



УКРАЇНА

(19) UA (11) 32998 (13) U  
(51) МПК (2006)  
G01R 31/12  
G01R 31/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під  
відповідальність  
власника  
патенту

### (54) СПОСІБ ОЦІНКИ СТАНУ МІЖВИТКОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

1

(21) u200800932  
(22) 25.01.2008  
(46) 10.06.2008, Бюл.№ 11, 2008 р.  
(72) БАРБІНЯГРА МИХАЙЛО ПЕТРОВИЧ, UA  
(73) БАРБІНЯГРА МИХАЙЛО ПЕТРОВИЧ, UA  
(57) Спосіб оцінки стану міжвиткової ізоляції електродвигуна, що передбачає реєстрацію діагностичних параметрів та порівняння їх між собою, який відрізняється тим, що на робочий електродвигун установлюють пристрій для визначення швидкості

2

затухання електрорушійної сили, після чого електродвигун виключають і реєструють швидкість затухання електрорушійної сили, далі електродвигун включають і при кожному навмисному або мимовільному відключенні електродвигуна реєструють швидкість затухання електрорушійної сили та порівнюють цей параметр з параметром першого замірювання і при скороченні часу затухання роблять висновок про погіршення стану міжвиткової ізоляції електродвигуна.

Корисна модель відноситься до електротехнічної промисловості, зокрема до способу оцінки загального стану міжвиткової ізоляції електродвигуна.

За умовами роботи обмотка є найважливішою і найскладнішою частиною електричної машини. Вихід обмоток з ладу здебільшого зумовлений пошкодженнями ізоляції. Так, на промислових підприємствах понад 80% всіх відмов асинхронних двигунів відбувається внаслідок пошкодження міжвиткової ізоляції.

Звичайно міжвиткова напруга в найпоширеніших у народному господарстві асинхронних електродвигунах з короткозамкненим ротором не перевищує 10-15В. Непошкоджена емалева ізоляція проводів, з яких намотується обмотка електричних машин, має досить високу електричну міцність (4-6кВ), але навіть в нових проводах трапляються точкові пошкодження шару ізоляційної емалі. В умовах експлуатації ці пошкодження прогресують і на їх місці можуть виникнути місцеві осередки пошкоджень міжвиткової ізоляції, тобто місцеві дефекти. Крім того на обмотки і особливо на їх ізоляцію під час експлуатації діють електромагнітні сили, вібрація, температура, навколишнє середовище та інші фактори. Спільна дія цих факторів призводить до необоротних процесів зміни структури і хімічного складу ізоляції, тобто до старіння ізоляції. Крім цього, в ізоляції можуть бути дефекти, які виникають як під час виготовлення матеріалів, так і під час виготовлення самої ізоляційної конструкції. Особливо часто під час вкладання обмоток пошкоджується міжвиткова ізоляція, що

значно скорочує термін їх служби. Використання під час вкладання обмоток металевих інструментів часто призводить до передавлювання і прорізання ізоляційного шару проводів. Різкі перегини обмоткового проводу при намотці сприяють утворенню в ізоляції значних механічних напруг, внаслідок чого виникають тріщини. Розвиток місцевих дефектів звичайно призводить до пошкодження ізоляційних конструкцій у перший період експлуатації. Виникають, як правило, такі пошкодження, як пробой міжвиткової ізоляції. Під час роботи електричних машин на їх обмотки діють електродинамічні і механічні сили, які досягають великих значень під час пуску і реверсування. Під дією цих сил в ізоляції виникають тріщини. Особливо небезпечна для ізоляції обмоток електричних машин є вібрація, яка виникає у зв'язку з нерівноваженістю обертових частин, зносом підшипників, неладу в привідному механізмі і з інших причин. До зношування МВІ призведе тертя між витками і витків з корпусом ізоляцією, яке виникає в електричній машині внаслідок різних коефіцієнтів теплового розширення міді обмоток і активної сталі сердечників.

Певний вплив на технічний стан ізоляції електричних машин має теплове і електричне старіння. Важливими характеристиками ізоляційних конструкцій є теплостійкість і нагрівостійкість. Теплостійкість характеризує здатність ізоляційних матеріалів зберігати свої властивості при короткочасних нагріваннях, а нагрівостійкість - зберігати властивості без суттєвого погіршення протягом тривалого періоду, якщо температура не перевищує допустимих значень для даного класу

U  
(13)  
32998  
(11)  
UA  
(19)

ізоляції. Нагрівостійкість в основному визначається швидкістю старіння ізоляції. Особливу загрозу для ізоляції, з певним рівнем старіння і пониженою електричною міцністю становлять комутаційні перенапруги, які можуть перевищувати амплітудне значення напруги до семи разів.

Великий вплив на прискорення старіння ізоляції має волога. Волога, яка проникає в пори і тріщини значно знижує електричну міцність МБІ. При зволоженні обмоток з дефектами ізоляції опір ізоляції знижується в декілька разів і при цьому різко збільшуються струми втрат через ізоляцію. У цих випадках через дефекти ізоляції під дією напруги проходить струм, який руйнує ізоляцію, внаслідок чого виникає коротке замикання між витками обмоток.

Якщо ізоляція не має технологічних дефектів, то під дією температури, вібрації, зволоження, зовнішнього середовища та інших факторів протягом часу відбувається поступове старіння ізоляції, яке виражається в її всиханні, випаровуванні летючих компонентів, втраті еластичності, виникненні пор і тріщинок. У «найслабших» місцях ізоляції виникають місцеві дефекти, які мають низьке значення напруги пробивання. У моменти комутаційних перенапруг в місці дефекту виникають іскрові розряди, які повторюються під час кожної наступної перенапруги, значення якої перевищує напругу пробивання місця дефекту. Внаслідок дії розрядів пробивна напруга поступово зменшується до тих пір, поки в місці дефекту не виникне дуговий розряд від робочої напруги між витками. У цьому випадку настає повне міжвиткове замикання і обмотка електродвигуна виходить з ладу.

Відомий спосіб визначення завершених (повних) міжвиткових замикань розібраних електродвигунів за допомогою приладів СМ або ИДО-05. Принцип дії цих апаратів заснований на порівнянні імпульсних характеристик, які спостерігаються на екрані електронно-променевої трубки. Під час контролю до затискачів апарата під'єднуються дві обмотки електричної машини і по черзі посилають в них імпульси високої частоти. Якщо обмотки не мають асиметрії, яка вноситься короткозамкненими витками, то криві імпульсів струмів, що проходять по обмотках, на екрані електронно-променевої трубки зливаються в одну криву. Якщо в одній з обмоток є дефект (короткозамкнені витки, неправильно сполучена обмотка, тощо) то імпульси струмів, які проходять по обмотках, неоднакові і на екрані трубки спостерігаються дві криві. За формою кривих з певним ступенем точності визначають вид дефекту [див. ТУУ 33.2 - 14105464. 001 - 2002].

Але даний спосіб не дозволяє оцінити стан міжвиткової ізоляції на початковій стадії роботи електродвигуна, а також контролювати стан міжвиткової ізоляції під час його роботи на протязі всього терміну експлуатації.

Відомий також спосіб визначення місця пошкодження міжвиткової ізоляції індукційним методом за допомогою апарата ВЧФ-5-3.

Для визначення пазів, в яких розміщена обмотка з пошкодженою ізоляцією, індуктор і давач переміщують по колу по всіх пазах статора доти, доки індикатор не покаже наявність дефекту. При

зволоженні ізоляції обмоток електродвигунів, які мають дефекти в МБІ, опір ізоляції знижується в декілька десятків разів, різко збільшуються струми втрат і, як наслідок, знижується напруга виявлення дефектів апаратом ВЧФ-5-3 [див. Експлуатація та діагностування електричних машин і трансформаторів. М.А. Яцун "Львівська Політехніка" 2003р., стор.109].

Але даний спосіб має ті ж недоліки, що й спосіб наведений вище.

Найближчим до корисної моделі, що заявляється, є спосіб ізоляції обмоток електродвигунів, що передбачає подання сигналу прямокутної форми на обмотку і реєстрацію діагностичних параметрів, по яким роблять висновок про стан ізоляції обмоток електродвигуна. Як діагностичні параметри використовують амплітуди першого і другого напівперіодів та величини першого і другого періодів затухаючого коливального процесу. Ці величини порівнюють з еталонними діагностичними параметрами на підставі чого роблять висновок про стан ізоляції [див. патент Російської Федерації №2208236].

Даний спосіб обрано прототипом.

Прототип і корисна модель, що заявляється, мають такі спільні ознаки:

- реєстрація діагностичних параметрів;
- порівняння зареєстрованих параметрів між собою.

Але, спосіб за прототипом має низку суттєвих недоліків, зокрема:

- для виявлення дефектів міжвиткової ізоляції мають недостатню чутливість на самому початку їх розвитку. Дефекти з перехідним опором 0,7-0,8 Ом і більше виявити досить складно.

- електродвигун підлягає іспитам в разі коли виникли сумніви щодо цілісності міжвиткової ізоляції. Такі сумніви виникають тоді, коли спрацьовує захисна апаратура, різко зростає струм в одній із фаз, двигун не може розвернутися, тобто набрати робочі оберти, а його робота супроводжується електромагнітним шумом, підвищеною вібрацією, тобто двигун вже має дефект і неможливе його запобігання.

- для проведення іспитів електродвигун необхідно вивести в ремонт: відключити кабель живлення, демонтувати двигун з технологічної позиції, розібрати, демонтувати ротор із статора і тільки тоді обмотка може підлягати іспитам.

В цих умовах і є основна складність виявлення пошкодження міжвиткової ізоляції. Пошкодження міжвиткової ізоляції, як і люба аварія, відбуваються несподівано, а поява перелічених ознак означає, що невдовзі, за кілька хвилин роботи електродвигуна, з'явиться дим, іскри, відкритий вогонь і міжвиткове коротке замкнення переросте в міжфазне і надалі в коротке замкнення на землю.

В основу корисної моделі поставлено задачу розробити удосконалений спосіб оцінки стану міжвиткової ізоляції електродвигуна, в якому шляхом замірювань та реєстрацій швидкості затухання електрорухомої сили на протязі усього терміну експлуатації електродвигуна і порівняння цих параметрів з першою величиною вимірювання, а також за рахунок іншого критерію оцінки стану міжвиткової ізоляції забезпечити можливість без-

перервного контролю стану міжвиткової ізоляції на протязі всього терміну експлуатації електродвигуна, підвищення точності оцінки за рахунок контролю стану ізоляції в порівняних одиницях, відсоток залишкового ресурсу придатності міжвиткової ізоляції, а також можливість планування ремонту. Окрім того, запропонований спосіб унеможливує несподіваний вихід з ладу підконтрольного електродвигуна.

Поставлена задача вирішена в способі оцінки стану міжвиткової ізоляції електродвигуна, що передбачає реєстрацію діагностичних параметрів та порівняння їх між собою тим, що на робочий електродвигун установлюють пристрій для визначення швидкості затухання електрорухомої сили, після чого електродвигун виключають і реєструють швидкість затухання електрорухомої сили, далі електродвигун включають і при кожному навмисному або мимовільному відключенні електродвигуна реєструють швидкість затухання електрорухомої сили та порівнюють цей параметр з параметром першого замірювання і при скороченні часу затухання роблять висновок про погіршення стану міжвиткової ізоляції електродвигуна.

Пошкодження міжвиткової ізоляції обмоток електричних машин у початковій стадії визначити досить важко, тому що між витками, навіть за повної відсутності в місці дефекту на поверхні провідників емалевої плівки, є повітряний проміжок зі значною пробивною напругою. Крім цього, звичайно стан міжвиткової ізоляції обмоток визначають при вимкненій з мережі електричної машини. Зусилля в обмотках машин у таких випадках відсутні і між витками, в місцях дефектів можуть бути повітряні проміжки, що перешкоджає виявленню дефектів. Для виключення імовірності пробиття корпусної ізоляції під час діагностування міжвиткової ізоляції до обмоток електричних машин напругою 380В можна прикладати напругу не вище 2,5-3кВ, у зв'язку з чим під час діагностування реально можна виявити дефекти в міжвиткової ізоляції на певній стадії їх розвитку.

Для з'ясування запропонованого способу доцільно розглянути процеси, якими супроводжується відключення асинхронного електродвигуна від мережі живлення.

Спосіб проілюстровано осцилограмами (Фіг.1 і Фіг.2) та схемою (Фіг.3).

По-перше, відключення електродвигуна від мережі живлення супроводжується дуговими розрядами, які виникають в контакторі між контактами під час їх розмикання. Ці розряди викликані комутаційними перенапруженнями (перший закон комутації: струм крізь індуктивність безпосередньо до комутації  $i_L(o+)$  дорівнює струму крізь цю ж індуктивність безпосередньо після комутації  $i_L(o+):i_L(o-)=i_L(o+)$ ) в статорній обмотці електродвигуна. Осцилограми комутаційних перенапружень мають форму пилкоподібних імпульсів, амплітуда яких перевищує напругу мережі в  $3\div 10$  разів з високою крутизною фронту зростання і частотою (Фіг.1).

Такі комутаційні перенапруження приводять до різкого імпульсного зростання різниці потенціалів між витками в котушці обмотки електродвигуна. В місцях, де міжвиткова ізоляція має пошкодження,

виникають електричні розряди - іскріння. Розряди виникають між сусідніми витками обмотки, відбувається окислення, обвуглювання ізоляційних матеріалів і виникають електропровідні містки всередині обмотки. Число таких містків з часом зростає по мірі старіння ізоляції. Зростає провідність ізоляційних проміжків, зростає струм втрат. Наступає час, коли в момент відключення електродвигуна від мережі живлення, в найбільш ослабленому місці, виникає лавинний пробій міжвиткової ізоляції з утворенням короткозамкненого витка і з опором в місці пошкодження ізоляції близьким до нуля. Враховуючи швидкість течії процесу, виникнення такого короткозамкненого витка всередині паза статора стається миттєво без будь-яких зовнішніх ознак. Наступне включення цього електродвигуна в роботу буде супроводжуватись усіма ознаками аварії: іскри, дим, запах згорілої ізоляції.

Очевидно, аварія в обмотці виникла не під час включення електродвигуна в роботу, а в процесі, який відбувається під час його відключення. Наступне включення в роботу цього двигуна буде супроводжуватись розвитком аварії: спритним розігрівом короткозамкненого витка під час дії пускових струмів, часто при цьому виникає дуговий розряд, що розплавляє ізоляцію сусідніх витків, міжфазну і корпусну ізоляцію.

По-друге, окрім комутаційних перенапружень відключення електродвигуна від електромережі супроводжується ще й електромеханічними перехідними явищами, до яких відносяться вибіг ротора і пов'язані з цим електромагнітні перехідні явища - затухання струму в обмотці ротора і відповідне затухання магнітного потоку і електрорухомої сили обмотки статорі (Фіг.2).

До повного затухання електрорухомої сили двигун працює в стані генератора. Термін затухання електрорухомої сили може коливатись від часток секунд до десятків секунд, в залежності від схеми обмотки, кількості витків в котушці а також від якості ізоляції. Оскільки схема обмотки і кількість витків в ній не можуть змінюватись в процесі роботи електродвигуна, то можна сказати, що зміни терміну затухання електрорухомої сили будуть залежати від якості ізоляції обмотки. Як було розглянуто вище, якість міжвиткової ізоляції напряму залежить від кількості дефектів і показником її якості може служити величина струму втрат, який протікає через ці дефекти.

Проблема в тому, що розосереджений характер цього струму і мала його сумарна величина, в порівнянні з робочим струмом двигуна, унеможливають його безпосередній контроль. Але можна скористатись тим, що струм втрат є навантаженням енергетичної системи електродвигуна. Чим більше це навантаження, тим скоріше буде розмагнічуватись ротор і тим скоріше згасне електрорухома сила статора. Таким чином термін вгасання електрорухомої сили знаходиться в прямій залежності від струму втрат і, виходячи з того, як з часом експлуатації двигуна змінюється термін вгасання електрорухомої сили, можна судити про якість ізоляції. Набувши з часом певну кількість статистичних даних можна зробити висновки про швидкість змін, що відбуваються в міжвитковій

ізоляції і, виходячи з цього прогнозувати залишковий ресурс.

Головна мета корисної моделі полягає в здійсненні методу отримання інформації про зміни в міжвитковій ізоляції в будь-яких одиницях - дійсних, або відносних. Надалі, застосувавши певний математичний інструментарій для обробки цієї інформації, маємо змогу отримати дійсну інформацію про стан МВІ конкретного двигуна безпосередньо під час його роботи, бачити зміни в стані з часом і передбачити прогрес цих змін.

Прикладом, ілюстрацією практичного застосування запропонованого методу може служити порівняння Фіг.1 і Фіг.2. На Фіг.1 термін згасання електрорухомої сили в обмотці електродвигуна складається із суми термінів зони II і зони III:

$$T_{\Sigma 1} = T_1 + T_2; \quad (1)$$

де:  $T_1 = 0,0025$  секунд;

$T_2 = 0,015$  секунд;

$T_{\Sigma 1} = 0,0175$  секунд

зона I - зона нормальної роботи електродвигуна, на обмотці діє напруга мережі;

зона II - зона дії імпульсів комутаційної перенапруги;

зона III - зона затухання електрорухомої сили в обмотці статора;

зона VI - зона спокою, кінцевий режим після закінчення процесів відключення двигуна від електромережі.

Навіть візуальне порівняння приведених осцилограм дає змогу бачити велику різницю в термінах згасання електрорухомої сили. На Фіг.1 повний цикл завершено за 0,0175 секунд, тоді як на Фіг.2 за період, більший ніж 0,2 секунди, електрорухома сила ще не згасла.

Наступна ілюстрація має ціль пояснити необхідність застосування запропонованого методу в промисловості: працездатність резервного електрообладнання регулярно, у відповідності з графіком, перевіряється включенням в роботу. Резервування обладнання застосовується на небезпечних виробництвах, на виробництвах з безперервною технологією, де аварійна зупинка супроводжується великими матеріальними та фінансовими збитками, це насоси пожежогасіння, або електродвигуни ліфтового господарства.

Як було описано вище, пошкодження міжвиткової ізоляції головним чином відбуваються під час відключення електродвигуна від електромережі і головною причиною цих пошкоджень виступають комутаційні перенапруження, які супроводжують процес відключення електродвигуна. Таким чином, характерна ситуація, коли працездатність резервного обладнання перевірено, зауважень немає. Але, під час відключення електродвигуна, пройшла комутаційна перенапруга і міжвиткову ізоляцію було пошкоджено, при цьому ніяких ознак аварії не помічено. Та при наступному включенні цього електродвигуна в роботу - він просто «згорить» з усіма вихідними з цього наслідками.

Для підтвердження залежності часу затухання електрорухомої сили обмотки статора від якості її ізоляції були проведені два досліді:

1. Дослід по виявленню залежності часу загасання електрорухомої сили від якості корпусної ізоляції.

2. Досліді по виявленню залежності часу загасання електрорухомої сили від якості міжвиткової ізоляції.

Для проведення дослідів був підготовлений асинхронний електродвигун виробництва США типу 4MA 468413-G4-WA, потужністю 18,5кВт; 1500об/хв; 380В. У статорній обмотці двигуна від другого й третього витків фазної котушки зроблені відводи для можливості комутації цих витків зовні двигуна, таким чином, що при почерговому з'єднанні цих відводів з фазним виводом обмотки, ми можемо створювати 2,3 короткозамкнених витки в обмотці.

Для осцилографування напруги на затискачах обмотки статора електродвигуна була використана вбудована у комп'ютер цифрова осцилографічна приставка "BORDO-221".

Дослід 1.

Осцилографування напруги між "землею" і фазою електродвигуна, у період вибігу після відключення від мережі живлення, показало повну відсутність різниці потенціалів. Оскільки в цей період двигун працює в режимі генератора з ізольованою нейтраллю, то різниця потенціалів утвориться між фазами обмоток, а не між фазою й землею.

Висновок: якість корпусної ізоляції не впливає на електрорухоому силу електродвигуна в період вибігу після відключення його від мережі.

Дослід 2.

Для проведення дослідів підготовлена схема (Фіг.3), де при подачі сигналу включення котушка (КК) замикає контакти пускача, підключає обмотки двигуна до мережі, і розмикає блокконтакт (БК), чим розриває ланцюг, шунтуючий витки обмотки (коротке замикання розірвано).

Після зняття сигналу включення з котушки (КК) пускач розімкнеться, розірве ланцюг живлення двигуна від мережі, а блокконтакт навпаки - замкне й зашунтує (скоротить) підключені до нього витки. Таким чином, ми одержимо міжвиткове коротке замикання, що виникає в обмотці після відключення двигуна від мережі живлення. Приєднуючи до БК по черзі відводи від 2-го й 3-го витків одержимо й відповідне коротке замикання двох або трьох витків. На Фіг.3 показано, що короткозамкнені витки утворені у фазі С, а осцилограф, для зниження чутливості, підключений до фаз А і В. Крім того, для спрощення порівняльного аналізу осцилограф підключений через діодний міст.

Проведені по черзі наступні досліді:

а) осцилографування електрорухомої сили в обмотці статора без короткого замикання;

б) осцилографування електрорухомої сили в обмотці статора із двома короткозамкненими витками;

в) осцилографування електрорухомої сили в обмотці статора із трьома короткозамкненими витками.

Для наочності зроблене накладення осцилограм так, щоб моменти відключення збігалися, при цьому кожна осцилограма зміщена щодо іншої по вертикалі.

Візуально видно, що крутизна спадання електрорухомої сили збільшується із збільшенням числа короткозамкнених витків.

Вважаємо за необхідне надати наступні пояснення:

1. Підраховано, що опір  $R$  одного витка обмотки при діаметрі проведення  $1,25\text{мм}$  (перетини проводника -  $1,23\text{мм}^2$ ) і довжині витка  $\approx 1\text{м}$  становить  $0,0145\text{Ом}$ , а опір ланцюга короткого замикання (привід, блокконтакти) склало  $1,08\text{Ом}$ . Очевидно, погрішність внесена дослідною установкою - велика, однак, незважаючи на це, ефект очевидний.

2. При укладанні всипної обмотки в пази електродвигуна відбувається перемішування проводів, внаслідок чого збільшується різниця потенціалів між поруч лежачими витками, збільшується імовірність пробоя ізоляції й, відповідно, ефект при короткому замиканні значно сильніший. Імовірність короткого замикання між витками із близькими номерами (перший - другий або перший - третій) дуже низька. Ми ж, при проведенні дослідів, заклали короткі замикання між цими, близькими по номерам витками, одержали ефект найменш виражений, однак достатній щоб його зафіксувати.

З метою числової оцінки залежності швидкості загасання електрорухомої сили від якості міжвиткової ізоляції зроблені наступні виміри: по осцилограмам обчислений час ( $t$ ), необхідний для загасання електрорухомої сили від  $2,640\text{В}$  (напруга, зафіксована осцилографом відразу після завершення дії комутаційних перенапруг) до  $0,480\text{В}$  (значення близьке до нуля). Результати вимірів зведені в таблицю.

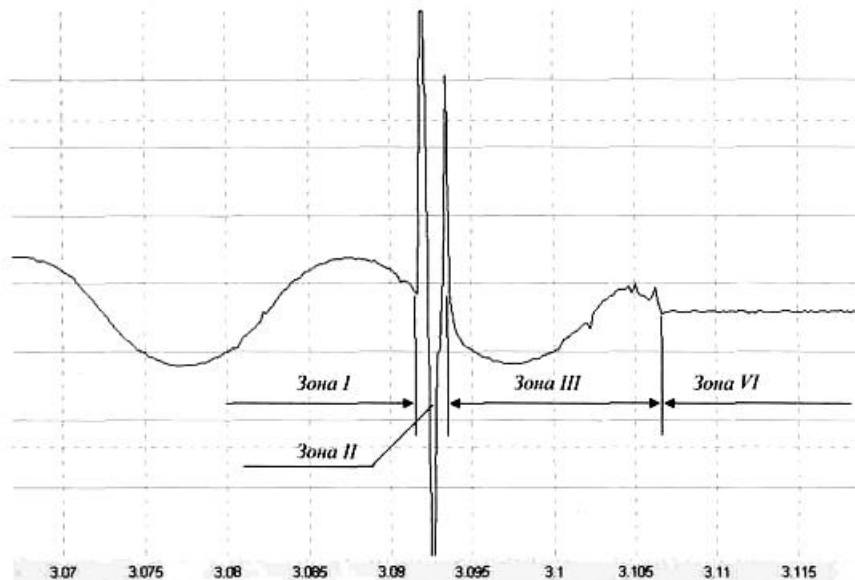
Підрахунок показав, що загасання електрорухомої сили при відсутності короткозамкнених витків відбувається за  $782,696\text{мС}$  (мілісек). При наявності двох короткозамкнених витків цей процес займає вже на  $132,329\text{мС}$  менше, а при трьох короткозамкнених витках на  $164,27\text{мС}$  менше.

Висновок: час загасання наведеної ЕРС в обмотці статора, після відключення електродвигуна від мережі живлення, залежить від якості міжвиткової ізоляції електродвигуна.

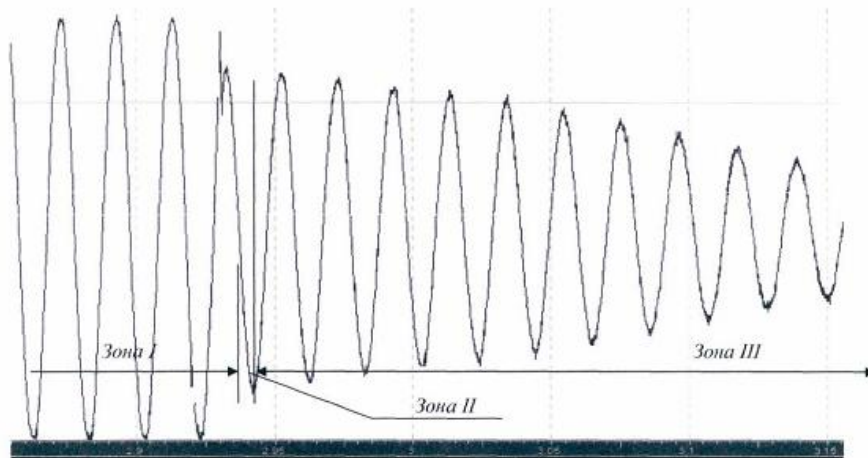
Таблиця

Залежність швидкості загасання електрорухомої сили від якості міжвиткової ізоляції

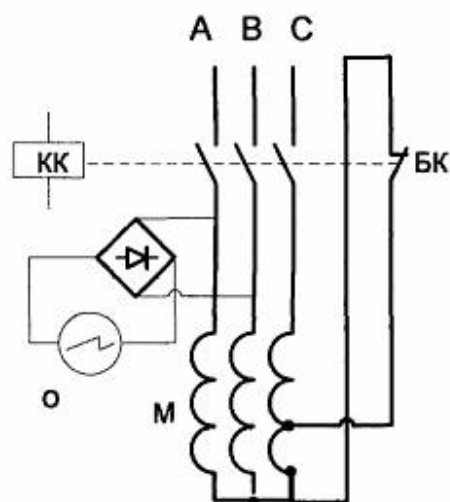
Кількість короткозамкнених витків в обмотці	$U_n$ - напруга на початку періоду відліку (В)	$U_k$ - напруга в кінці періоду (В)	$\Delta U$ (В)	$\Delta t$ (мС)
нема	2,640	401,066	2,239	782,696
2	2,640	404,612	2,236	650,367
3	2,640	397,520	2,243	618,426



Фиг. 1



Фіг. 2



Фіг. 3