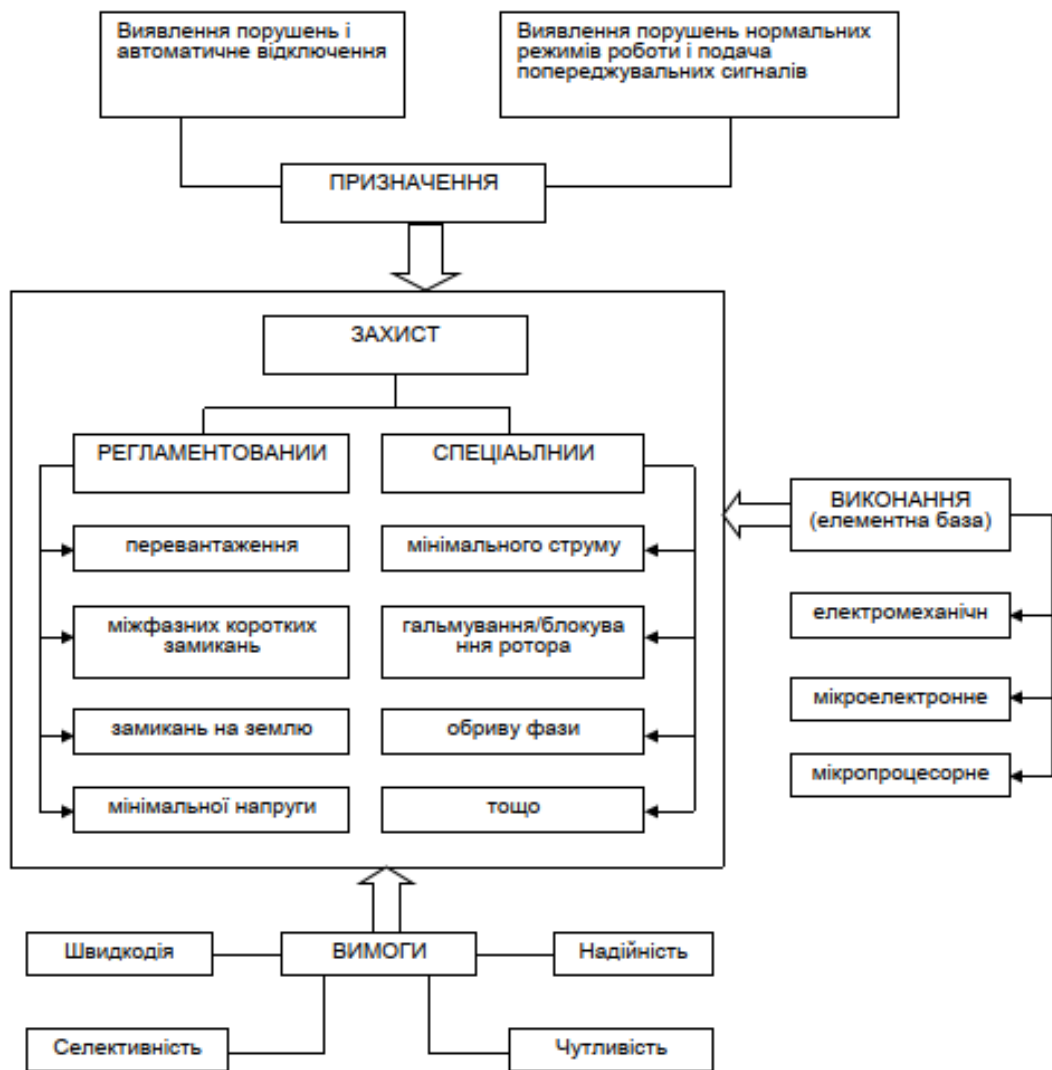


Рисунок 1.4 – Загальна структура реалізації захист електродвигуна

Загальна побудова схеми захисту ґрунтується на його ефективності. Виконання пристроями захисту своїх функцій може збиватись певним чином. Виходячи з цього існує певна кількість відмов, що мають наступний поділ:

- відмови пов'язані з спрацюванням при необхідності захисту;
- надлишкове спрацювання при виникненні пошкоджень;
- різноманітні помилкові спрацювання.

Для забезпечення функціонування системи захисту електродвигуна виконується при надаванні їй спеціальних властивостей. Необхідно зазначити, що всі властивості захисту мають певний зв'язок один з одним. Система захисту в повній мірі може бути охарактеризована одним параметром – ефективністю. Під даним параметром розуміють максимальну кількість функцій, що дозволяють отримати максимальний ефект захисту.

В результаті певного часу спрацювання досягається певний ефект при виконанні захисту. Фактично на сьогодні 100% захисту не існує, це є певним ідеалізованим параметром.

В більшості літературних джерел спостерігається фактично три причини, що приводять до зниження захисного ефекту:

- обмеження кількості функцій та ефекту спрямування;
- величини похибки при функціонуванні;
- відмови, що пов'язані з поломками елементів захисту.

Всі наведені причини є проявом певної неповноти відповідній властивості. В результаті дана невідповідність не дає змоги скористатись функціями селективності, швидкості спрацювання, чутливості, а також надійності. Дані параметри в повній мірі характеризують працездатність загальної системи захисту електродвигуна.

Всі ці властивості системи захисту можна віднести до захисту від ненормальних режимів роботи з врахуванням специфіки їх функціонування. Необхідно зазначити, що захист електродвигуна підбирається в залежності від його потужності.

Струміву відсічку застосовують для захисту від різного роду коротких замикань, що виникають між фазами. При ситуаціях коли даний тип захисту не задовольняє всі вимоги можуть застосовувати різноманітний диференціальний тип захисту.

Захист від різних надструмів проводять для електродвигунів, що можуть працювати з певним значенням перевантаження.

Також здійснюють тепловий захист, що виконується з використанням різного роду теплових реле. Але дані реле мають доволі значний недолік, що пов'язаний з різницею по тепловим характеристикам з електродвигунами. Додатково слід зауважити що дані теплові реле мають певний ряд недоліків, що пов'язані зі складністю експлуатації.

Тепловий захист може бути більш досконалий, що виконаний на позисторах чи різних термісторах. Недоліком є те, що даний тип захисту необхідно вбудовувати в електродвигун.

Також додатково може бути встановлено захисту від вібрацій, що по своїй суті є доволі складним.

На сьогодні розвиток різноманітної процесорної техніки викликає появу різноманітного мікропроцесорного захисту нового покоління. Дані пристрої мають ряд переваг порівняно з електромагнітними реле. При цьому вони містять в своїй структурі пристрої для обробки інформації. До переваг даних пристроїв відносять також мале споживання величини струму та напруги. Споживання знаходиться в межах 0,1-0,5 Вт.

Необхідно зазначити, що час спрацювання всіх вимірювальних елементів даного типу захисту залишається незмінним порівняно з електромагнітними реле.

Пристрої мікропроцесорного захисту по своїй конструкції є доволі компактними та складаються з мікропроцесорного пристрою, перетворювачів для проведення вимірювання та різних реле. В результаті отримуємо в одному корпусі доволі велику кількість різноманітних типів захисту. Керування всіма елементами виконується за допомогою спеціального програмного забезпечення.

Виходячи з такої постановки проблеми застосування подібних пристроїв є доволі виправданим та допомагає вирішити безліч питань захисту електродвигуна. При цьому повністю можна врахувати індивідуальність кожного окремого електродвигуна. Подальше функціонування системи

захисту здійснюється в автоматичному режимі з відповідними закладеними діями в неї.

### 1.3 Особливості вдосконалення систем для виконання захисту електродвигунів

Проблема захисту електродвигуна від різноманітних ненормальних режимів роботи потребує певного комплексного підходу до реалізації. Даний комплексний підхід в значній мірі впливає на «життєвий» цикл електродвигуна, який в кінцевому випадку можна зобразити в вигляді схеми (рис. 1.5).

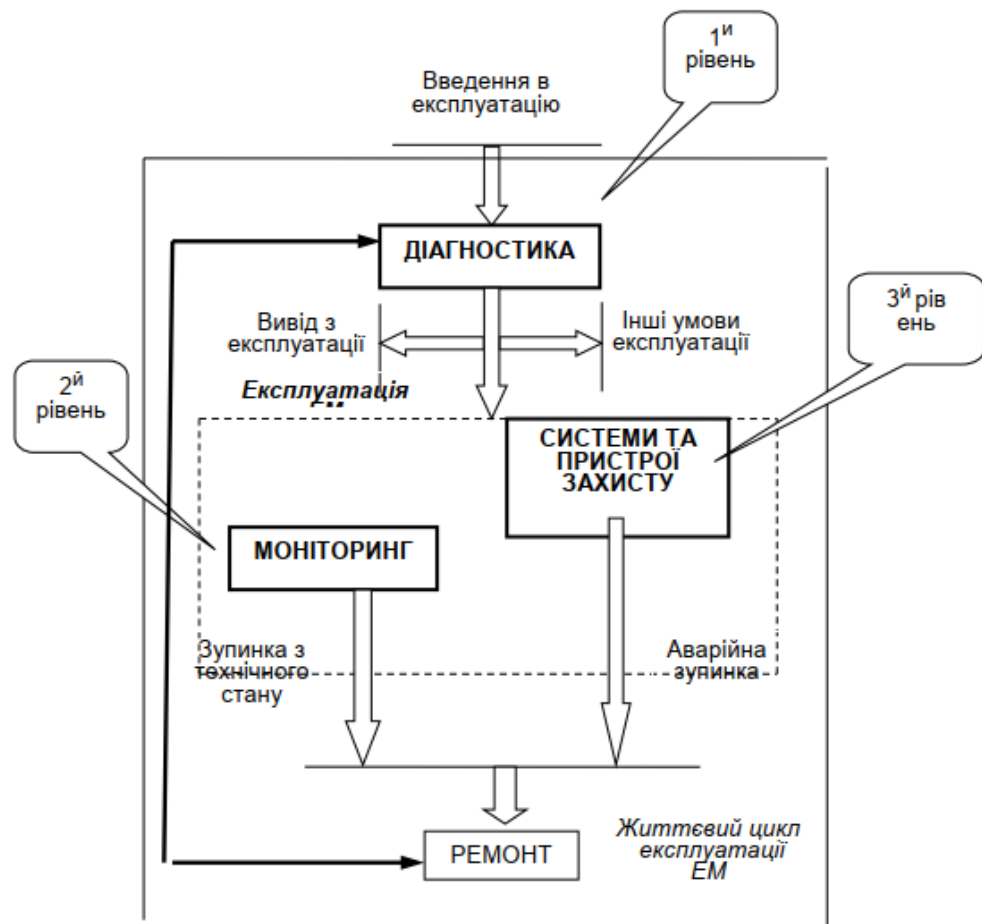


Рисунок 1.5 – Загальна схема експлуатації електродвигуна

Забезпечення нормального стану роботи електродвигуна забезпечується блоками діагностики, моніторингу та блоком системи та пристроїв для виконання захисту.

Першочерговим є визначення реального стану електродвигуна в блоці діагностики. При експлуатації електродвигуна оцінка його реального стану виконується при проведенні моніторингу, що включає в себе різноманітні мобільні комплекси.

В результаті отримуємо фактично повний захисті електродвигуна від різноманітних проблем відповідно до рисунку 1.5. При цьому реалізація особливостей систем діагностики включає в себе фактично комп'ютеризовані комплекси, хоча і реалізація подібної системи пов'язується з певними труднощами.

Для більш детального розгляду наведемо особливості реалізації інтелектуальної системи захисту електродвигуна. В реалізації даного підходу використовується певне перетворення отриманої інформації з зовні. Загальний вигляд інтелектуальної системи захисту наведено на рисунку 1.6.

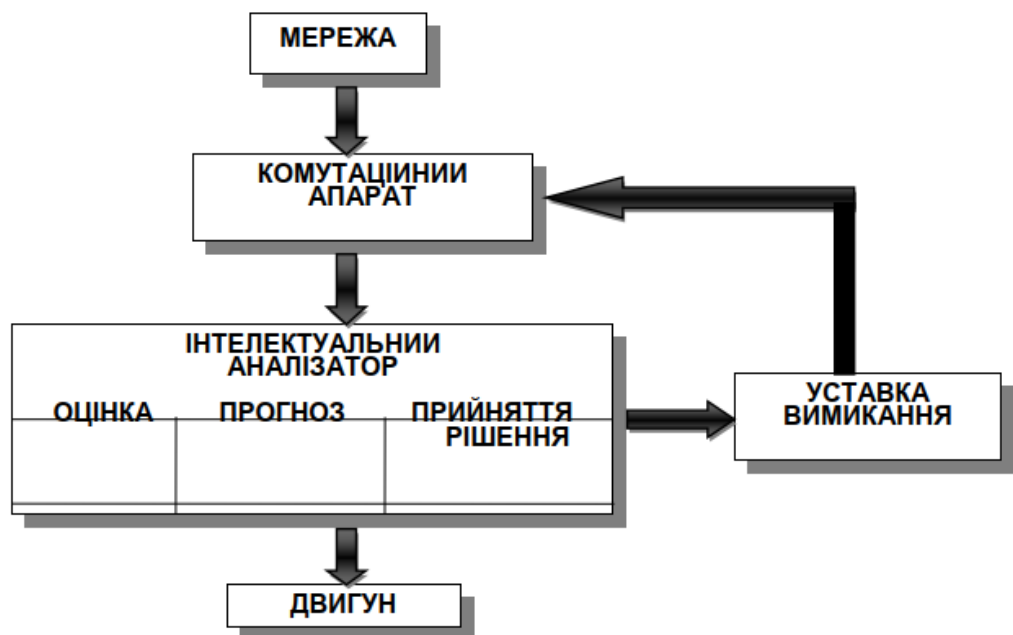


Рисунок 1.6 – Схема реалізації інтелектуального захисту електродвигуна

Запропонована схема реалізації захисту дозволяє здійснювати контроль на всіх рівнях експлуатації електродвигуна.

Керування загальною системою захисту реалізується пристроєм інтелектуального аналізу, що в свою чергу дозволяє виконувати операції оцінки, прогнозування та в подальшому прийняття необхідного рішення.

### **Висновки до розділу**

Проведений аналіз основних режимів, що призводять до ненормальної роботи чи несправностей електродвигуна показує підхід до пристроїв захисту. Реалізація захисту електродвигуна може бути виконана з використанням класичних реле, що фактично повинні враховувати необхідну функцію захисту. Використання мікропроцесорної техніки для реалізація системи захисту є більш продуктивною та дозволяє реалізувати автоматизацію процесу захисту в подальшому.

## 2 ФОРМУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ АНАЛІЗУ АВАРІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

### 2.1 Аналіз якісних показників перетворення енергії в електродвигуні в якості критерію для проведення оцінки його роботи

При умові нормальної експлуатації електродвигуна параметри різноманітних інформаційних сигналів не мають залежності в проміжку часу. Порушення, що описані в першому розділі приводять до зміни основних характеристик роботи електродвигуна. Подібні зміни можуть бути трьох видів – швидкі, повільні чи стрибкоподібними. Стрибкоподібні зміни приводять до виникнення пошкоджень чи значних параметрів відхиленні від нормативних параметрів.

Як вже зазначалось не останню роль на роботу електродвигунів має і якість електричної енергії, що викликає певний набір несправностей. Але основною умовою є розділення параметрів якості електричної енергії та якісних показників роботи електродвигуна.

Забезпечення роботи електродвигуна та контроль за його станом застосовують наступні показники:

1. Коефіцієнт, що враховує ефективність споживання електроенергії з мережі:

- відповідно до фази:

$$\varepsilon_{pj} = \frac{P_{0j}(t)}{P_e(t)} 100\% \quad (2.1)$$

де  $j$  – величина потужності, що є середнім по фазах А, В, С;

$P_{0j}(t)$  – усереднена величина потужності по фазі;

$P_e(t)$  – середня квадратична величина, що враховує параметр потужності електродвигуна.

- узагальнена величина, що в загальному випадку характеризує показники неякісного перетворення електроенергії:

$$\varepsilon_p = \frac{P_0(t)}{P_e(t)} 100\% \quad (2.2)$$

2. Коефіцієнти врахування нерівномірності по величині завантаження по фазах:

$$K_{\text{НЗС}(j)} = \frac{3\sqrt{\sum I_{n(j)}^2}}{\sqrt{\sum I_{n(A)}^2} + \sqrt{\sum I_{n(B)}^2} + \sqrt{\sum I_{n(C)}^2}} \quad (2.3)$$

$$K_{\text{НЗТ}(j)} = \frac{3\sqrt{\sum I_{n(j)}^2 R_j}}{\sqrt{\sum I_{n(A)}^2 R_A} + \sqrt{\sum I_{n(B)}^2 R_B} + \sqrt{\sum I_{n(C)}^2 R_C}} \quad (2.4)$$

3. Коефіцієнт, що сприяє врахуванню зміни моменту:

$$K_M = 1 - \frac{M_0}{M_d} \quad (2.6)$$

де  $M_0$  – складова врахування електромагнітного моменту;

$M_d$  – величина середньоквадратичного моменту.

$$M_d = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (M_0 + \sum_{n=1}^{\infty} M_n \sin(n\omega t + \varphi_n))^2 dt} = \sqrt{M_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} M_n^2} \quad (2.7)$$

4. Коефіцієнт, що характеризує вібраційний параметр електродвигуна:

$$K_B = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} M_n^2}}{\sqrt{M_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} M_n^2}} \quad (2.8)$$

Всі ці перераховані показники мають на меті характеризувати якість перетворення електричної енергії. Визначення їх значень дозволяють характеризувати ефективність для конкретного робочого двигуна в електричній мережі. Виходячи з отриманих значень можна проводити певний перерозподіл по параметрам та покращувати роботу електродвигуна.

## **2.2 Аналіз особливостей використання вейвлет-перетворення при проведенні контролю електродвигуна**

На сьогодні вейвлет-перетворення є найбільш прогресивним методом аналізу показників контролю за роботою електродвигуна. Перетворення Фур'є здатне описати сигнал лише в області його частоти. При цьому метод Фур'є не дозволяє вирішувати питання часового аналізу сигналу, також не можливо проводити певні порівняння різних апаратних функцій.

Проведення аналізу з використанням вейвлет-перетворення дозволяє аналізувати сигнали для різних компонент сигналу. Виходячи з цього даний метод аналізу дозволяє проводити розкладання сигналу на необхідні прості складові. Подібний підхід дозволяє виокремлювати перешкоди сигналу та досліджувати сам сигнал, а отже можна проводити аналіз саме з чистим сигналом для проведення контролю параметру.

Більш складнішим параметром є проведення аналізу сигналу в часовому параметрі. Саме дана перевага сприяє поширенню вейвлет-перетворення. Одним з різновидів вейвлет-перетворення є ліфтинг-схема, що є саме перетворенням другого покоління.

Виходячи з цього для проведення аналізу роботи системи мікропроцесорного захисту вейвлет-перетворення з використанням ліфтинг-схеми. Дослідження планується проводити в декілька етапів кожен з яких містить в своїй структурі три більш прості кроки. Результатом застосування даного методу є отримання певного набору точок, що мають позначення -  $S_{j-1}$  та  $d_{j-1}$ . При цьому використовується наступна послідовність аналізу:

1. Проведення розділення при якому формується по два набори сигналів, що взаємно не перетинаються. Для позначення даної операції оберемо певну величину  $s$ , в результаті отримаємо рівняння:

$$(even_{j-1}, odd_{j-1}) = S(s_j) \quad (2.9)$$

2. Проведення передбачення. За умови відсутності кореляції можна проводити певні передбачення по значенням. Додатково при проведенні передбачення можна провести розподіл на парні чи непарні значення. Це потребує подальшого обчислення з наближеним відліком. Обчислення різниці в значеннях дозволяє отримати базу коефіцієнтів  $d_{j-1}$ , що описуються рівнянням:

$$d_{j-1} = odd_{j-1} - P(even_{j-1}) \quad (2.10)$$

де  $P$  – оператор проведення передбачення.

3. Проведення оновлення. На даному етапі проводиться певна модифікація раніше отриманих значень. Дана операція виконується з використанням оператора  $U$ , що враховує величину оновлення та отримуємо відповідні коефіцієнти  $s_{j-1}$ :

$$s_{j-1} = even_{j-1} + U(d_{j-1}) \quad (2.11)$$

Далі проведення подальшого аналізу необхідною умовою є побудова схеми для аналізу перетворення з використанням ліфтинг-схеми. Схема для проведення аналізу наведена на рисунку 2.1.

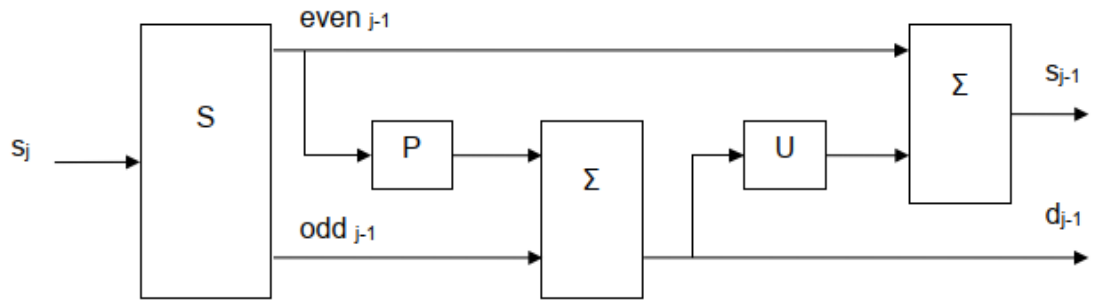


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд ліфтинг-схеми досліджуваного процесу

Загалом цифровий сигнал має певний набір сигналів, що є цифровими. При цьому розмір даних сигналів є фактично майже в два рази меншим в порівнянні з початковим.

Набір сигналів отриманих першими є певною характеристикою початкового сигналу. При цьому коефіцієнти типу  $s$  є середніми величинами значень сигналу. Коефіцієнти типу  $d$  характеризують значення відхилень від номінальних значень, при цьому дані відхилення є певного роду спрощеними величинами.

Необхідно зазначити, що в результаті отриманого вейлвет-сигналу можливо отримати певні значення, що фактично в точності описують початковий сигнал. Подальше удосконалення ліфтинг-схеми дозволяє збільшувати кількість коефіцієнтів для проведення більш точного розкладання першочергового сигналу.

Застосування вищенаведеної методики дає можливість провести аналіз для системи мікропроцесорного захисту електродвигуна. Так початковими умовами є використання вихідних даних, що характеризують електричну мережу, до якої підключений електродвигун. Виходячи з цього частота постійного сигналу знаходиться в межах 50 Гц, а також його амплітуда становить  $\sqrt{2} \cdot 220\text{В}$ .

Використовуючи основну формулу для проведення аналізу:

$$U_e = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2} \quad (2.12)$$

Використовуючи рівняння (2.12) та наведену ліфтинг-схему (рис. 2.1) проводиться аналіз. Додатково прийнято, що величина першого кроку для дискретизації становить  $0,1 \cdot 10^{-3}$ . Для другого кроку пропонується використовувати значення  $0,6 \cdot 10^{-3}$ . Виходячи з цих значень пропонується отримати фактично 200 точок, а для другого фактично 33 точки. Отримані графічні значення сигналів наведені на рисунку 2.2.

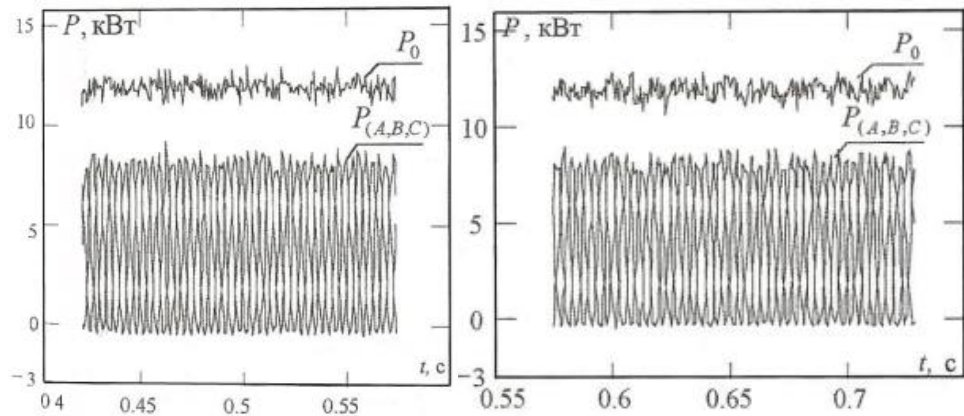


Рисунок 2.2 – Графічне позначення сигналу потужності та його складових

З отриманих графіків, можна зробити висновок, що застосування даного методу дозволяє аналізувати сигнали з перешкодами та без них. При цьому фактично не змінюється якість проведення аналізу.

Необхідно зазначити, що наступним кроком проведення аналізу дають необхідність побудови математичної модулі електродвигуна, що дозволить внести її в проведення аналізу вищенаведеними методами.

### 2.3 Математичне моделювання електродвигуна з врахуванням їх особливостей

Виходячи з вищенаведеного аналізу при моделюванні електродвигуна необхідно враховувати особливості його роботи в режимах – нормальному та ненормальному. Нормальний це режим роботи при якому електродвигун повністю справний та не має роботи в режимі перевантаження. Ненормальний режим роботи фактично буде характеризуватись певною проблематикою в його роботі чи навіть роботи за умови виникнення несправності.

Математичне моделювання електричного двигуна має на меті використання різноманітних комп'ютерних програм для полегшення процесу. Застосування комп'ютерних програм має на меті вирішення наступних задач:

- охопити максимальну кількість різноманітних кількісних чи якісних характеристик електродвигуна з врахуванням його параметрів;
- проведення визначення умов для отримання чи обробки даних параметрів та характеристик.

Вирішення всіх вищеперерахованих задач в комплексі дозволяє провести визначення ступеня мікропроцесорного захисту.

Основною метою моделювання електродвигуна є формування певної рівноваги роботи електродвигуна. Рівновага електродвигуна полягає в тому, що фактично електрична системи та механічна система мають баланс.

Додатково необхідно враховувати всі можливі явища, що виникають при роботі електродвигуна та інших елементів в загальній системі роботи.

Для формування математичної моделі необхідною умовою є опис її в трифазній координатній системі. При цьому для проведення дослідження роботи електродвигуна при його роботі в аварійному режимі за умови аналізу в трифазній системі можна записати в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \vec{u} &= \vec{i}_1 \vec{R}_1 k_{вз} + \frac{d\vec{\psi}_1}{dt} \\ 0 &= \vec{i}_2 \vec{R}_2 + \frac{d\vec{\psi}_2}{dt} \\ M_e &= \frac{\partial W_e}{dt} \\ M_e - M_c &= \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

де  $\vec{u}$  – величина вектору для миттєвих напруг по фазах;

$\vec{\psi}_1$  – величина потокових зчеплень по фазам статора;

$\vec{\psi}_2$  – величина потокових зчеплень по фазам ротора;

$\vec{R}_1$  та  $\vec{R}_2$  – величина активних опорів відповідно статора та ротора;

$W_e$  – значення електромагнітної енергії на обмотках електродвигуна;

$M_e$  та  $M_c$  – моменти відповідно електромагнітний та статичний в електродвигуні;

$\omega$  – величина кутової швидкості для ротора електродвигуна;

$J$  – значення моменту інерції;

$p$  – кількість пар полісів в електродвигуні.

При формуванні системи рівнянь додатковою умовою є врахування величини індуктивності для обмоток електродвигуна, а також значення взаємної індукції. В результаті можна отримати певні значення потокозчеплень для всіх фаз електродвигуна:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_A &= k_{\text{сз}} L_1 i_A + k_{\text{сз}} M_1 i_B + k_{\text{сз}} M_1 i_C + k_{\text{сз}} M_{12} \cos \varphi \cdot i_a + \\ &+ k_{\text{сз}} M_{12} \cos(\varphi + 120^\circ) i_b + k_{\text{сз}} M_{12} \cos(\varphi - 120^\circ) i_c, \\ \Psi_B &= (2 - k_{\text{сз}}) M_1 i_A + L_1 i_B + M_1 i_C + M_{12} \cos(\varphi - 120^\circ) i_a + \\ &+ M_{12} \cos \varphi \cdot i_b + M_{12} \cos(\varphi + 120^\circ) i_c, \\ \Psi_C &= (2 - k_{\text{сз}}) M_1 i_A + M_1 i_B + L_1 i_C + M_{12} \cos(\varphi + 120^\circ) \cdot i_a + \\ &+ M_{12} \cos(\varphi - 120^\circ) i_b + M_{12} \cos \varphi \cdot i_c \end{aligned} \right\}, \quad (2.14)$$

$$\left. \begin{aligned} \Psi_a &= L_2 i_a + M_2 i_b + M_2 i_c + (2 - k_{\text{сз}}) M_{12} \cos \varphi \cdot i_A + \\ &+ M_{12} \cos(\varphi - 120^\circ) i_B + M_{12} \cos(\varphi + 120^\circ) i_C, \\ \Psi_b &= M_2 i_a + L_2 i_b + M_2 i_c + M_{12} \cos(\varphi + 120^\circ) i_A + \\ &+ (2 - k_{\text{сз}}) M_{12} \cos \varphi \cdot i_B + M_{12} \cos(\varphi - 120^\circ) i_C, \\ \Psi_c &= M_2 i_a + M_2 i_b + L_2 i_c + M_{12} \cos(\varphi - 120^\circ) \cdot i_A + \\ &+ M_{12} \cos(\varphi + 120^\circ) i_B + (2 - k_{\text{сз}}) M_{12} \cos \varphi \cdot i_C \end{aligned} \right\}, \quad (2.15)$$

При цьому в розрахунки для загального випадку закладається те, що величина індуктивності визначається з суми індуктивностей для всіх фаз електродвигуна. При цьому дані величини розраховуються окремо для ротора та для статора. Теж саме стосується і визначення загального значення взаємної індукції в роторі та статорі електродвигуна.

Наступним показником є визначення величини електромагнітної індукції, що знаходиться з рівняння:

$$W_e = \frac{1}{2} [\Psi_A i_A + \Psi_B i_B + \Psi_C i_C + \Psi_a i_a + \Psi_b i_b + \Psi_c i_c] \quad (2.16)$$

Отримані вирази математичної моделі дають можливість проводити аналіз електродвигуна. При цьому основною перевагою даної математичної моделі є використання її в трифазній системі координат для проведення дослідження.

Іншою перевагою є можливість формування певних режимів ненормальної роботи, що здатні моделювати аварійні процеси в електродвигуні.

Додатковою умовою використання даної математичної моделі є можливість визначення певного перехідного процесу, що виникає між нормальною роботою та ненормальною роботою електродвигуна.

### **Висновки до розділу**

Проведений аналіз методів дослідження захисту електродвигуна потребує врахування всіх можливих варіантів його роботи. При цьому необхідно зазначити, що врахування аварійного режиму роботи необхідне для забезпечення загальної працездатності системи захисту. Подібний підхід потребує вибору більш чітко основних методів проведення аналізу роботи електродвигуна, що фактично можна зробити на основі вейлвет-аналізу. Всі системи захисту, в тому числі і мікропроцесорні будуються на основі відхилення параметрів роботи електродвигуна від усталеного режиму роботи, а отже запропонована математична модель дозволяє фактично вирішити дане завдання.

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

#### 3.1 Особливості роботи електродвигуна в режимі пуску та формування схем мікропроцесорного захисту

При запуску електродвигуна виникають значні електромагнітні та перехідні процеси. В результаті даних процесів спостерігається ріст пускових струмів та ріст моменту пускового. Необхідно зазначити, що при збільшенні потужності електродвигуна спостерігається певне зростання всіх його параметрів.

На сьогодні доведено, що в результаті пуску електродвигуна спостерігається струми, що вищі в майже в 9,5 разів. Але необхідно зазначити, що значення пускового струму є більшим за струми короткого замикання фактично в 1,7 рази. Необхідно врахувати подібні значення та навести графік з розподілом показників в режимах пуску (рис. 3.1).

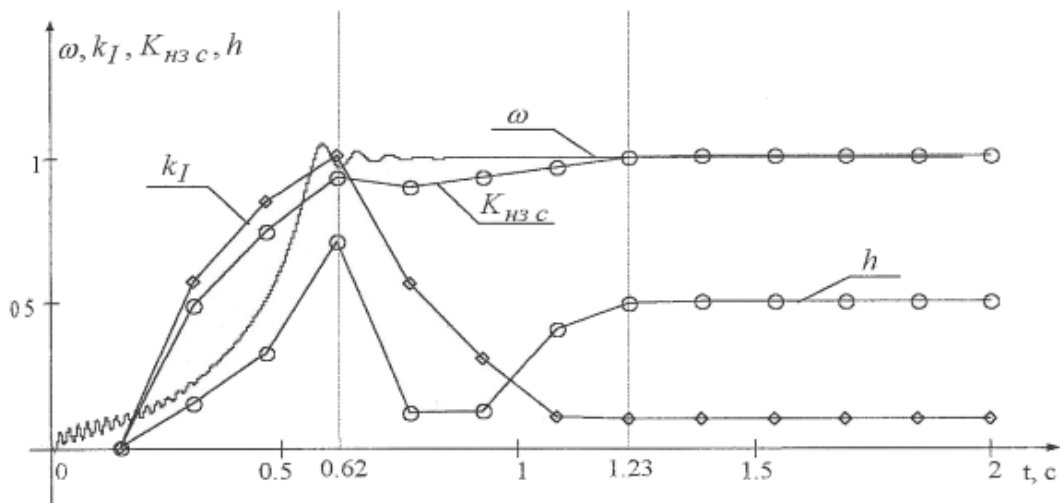


Рисунок 3.1 – Показники роботи електродвигуна в режимах пуску

Виходячи з такого розподілу при врахування мікропроцесорного захисту потрібно враховувати дану зміну параметрів всіх величин. Оскільки всі ці значення є значно вищими ніж уставлені показники роботи, а отже необхідною умовою є врахування мікропроцесорного захисту з розпізнаванням даних пускового режиму.

Виходячи з цього необхідною умовою є врахування структури прийняття рішень для системи мікропроцесорного захисту. В результаті при застосуванні мікропроцесорного захисту використовують структуру, що наведена на рисунку 3.2.

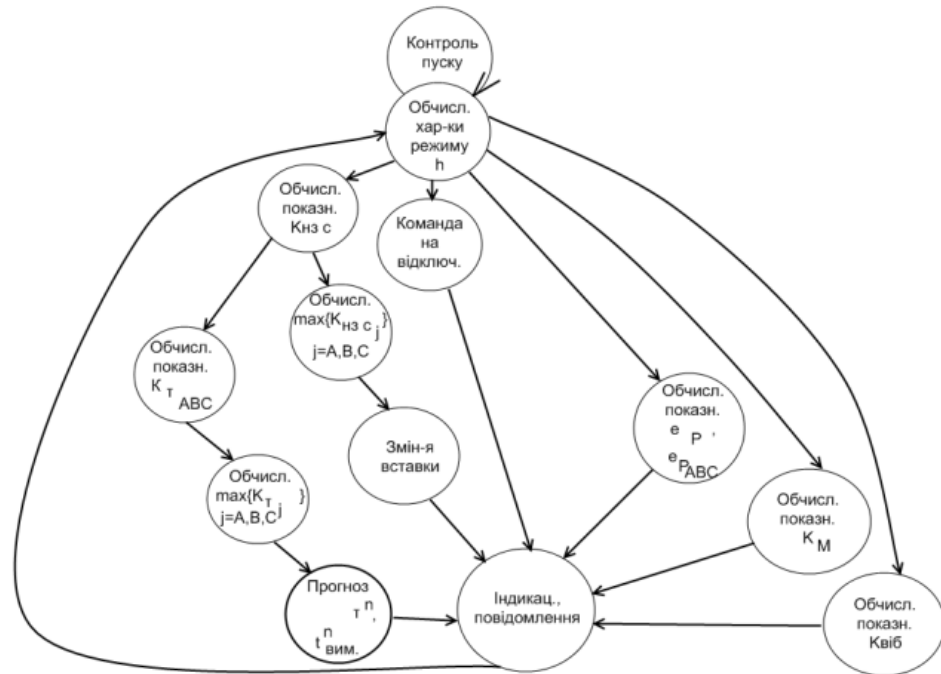


Рисунок 3.2 – Загальна структура для організації прийняття рішення мікропроцесорною системою захисту

Початковим етапом роботи мікропроцесорного захисту є проведення контролю основних параметрів роботи електродвигуна. В результаті отриманих значень проводиться визначення режиму роботи електродвигуна та виконується його обчислення основних характеристик.

Наступною дією роботи системи захисту виконується визначення відповідної наступної дії, з визначенням основних параметрів на кожному рівні. Кожне з даних рішень системи захисту повинно подаватись до працівника, що виконує перевірку роботи системи захисту.

Прийняття рішень системою захисту здійснюється в результаті обробки параметрів та подальшого спрацювання системи захисту з подальшим відключенням електродвигуна від роботи.

Виходячи з цього основний пристрій для виконання захисту електродвигуна матиме наступний вигляд (рис. 3.3).

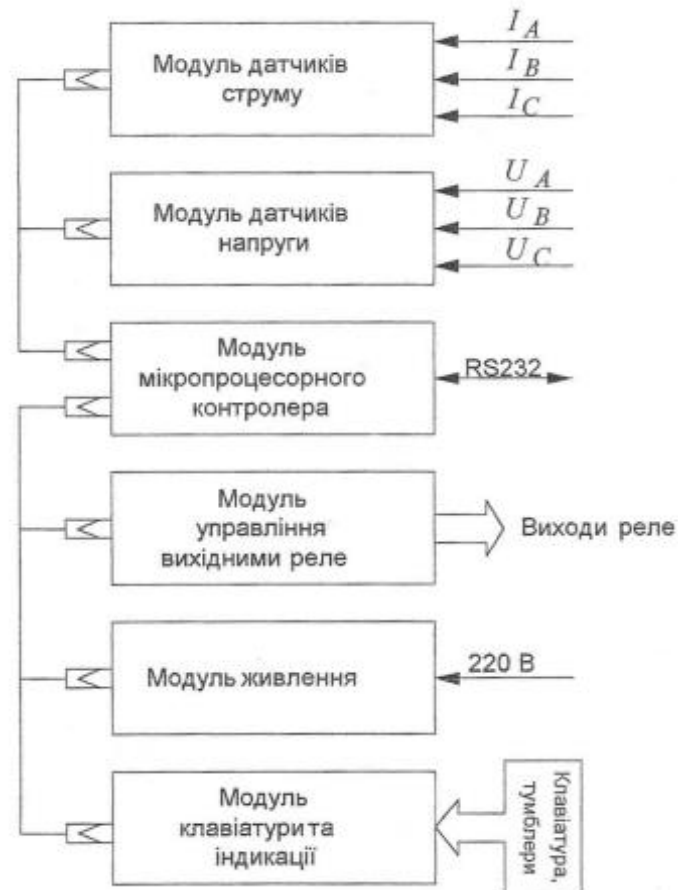


Рисунок 3.3 – Загальна схема захисту електродвигуна

Загальна схема захисту (рис. 3.3) електродвигуна складається з різноманітних модулів, що відповідають за ввід даних та вивід. При цьому для вводу інформації використовуються різноманітні датчики, а також клавіатура пристрою.

Інформація обробляється в мікропроцесорному модулі та формується вихідний сигнал на прийняття рішень. Вивід інформації з конкретним рішенням спрацювання захисту виконується через модуль управління.

В загальному вигляді принципова схема мікропроцесорного захисту електродвигуна має наступний вигляд, що наведений на рисунку 3.4.

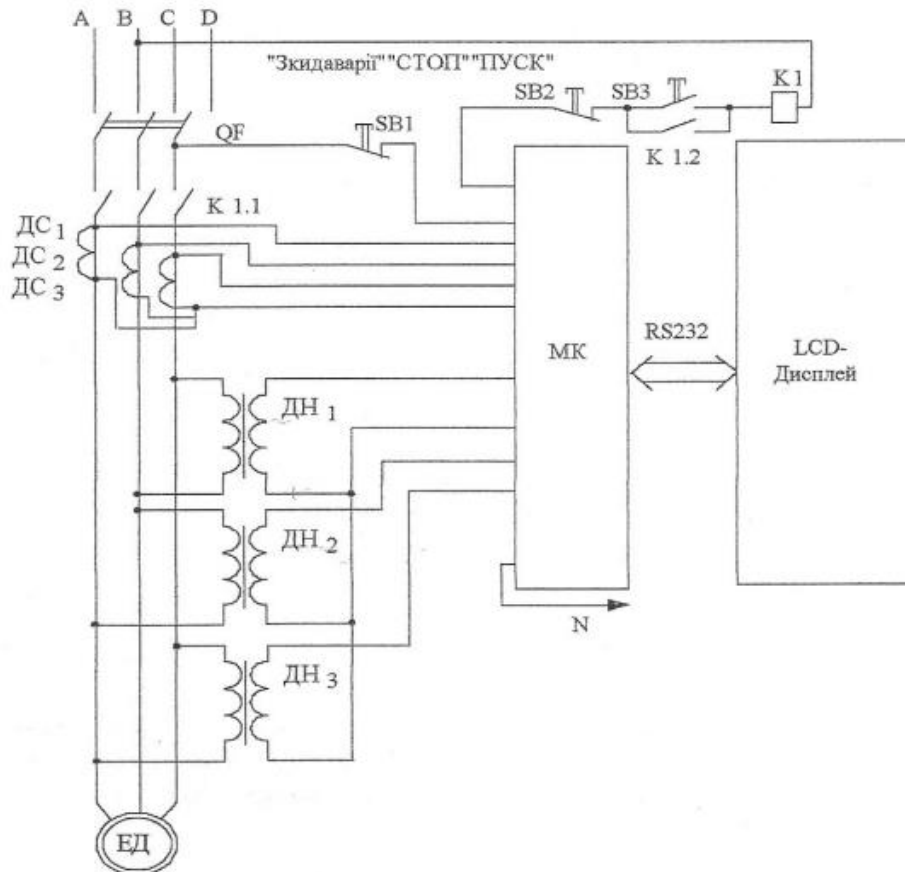


Рисунок 3.4 – Принципова схема організації мікропроцесорного захисту електродвигуна

### 3.2 Дослідження регулювання з використанням вставки спрацювання

Всі принципи захисту електродвигунів базуються на використанні в своїх системах різноманітних фізичних процесів. Вставка спрацювання за параметром струму відкриває перед системою захисту нові можливості з можливістю реалізації системи захисту на будь який параметр в електродвигуні. Додатково дозволяє враховувати параметри технічного стану досліджуваного електродвигуна, а також можливість врахування його навантаження.

Пропонується розглянути ситуацію, коли при роботі електродвигуна в усталеному режимі виникає одноразове та тривале перевантаження. При цьому пропонується розглянути виникнення подібних ситуацій з боку електродвигуна та електричної мереже до якої він підключений. Для спрацювання захисту пропонується величину перевантаження вважати

фактором, що є не визначальним. Тобто пропонується розглянути ситуацію, при якій зі зміною навантаження відбулась зміна струму. При цьому зміна струму не досягла значення для реагування вставки спрацювання. Загальний вигляд графіку наведено на рисунку 3.5.

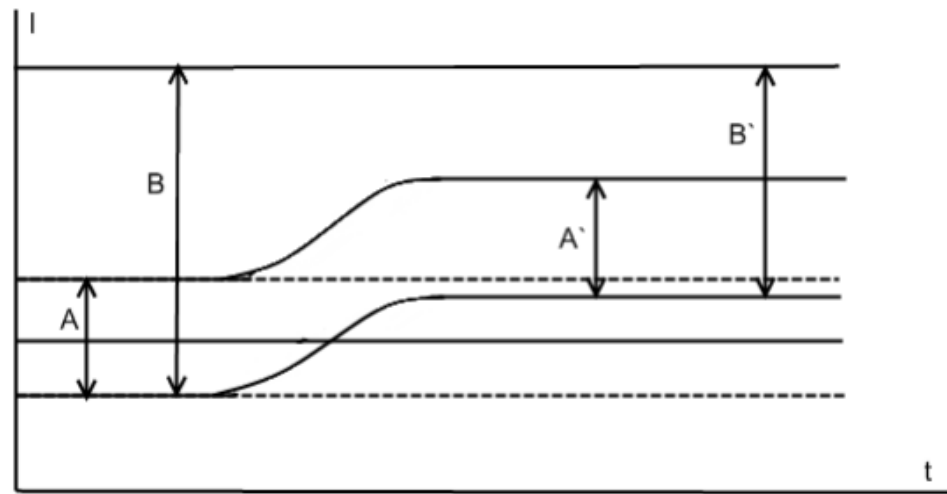


Рисунок 3.5 – Схема моделювання зміни значення струму електродвигуна через зміну його робочого режиму

З рисунку 3.5 можна поділити графік на декілька зон: зона А та В. Зона А – це зона з номінальним значенням струму у відповідності до умов заданих технічними даними. Зона В відповідно, це зона в якій електродвигун може працювати в допустимому режимі.

Як бачимо, що в результаті зміни значення струму спостерігається звуження зони В'. При цьому після зміни величини струму спостерігається певна зміна зони А на величину рівнозначну А'.

В даному випадку (рис. 3.5) при зміні струму двигун продовжує працювати але додаткові незначні коливання величини струму можуть призвести до зупинки електроживуна чи виходу його в аварійний режим. При цьому спрацює вставка та зупинить електродвигун.

Виходячи з цього необхідно зазначити, що величина зони А фактично диктується паспортними даними. При цьому зона В повинна бути обмежена вставкою, що розрахована на певне значення струму.

Даний метод можна охарактеризувати наступним рівнянням:

$$I'_B = I_B(2 - \max\{K_{H3Cj}\}) \quad (3.1)$$

де  $I_B$  – величина струмової вставки згідно з паспортними даними.

$K_{H3Cj}$  – величина для показника струмове завантаження по фазам.

При проведенні аналізу мікропроцесорного захисту електродвигуна при різних режимах несиметрії було отримано результати, що наведені в таблиці додатку А1. На основі отриманих даних було побудовано графіки імітації для різних режимів несиметрії (рис. 3.6 та 3.7).

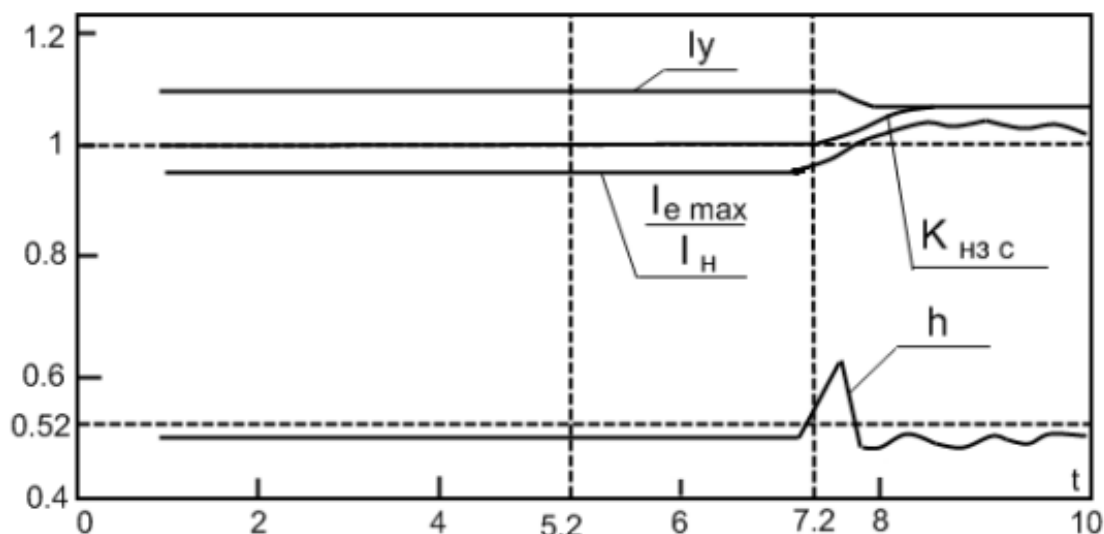


Рисунок 3.6 – Графік імітації несиметрії величини напруги з параметрами  $k_{2U} = 2\%$  та момент часу  $t = 7,2$  с

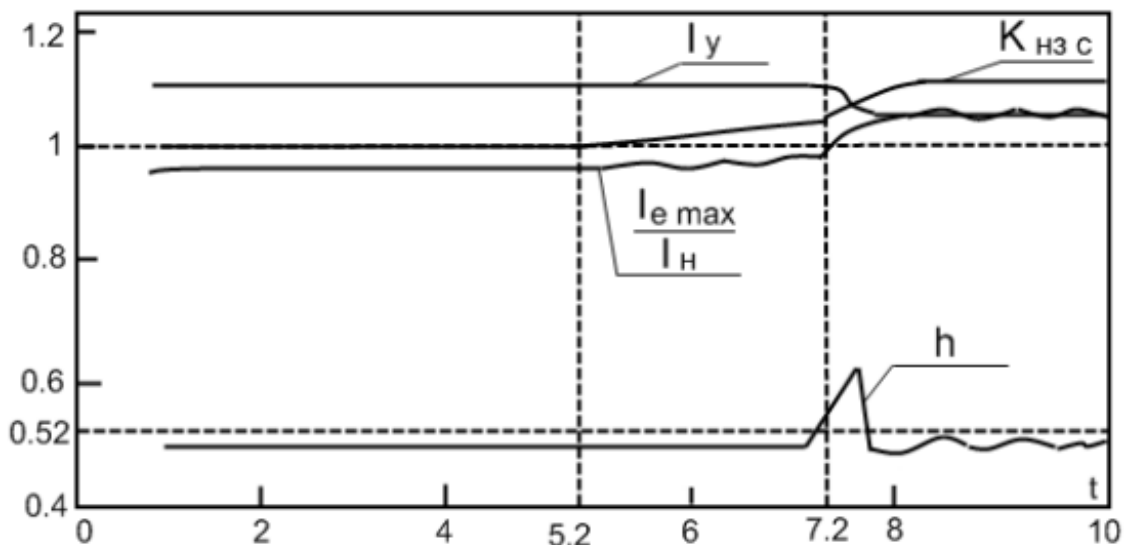


Рисунок 3.7 – Графік імітації несиметрії величини напруги з моментом часу  $t = 7,2$  с

З даних рисунків видно, що за умови несиметрії величини напруги з параметрами  $k_{2U} = 2\%$  та момент часу  $t = 7,2$  с призводить фактично до зміни в режимі роботи електродвигуна. Виходячи з цього планується певного роду спрацювання вставки для виконання захисту.

### **Висновки до розділу**

Мікропроцесорний захист електродвигуна є якісним рішенням по захисту від різноманітних режимів, що є неусталеними. При цьому необхідною умовою є врахування максимальної кількості можливих параметрів для вирішення питання захисту електродвигуна. В результаті проведених досліджень роботи та захисту електродвигуна в режимах несиметрії можемо зазначити, що при високих її значеннях спостерігається фактично повна зупинка електродвигуна. В результаті даних можливо виконати необхідний захист та обрати для подальшого їх контролю, при цьому необхідною умовою є врахування пускових режимів його роботи.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Основною проблемою при проведенні заходів з охорони праці є врахування всіх небезпечних факторів на виробництві. На сьогодні доволі велика кількість виробничих процесів використовує різноманітні електродвигуни. При цьому електродвигуни можуть працювати в декількох режимах, що мають вплив на рівень безпеки при роботі з ними.

Основним режимом роботи електродвигуна є усталений режим за якого фактично відсутні аварійні ситуації з ним. Даний режим роботи електродвигунів має стабільні параметри, а отже основними небезпеками, що виникають при роботі з ним є:

- ураження електричним струмом;
- потрапляння людини під рухомі частини машини, що обертаються від електродвигуна.

Фактично це всі можливі небезпеки в даному режимі. Але необхідно зазначити, що у випадку усталеної роботи електродвигуна йому виконують лише операції технічного обслуговування.

Виходячи з цього проводити будь-які операції з електричним двигунами проводяться при відключеному електропостачанню. При цьому вивіщується спеціальна табличка з написом «Працюють люди» на щит керування електродвигуна. Додатково перевіряється робота системи мікропроцесорного захисту, що виконується програмою тестування, що закладена в загальну програму захисту.

Ремонти проводяться для несправних електричних двигунів. При цьому вони працюють в певних аварійних режимах, що характеризуються різноманітними обривами фаз, вібраціями чи підвищенням температури основних його елементів.

Аварійні режими роботи електродвигуна викликають збільшення небезпек, що пов'язані з враженням електричним струмом через обрив фаз. При цьому забороняється проводити роботи з подібним двигуном без

першочергового відключення його від електричної мережі та провести перевірку напруги на всіх контактах.

Вібрація електродвигуна спричиняє певний ряд проблем, що в першу чергу пов'язаний з нагрівом електродвигуна та пошкодженням різноманітних елементів електроприводу.

Пошкодження елементів електроприводу може приводити до пошкодження обладнання та до виводу з ладу захисних огорожень. При цьому виконання робіт та огляд електродвигуна обов'язково проводиться після повної його зупинки.

Необхідно також зазначити, що в результаті тривалої вібрації електродвигуна виникає негативний вплив на працівників, що працюють в приміщеннях. Виходячи з цього боротьба з вібраціями повинна проводитись з точки зору охорони праці та зменшення її на виробництві.

Нагрівання електродвигуна може виникати не лише через вібрацію. Нагрівання може також виникати в результаті в результаті пошкодження обмоток електродвигуна. Основною небезпекою, від перегрівання електродвигуна може виникати пожежонебезпечні ситуації. При цьому загорання може виникати в ізоляційних матеріалах електродвигуна.

Горіння різноманітних елементів електродвигуна виділяють в навколишнє середовище шкідливі речовини, що можуть спричинити отруєння працівників. Необхідно зазначити, що в результаті подібних пожеж можливі ситуації загорання іншого обладнання та значних пожеж. Необхідною умовою для забезпечення потрібного рівня охорони праці на виробництві є забезпечення засобами пожежогасіння.

Додатково слід звернути увагу на використання мікропроцесорного захисту електродвигунів. Вона є більш надійнішою та в повній мірі автоматизованою, що дозволяє зменшити рівень взаємодії людини з електрообладнанням.

При цьому необхідно зазначити, що всі роботи з електроенергією повинні виконуватись кваліфікованими працівниками з дотриманням всіх заходів з охорони праці, електробезпеки та пожежної безпеки. Працівники, що

проводять дані роботи повинні бути забезпечені відповідними засобами захисту та необхідним інструментом.

Категорично забороняється експлуатувати електродвигуни, що мають пошкодження або працюють в аварійних режимах. При цьому забороняється іншим працівникам намагатись вирішити проблеми з електродвигуном.

### **Висновки до розділу**

Дотримання основних наведених заходів з охорони праці дозволяє уникнути небезпечних ситуацій та зменшити рівень травматизму. Оскільки захист електродвигунів на пряму впливає на його працездатність необхідною умовою є забезпечення їх мікропроцесорними захисними пристроями.

## 5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Необхідно зазначити, що всі показники економічної ефективності повинні давати можливість економії обладнання та різноманітних варіантів зменшення вартості обслуговування. захист від несиметричних режимів роботи дає можливість зменшення частоти аварій електродвигунів на технологічній лінії. Розрахунок економічних показників проводять в наступній послідовності.

1. Визначають значення чистого прибутку:

$$П_{ч} = E_{річ} - \Delta П_{м} - \Delta П_{пр} \quad (5.1)$$

де  $E_{річ}$  – показник економії затрат на експлуатацію за рік, грн

$\Delta П_{м}$  – майновий приріс, грн;

$\Delta П_{пр}$  – значення приросту для ставки прибутку, грн.

$$E_{річ} = (E_{д}^{кр} \cdot C_{д}^{кд}) \frac{1}{n} + Z_e + (E_{бе} \cdot n) - \Delta AB \quad (5.2)$$

де  $E_{д}^{кр}$  – економія через зменшення кількості ремонтів АД, грн;

$\Delta AB$  – значення приросту амортизаційних відрахуваннях.

$E_{бе}$  – річне значення економічного ефекту, грн.

$$E_{д}^{кр} = e_{д}^{кр} \cdot a_{д}^{кр} \quad (5.3)$$

$$E_{д}^{кр} = 0,343 \cdot 20 = 6,86 \text{ грн}$$

$$\Delta AB = AB \cdot C_{ey} \quad (5.4)$$

$$\Delta AB = 0,05 \cdot 20000 = 1000 \text{ грн}$$

$$E_{бе} = \frac{A_{д} + P_{д}}{s} n_{пр.в} \left( \frac{k_{пр} - 1}{k_{пр}} \right) \quad (5.5)$$

$$E_{річ} = (6,86 \cdot 2500) \frac{1}{20} + 12 + (240 \cdot 20) - 1000 = 4670 \text{ грн}$$

$$\Delta\Pi_M = \Pi_M \frac{C_{ey} + 0,05C_{ey}}{2} \quad (5.6)$$

де  $\frac{C_{ey} + 0,05C_{ey}}{2}$  – балансова вартість пропозиції, грн.

$$\Delta\Pi_M = 0,022 \frac{20000 + 0,05 \cdot 20000}{2} = 231 \text{ грн}$$

$$\Delta\Pi_{пр} = 0,24(E_{річ} - \Delta\Pi_M) \quad (5.7)$$

$$\Delta\Pi_{пр} = 0,24(4670 - 231) = 1065 \text{ грн}$$

$$\Pi_ч = 4670 - 231 - 1065 = 3374 \text{ грн}$$

Економічний ефект знаходять:

$$E_p = \frac{\Pi_ч - K_{дод}}{K_p + K_e} \quad (5.8)$$

де  $K_{дод}$  – річні витрати заходів реновації,  $K_{дод} = 267$  грн;

$K_p$  – значення реноваційного коефіцієнту  $K_p = 0,89$ ;

$K_e$  – нормативний коефіцієнт для приведення витрат,  $K_e = 0,1$ ;

$$E_p = \frac{3374 - 267}{0,89 + 0,1} = 3138 \text{ грн}$$

Термін окупності запропонованої системи визначається з виразу:

$$T_{ок} = \frac{C_{ey}}{E_p} \quad (5.9)$$

$$T_{ок} = \frac{20000}{3138} = 6,3 \text{ роки}$$

Таблиця 5.1 – Ефективність застосування захисту електродвигуна

№ з/п	Показник	Значення
1	Чистий прибуток, грн	3374
2	Економія експлуатаційних витрат за рік, грн	4670
3	Економічний ефекту, грн	3138
4	Термін окупності, років	6,3

### **Висновки до розділу**

Економічна оцінка запропонованих рішень підтверджує їх ефективність, а отже можна отримати доволі гарні результати по застосуванню захисту електричних двигунів. При цьому застосування її має гарний показник економії експлуатаційних витрат 4670 грн, при цьому термін окупності становить 6,3 роки.

## ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Проведений аналіз основних режимів, що призводять до ненормальної роботи чи несправностей електродвигуна показує підхід до пристроїв захисту. Реалізація захисту електродвигуна може бути виконана з використанням класичних реле, що фактично повинні враховувати необхідну функцію захисту. Використання мікропроцесорної техніки для реалізація системи захисту є більш продуктивною та дозволяє реалізувати автоматизацію процесу захисту в подальшому.

2. Проведений аналіз методів дослідження захисту електродвигуна потребує врахування всіх можливих варіантів його роботи. При цьому необхідно зазначити, що врахування аварійного режиму роботи необхідне для забезпечення загальної працездатності системи захисту. Подібний підхід потребує вибору більш чітко основних методів проведення аналізу роботи електродвигуна, що фактично можна зробити на основі вейлвет-аналізу. Всі системи захисту, в тому числі і мікропроцесорні будуються на основі відхилення параметрів роботи електродвигуна від усталеного режиму роботи, а отже запропонована математична модель дозволяє фактично вирішити дане завдання.

3. Мікропроцесорний захист електродвигуна є якісним рішенням по захисту від різноманітних режимів, що є неусталеними. При цьому необхідною умовою є врахування максимальної кількості можливих параметрів для вирішення питання захисту електродвигуна. В результаті проведених досліджень роботи та захисту електродвигуна в режимах несиметрії можемо зазначити, що при високих її значеннях спостерігається фактично повна зупинка електродвигуна. В результаті даних можливо виконати необхідний захист та обрати для подальшого їх контролю, при цьому необхідною умовою є врахування пускових режимів його роботи.

4. Дотримання основних наведених заходів з охорони праці дозволяє уникнути небезпечних ситуацій та зменшити рівень травматизму. Оскільки

захист електродвигунів на пряму впливає на його працездатність необхідною умовою є забезпечення їх мікропроцесорними захисними пристроями.

5. Економічна оцінка запропонованих рішень підтверджує їх ефективність, а отже можна отримати доволі гарні результати по застосуванню захисту електричних двигунів. При цьому застосування її має гарний показник економії експлуатаційних витрат 4670 грн, при цьому термін окупності становить 6,3 роки.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Kholiddinov I. Kh, Musinova Gulasalkhon, Yulchiev M.E., et al. Modeling of calculation of voltage unbalance factor using Simulink (Matlab) // The American Journal of Engineering And Techonology. 2020. V.2. № 10. pp. 33-37.
2. Півняк Г.Г. Особливі режими електричних мереж: Навчальний посібник / Г.Г. Півняк, А.К. Шидловський, Г.А. Кігель, А.Я. Рибалко, О.І. Хованська. – Д.: Національний гірничий університет, 2009. – 376 с.
3. Вовк О.Ю. Метод періодичного діагностування асинхронних двигунів/ О.Ю. Вовк, Л.М. Безменнікова, С.О. Квітка // Праці ТДАТУ. – 2010. - № 10, Т4. - С. 39-46.
4. Попова І. О. Контроль режимів роботи асинхронних двигунів при несиметрії напруг мережі: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.16 "Електротехнології та електрообладнання в агропромисловому комплексі" / І. О. Попова. – Мелітополь, 2003. – 20 с.
5. Патент 69523 А, Україна, МПК7 Н02Р 5/04. Пристрій захисту асинхронного двигуна / Родькін Д.Й., Чорний О.П., Живота В.Ф. [та інші]; заявник і правовласник Кременчуцький державний політехнічний університет імені Михайла Остроградського. – № 2003042859 опубл. 5.09.2004. Бюл. №9, 2004 р.
6. Калінова. П. Математичні моделі для дослідження впливу конструктивних несиметрій електричних машин на їх електромагнітні параметри/ Калінова. П., Мамчур Д. Г. // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. – Вип. 3(44). – Ч. 2. - Кременчук: КДПУ, 2007. – С. 150–154
7. Гераскін О. А. Вібродіагностика ушкоджень роторів потужних асинхронних двигунів на основі польових математичних моделей: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.09.01 / НАН України, Ін-т електродинаміки. – К., 2012. – 18 с.
8. М. В. Загірняк, Д. Г. Мамчур, А. П. Калінов, А. В. Чумачова Діагностика асинхронних двигунів на основі аналізу сигналу споживаної потужності : монографія – Кременчук, 2013. – 208 с.

9. Ю. М. Васьковський, О. А. Гераскін Математичне моделювання та експериментальні дослідження вібрацій асинхронних двигунів Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр. - К.: ІЕД 176 НАНУ, 2011. - Вип 30. - С. 68-75

10. Сьомка О. О., В. В. Прус Перспективні структури моделей прогнозування надійності електричних машин із суттєвим напрацюванням на відмову XIV Міжнародна науково-технічна конференція “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”: Матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ імені Михайла Остроградського, 2015. – С. 126-127.

11. Somka O, M. Zagirnyak, V. Prus. Reliability Models of Electric Machines with Structural Defects Proceedigs 2015 16th International Conference on “Computational Problems of Electrical Engineering” CPEE–2015, – Lviv, Ukraine, 2015. – p. 249-251.

12. Сьомка О. О. Розробка методів дослідження та прогнозування показників надійності асинхронних двигунів XV Міжнародна науково-технічна конференція “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”: Матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ імені Михайла Остроградського, 2016. – С. 164-165.

13. Somka O., M. Zagirnyak, V. Prus, The methods for accounting the degree of electric machines aging in the assessment of their reliability 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES) – Kremenchuk, Ukraine, 2019. – P.194-197

14. Billinton and Ronald N. Allan, “Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques”, Second Edition, Springer-Verlag, Berlin 181 (Germany), 2008. – 342 p.

15. Matlab, Getting Started Guide, R2011b. The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive, Natick, MA 01760-2098, USA, 276 p.

16. Сьомка О. О., В. В. Прус Комп’ютеризований діагностичний комплекс для випробувань електричних машин на надійність Науковопрактичний журнал «Електротехніка і електромеханіка» – Харків: Національний технічний університет «ХПІ», 2015. – Вип. 3/2015 – Ст. 27–30.

17. Сьомка О. О., В.В. Прус, С.Є. Дзеніс Обґрунтування впливу процесу старіння на електричні та магнітні властивості шихтованих осердь електричних машин Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії – X. : НТУ „ХПІ”. - 2016. - № 11 (1183) 2016 – С. 115-122.

18. M. Zagirnyak, V. Prus, Siomka O. Electric machine reliability prediction models taking into account the state of major structural components Proceedings of the abstracts the 15th International Conference on “Computational Problems of Electrical Engineering” CPEE–2014, – Terchova – Vratna dolina, Slovak Republic, 2014. – P. 57

19. O. Somka, V. Prus, A. Nikitina Somka O. The determination of the condition of the windings of electric machines with long mean-time-between failures 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES) – Kremenchuk, 2017. – P. 164-167.

20. M. Zagirnyak, A. Kalinov, and Zh. Romashykhina, “Decomposition of electromotive force signal of stator winding in induction motor at diagnostics of the rotor broken bars”, Scientific Bulletin of National Mining University, issue 4(154), 2016, pp. 54–61.

21. В. В. Прус, Сьомка О. О. Зміна властивостей електротехнічної сталі під впливом теплових та механічних факторів / Збірник наукових праць XIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 8-9 квітня 2015 р. – Кременчук, КрНУ, 2015. – С. 229-230.

22. Somka O. The use of the thermal image control in the current monitoring of electric machines / M. Zagirnyak, V. Prus, O. Somka // Book of digests the 7th Symposium on Applied Electromagnetics SAEM’2018. – Podčetrtek, Slovenia, 2018. – P. 9–10

23. Somka O. The ways for the improvement of the information value of the thermal image control of electric machines with long mean time between failures

/ M. Zagirnyak, V. Prus, O. Somka // Przegląd Elektrotechniczny, 2019, R. 95 № 5  
P. 63–66 (Польша)

24. Fedorov M. M. The improvement of the methods for forecasting the thermal state of alternating current electric motors in the unsteady conditions of their operation / Doctor's thesis in specialty 05.09.01 – Electric machines and devices, Kharkiv, NTU KhPI, (2003). – 36 p.

25. Hamid A. Toliyat, Subhasis Nandi, Seungdeog Choi, Homayoun Meshgin-Kelk, Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault 185 Diagnosis, London-New York: CRC Press, 2012.

## ДОДАТОК А

Таблиця А1 – Данні моделювання особливостей роботи системи захисту електродвигуна з несиметрією за напругою

t, секунд	Величина несиметрії $R_s = 0\%$ , $k_{2U}=2\%$ .				Величина несиметрії $R_s = 0\%$ , $k_{2U}=2\%$ .								
	h	$I_y/I_H$	$K_{Hzc}$	$I_{Vmax}/I_H$	h	$I_y/I_H$	$K_{Hzc}$	$I_{Vmax}/I_H$					
1	2	3	4	5	6	7	8	9					
5,069	0,5	1,1	1	0,977	0,5	1,1	1	0,983					
5,222					0,503		1	0,984					
5,376					0,51		1,004	0,986					
5,529					0,499		1,01	0,992					
5,683					0,5		1,016	0,995					
5,837					0,5		1,016	0,99					
5,99					0,5		1,019	0,994					
6,144					0,5		1,018	0,99					
6,298					0,501		1,017	0,99					
6,451					0,5		1,018	0,995					
6,605					0,499		1,017	0,991					
6,758					0,5		1,017	0,991					
6,912					0,5		1,018	0,995					
7,066					0,5		1,1	1	0,979	0,499	1,079	1,017	0,99
7,219					0,559		1,097	1,002	0,985	0,575	1,037	1,019	1,001
7,373					0,631			1,021	1,003	0,664		1,039	1,024
7,526	0,495	1,04	1,007	0,495	1,058	1,029							
7,68	0,493	1,064	1,017	0,493	1,084	1,04							
7,833	0,503	1,072	1,012	0,505	1,093	1,035							
7,987	0,505	1,075	1,008	0,506	1,096	0,31							
8,141	0,494	1,075	1,012	0,493	1,096	0,36							
8,294	0,496	1,075	1,009	0,496	1,095	0,032							
8,448	0,508	1,073	1,008	0,51	1,094	0,032							
8,601	0,5	1,074	1,012	0,5	1,095	1,036							
8,755	0,5	1,073	1,007	0,491	1,094	0,032							
8,909	0,504	1,073	1,009	0,505	1,095	0,033							
9,062	0,505	1,074	1,074	1,012	0,507	1,095	0,035						
9,216	0,495		1,073	0,007	0,493	1,094	1,03						
9,37	0,497		1,074	1,011	0,496	1,095	0,034						
9,523	0,506		1,074	1,011	0,507	1,095	1,034						
9,677	0,502		1,073	1,007	0,502	1,094	0,03						
5,83	0,493		1,074	1,012	0,492	1,095	1,035						
9,984	0,501		1,074	1,01	0,501	1,095	1,033						