

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

«На правах рукопису»

УДК 621.313

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

В.Ф.Шинкаренко

«23» 05 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

на тему: «Діагностика ізоляції електричних двигунів рухомого
складу імпульсним методом»

Виконав (-ла):

студент (-ка) VI курсу, групи ЕМ-61м

Цемеринів Олександр Дмитрович

Керівник:

Заст. декана, кандидат технічних наук, доцент,

Чумак В.В.

Рецензент:

кандидат технічних наук, доцент,

Печеник М.В.

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2018

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра електромеханіки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою магістра

Спеціальність (спеціалізація) 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» («Електричні машини і апарати»)

УЗГОДЖЕНО

Генеральний директор НВПІ



«ЕЛЕКТРОПРОМ»

Давиденко О.Г.
» 20__ р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
В.Ф.Шинкаренко
«16» 010 2016 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Цемеринову Олександр Дмитровичу

1. Тема дисертації «Діагностика ізоляції електричних двигунів рухомого складу імпульсним методом»,
науковий керівник дисертації Чумак Вадим Володимирович, к.т.н. доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
- затверджені наказом по університету від «21» березня 2018 р. № 981-С
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження обмотки якоря тягових двигунів постійного струму
4. Предмет дослідження імпульсні перехідні процеси в обмотках якорів постійного струму
5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Розрахунок і аналіз перехідних процесів при імпульсній діагностиці ізоляції обмоток якоря двигуна постійного струму зі зрівнювальними з'єднаннями; 2. Вибір і обґрунтування імпульсних методів випробування якірних обмоток; 3. Розробка методики виявлення пошкодженої ізоляції якірних обмоток та схеми контрольно-вимірювального пристрою; 4. Експериментальні дослідження на реальних зразках, в умовах ремонтного підприємства і порівняння дослідницьких даних з теоретичними результатами.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: 8-10 зображень

7. Орієнтовний перелік публікацій 1. «Дослідження хвильових напруг у обмотках тягових двигунів постійного струму»

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 16.10.2016

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Розрахунок і аналіз перехідних процесів при імпульсній діагностиці ізоляції обмоток	до 16.10.2016	
2	Вибір і обґрунтування імпульсних методів випробування якірних обмоток	до 19.04.2017	
3	Розробка методики виявлення пошкодженої ізоляції	до 28.02.2017	
4	Експериментальні дослідження на реальних зразках	до 01.05.2017	
5	Розрахункове підтвердження методу	до 03.03.2018	
6	Аналіз отриманих результатів	до 08.04.2018	
7	Оформлення пояснювальної записки	до 15.05.2018	

Студент

Науковий керівник дисертації

(підпис)

О.Д. Цемеринов
(ініціали, прізвище)

В.В. Чумак
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

У даній магістерській дисертації були проведені дослідження електромагнітних перехідних процесів при імпульсних впливах в обмотках тягових двигунів постійного струму рухомого складу. Проаналізовано низку методів випробувань ізоляції обмоток тягових двигунів постійного струму і визначено найбільш ефективний спосіб діагностики і контролю на основі імпульсних методів з підвищеною чутливістю до виявлення місць дефектів. Проведено аналіз хвильових процесів при імпульсних впливах в якорних обмотках тягових двигунів постійного струму. Визначено розподіл градієнтів потенціалів на окремих ділянках обмотки, розроблено методику виявлення пошкоджень в якорних обмотках зі зрівнювальними з'єднаннями. Розроблено функціональну та експериментальну схему випробувальної установки для діагностування дефектів ізоляції обмоток, проведені випробування в умовах ремонтного підприємства на реальних зразках. Розроблено математичну модель розрахунку імпульсних процесів в якорних обмотках в системному пакеті MatLab Simulink, проведено порівняння експериментальних та розрахункових результатів.

***ДВИГУН, НАПРУГА, СТРУМ, ВТРАТИ, ОБМОТКА,
ХАРАКТЕРИСТИКИ, СХЕМА, МОДЕЛЮВАННЯ***

ABSTRACT

In this master's dissertation, studies of electromagnetic transients under impulse influences in the windings of traction motors of direct current of rolling stock were carried out. A number of methods of testing the isolation of windings of traction motors of direct current have been analyzed and the most effective method of diagnostics and control on the basis of pulsed methods with high sensitivity up to the detection of defects is determined. The analysis of wave processes at impulse influences in anchor windings of traction motors of a direct current is carried out. The distribution of potentials' gradients is determined on separate winding sites, a technique for detecting damage in anchor windings with equalizing connections has been developed. The functional and experimental scheme of the test installation for diagnosing defects of winding insulation was developed, tests were conducted in the conditions of the repair enterprise on the real samples. A mathematical model for calculation of impulse processes in anchor drives in the MatLab Simulink system package was developed, a comparison of experimental and calculated results was performed.

ENGINE, VOLTAGE, STRUCTURE, LOSS, WRAPPING,
CHARACTERISTICS, SCHEME, MODELING

ЗМІСТ

Завдання на курсову роботу	2
.....	4
Реферат.....	7
.....	8
Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.	13
Вступ.....	15
.....	
Введення.....	18
...	24
1. Імпульсні процеси в якорних обмотках зі зрівнювальними з'єднаннями в тягових двигунах постійного струму.	39
.....	
1.1 Опис імпульсної установки для проведення досліджень величин та градієнтів напруг в якорних обмотках.....	40
...	
1.2 Типові ділянки обмоток якорів зі зрівнювальними з'єднаннями..	48
.....	
1.3 Імпульсні перенапруги в обмотках якорів відносно корпусу, міжвиткові і міжсекційні, методика індикації швидкоплинних електромагнітних процесів.....	56
.....	67
..	
2. Обґрунтування величин випробувальних напруг та вплив дефектів на характер хвильового процесу.....	78
.....	80
2.1 Вплив паралельних гілок та зрівнювальних з'єднань на хвильові процеси	93
в	94
якорних обмотках.....	

2.2 Вплив дефектів ізоляції на зміну імпульсних напруг в обмотках випробовуваного якоря

..

2.3 Обґрунтування величин імпульсних перенапруг при випробуванні ізоляції якорних обмоток.....

.....

3. Моделювання швидкоплинних електромагнітних процесів в якорних обмотках зі зрівнювальними з'єднаннями.....

3.1 Створення та опис моделі швидкоплинного електромагнітного процесу.

.....

Висновки.

.....

Перелік посилань.

.....

ВСТУП

На залізничному транспорті діагностика і контроль якості рухомого складу та його елементів, зокрема тягових двигунів проводиться в основному методами проведення натурних випробувань. Ці випробування представляють собою особливий тип фізичного моделювання, що ґрунтується на використанні спеціалізованих пристроїв у поєднанні з натурними об'єктами. Одним із основним елементів загальної діагностики обладнання рухомого складу є система діагностування тягових електричних двигунів. У депо та на ремонтних підприємствах, ці системи реалізуються на випробувальних станціях, де випробувальні об'єкти підлягають в основному функціональним методам діагностування. Ефективність функціонального діагностування тягових електродвигунів можна суттєво підвищити у разі використання методів, що симулюють аварійні режими роботи. Ці режими можуть виникати при комутаційних перенапруженнях, пробоях струмоведучих частин і т.д. При цьому виникають швидкоплинні, так звані хвильові електромагнітні процеси, які впливають на ослаблені місця ізоляційної конструкції, викликають частковий або повний електричний пробій. Саме застосування цих процесів в цілях діагностики та контролю ізоляції обмоток якорів тягових двигунів постійного струму є суттю даної роботи.

Опис проблеми. Залізничний парк України на даний час все ще використовує у великій кількості електровози радянського виготовлення. Парк електровозів на базі тягових асинхронних двигунів з перетворювачами частоти є дуже малим. Більша частина – це тягові двигуни, що представляють собою машини постійного струму, традиційного виконання. Це обладнання є сильно зношеним, потребує заміни, ремонту та якісного сервісного обслуговування.

Загальна проблема посилюється крайньою зношеністю з причини виробітки розрахункового ресурсу і відсутністю капіталовкладень на радикальну модернізацію парку рухомого складу залізничних доріг України.

Відомо що в процесі експлуатації значна частина всіх видів електричних машин передчасно виходить з ладу через пошкодження корпусної і виткової ізоляції. Досвід експлуатації рухомого складу на залізницях України показує, що із загального числа пошкоджень електрорухомого складу близько половини випадків припадає на електричні машини. Основна ж частина пошкоджень електричних машин електрорухомого складу припадає на пробій корпусної і виткової ізоляції. З ростом протяжності електрифікованих доріг число аварій через пошкодження ізоляції зростає. По експлуатаційній надійності обладнання електровозів, які експлуатуються на українських залізницях, максимальний відсоток ушкоджень тягових двигунів з причини виткового замикання і пробією ізоляції на корпус обмоток якорів склав 21% від загального числа пошкоджень двигуна. Досить високий відсоток пошкодження ізоляції обмоток якорів в експлуатації пояснюється недоброякісним їх ремонтом, далеко недосконалими методами випробувань ізоляції, особливо, обмоток якорів і важкими умовами експлуатації.

Капітальний ремонт тягового двигуна постійного струму становить до 80% вартості нового двигуна. За термін служби машини ізоляція частково або повністю замінюється, очевидний ефект становить збільшення післяремонтної надійності і стає зрозумілим велике значення якості і надійності електричних машин постійного струму. В умовах відсутності новітніх технологій, - резервом підвищення надійності є більш ефективні методи та апаратні засоби діагностики контролю випробування ізоляції електричних двигунів.

У зв'язку з цим для підвищення якості та надійності ремонтіваних електричних машин постійного струму необхідно в процесі ремонту забезпечити необхідну якість корпусної і виткової ізоляції. Це досягається дотриманням правильно розробленої технології виготовлення та ремонту ізоляції та обмоток і досконалыми методами контролю стану і оцінки

працездатності корпусної і виткової ізоляції. Найбільш досконалі методи випробувань ізоляції обмоток електричних машин повинні дозволяти не тільки виявити наявність пошкоджень, а й визначити місце дефекту. Останнє особливо необхідно на заводах, що ремонтують електричні машини постійного струму у великій кількості, а саме, на ремонтних заводах, де відсоток браку по причині виткового замикання і пробою ізоляції на корпус обмоток якорів ще досить значний.

Можливість визначення місця (точки) дефекту ізоляції обмотки електричної машини дозволяє підвищити продуктивність праці при ремонті, економити дорогий ізоляційний матеріал, аналізувати причини браку і, ґрунтуючись на цьому, удосконалювати технологію ремонту обмоток, а найголовніше, завдяки підвищеній чутливості до дефектів, посилити контроль стану ізоляції і тим самим підвищити надійність роботи електричних машин в експлуатації.

Мета роботи – на основі досліджень розподілу градієнтів потенціалів відносно корпусу між секційних і міжвиткових напруг в обмотках якорів тягових електричних двигунів постійного струму при випробуванні імпульсним методом розробити методику фіксації і виявлення місць дефектів ізоляції в якорних обмотках електричних машин постійного.

Методи дослідження. Математичне моделювання швидкоплинних електромагнітних процесів на основі ланцюгових схем заміщення обмоток електричних машин в системному пакеті MatLab Simulink. Методи теорії планування експерименту.

Об’єкт дослідження – якорні обмотки якоря тягових двигунів постійного струму

Предмет дослідження – імпульсні перехідні процеси в якорних обмотках двигунів постійного струму

Наукова новизна полягає:

Вперше запропоновано метод оцінки стану міжвиткової ізоляції обмоток тягових електричних двигунів, який полягає в тому, що рівень дефектності обмотки визначається не шляхом порівняння властивостей дефектної обмотки з бездефектною, а шляхом реакції дефектної або якісної обмотки на високочастотну імпульсну напругу з крутим фронтом.

Практична цінність полягає у тому, що розроблена методика виявлення виткового замикання в котушках з малим числом витків і новий спосіб виявлення конкретного місця виткового замикання в одношарових котушках. Використовуючи метод імпульсної генерації, розроблено модернізований спосіб індикації і виявлення виткового замикання та пробою ізоляції на корпус в обмотці якоря тягового електричного двигуна, заснований на вимірюванні імпульсного магнітного поля, створеного постійним за формою вздовж всієї обмотки ротора наскрізним струмом, що забезпечує завдяки останньому постійну чутливість до дефектів ізоляції вздовж всієї обмотки, в тому числі і по висоті пазу.

Основні результати виконаної роботи будуть запроваджені на електроремонтному заводі НВП «ДАК Електросила».

Зв'язок з науковими програмами - робота пов'язана з планом науково-дослідних робіт по темі "Використання частотних характеристик для оцінки стану ізоляції обмоток електричних машин", державний реєстраційний номер 0118U000543.

Аналіз літератури та існуючих методів. Дослідження і розробка теорії хвильових процесів в обертових електричних машинах стали проводитися з початку 30-х років минулого сторіччя. Цим питанням присвячено ряд монографій і окремих статей вчених Г.Н.Петрова, М.В.Костенко, Л.І.Сіротінського, В.А.Карасева, Р.А.Лютера, С.П.Грецького, Г.С.Щвеца, Е.С.Фріда, З.Г.Каганова, та інших, які дозволяють створити досить точне уявлення про фізику хвильових процесів, в обмотках електричних машин постійного струму, дають методику розрахунку

хвильових напруг. Причому, зазначені вище основні праці присвячені розвитку теоретичних питань, спрямованих на встановлення загальних закономірностей хвильових процесів. Тим часом сучасні потужні тягові двигуни постійного струму електричних локомотивів мають досить складну структуру обмоток.

Тому в останні роки поряд з подальшим розвитком загальної теорії хвильових процесів, широкий розмах придбали експериментальні дослідження, що доповнюють і уточнюючі теоретичні розробки. Необхідно підкреслити той факт, що правильно зняті осцилограми хвильових напруг в обмотках електричних машин є зразками, до яких повинен наближатися аналітичний розрахунок і моделювання цих процесів. Тому в даній роботі велика увага приділяється експериментальним дослідженням хвильових процесів в обмотках якорів машин постійного струму.

На потужних і більш сучасних електровозах як вітчизняного виробництва, так і зарубіжного, застосовуються шестиполюсні тягові двигуни, якоря яких мають петлеву обмотку зі зрівняльними сполуками. Проте тих відомостей про хвильові процеси електричних машин постійного струму, якими володіє практика, недостатньо для розробки найбільш ефективних методів індикації та виявлення місць дефектів ізоляції в їх обмотках. Дослідження хвильових процесів в обмотках електричних машин постійного струму почалися значно пізніше, ніж в обмотках машин змінного струму і обумовлені широким розвитком електрифікації залізничного транспорту. До останнього часу проводилися дослідження розподілу хвильових напруг в силовому ланцюзі електровоза або електропоїзда і в обмотках тягових двигунів в режимі навантаження. В основному в цих роботах цікавилися тільки хвильовими напруженнями щодо корпусу.

На сьогоднішній день існують розробки методів виявлення дефектів обмоток тягових електричних двигунів постійного струму з використанням аналізу частотного відгуку обмоток (Nilanga Abeywickrama, ABB AB

Corporate Research, Sweden, 2003). Великого розповсюдження набули методи створення математичних моделей двигунів постійного струму для імпульсного розподілу напруги по обмотці якоря та аналізу отриманих даних (Marjan Popov, Delft University of Technology, The Netherlands, 2001 Bjorn Gustavsen, SINTEF Energy Research, Norway, 2004 Juan A. Martinez-Velasco, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, 2000). А також ведуться роботи аналізу частотних характеристик обмотки статора генератора (Charles Q. Su, Charling Technology, Australia, 2006)

Залізничний парк України на даний час все ще використовує у великій кількості електровози радянського виготовлення. Парк електровозів на базі тягових асинхронних двигунів з перетворювачами частоти є дуже малим. Більша частина – це тягові асинхронні двигуни та генератори дизельних локомотивів, що представляють собою машини постійного струму, традиційного виконання (ВЛ-пліч, ВЛ-80К, ВЛ-10). Це обладнання є сильно зношеним, потребує заміни, ремонту та якісного сервісного обслуговування.

Загальна проблема посилюється крайньою зношеністю з причини виробітки розрахункового ресурсу і відсутністю капіталовкладень на радикальну модернізацію парку рухомого складу залізничних доріг України.

Відомо що в процесі експлуатації значна частина всіх видів електричних машин передчасно виходить з ладу через пошкодження корпусних і виткової ізоляції. Досвід експлуатації рухомого складу на залізницях України показує, що із загального числа пошкоджень електрорухомого складу близько половини випадків припадає на електричні машини. Основна ж частина пошкоджень електричних машин електрорухомого складу припадає на пробій корпусної і виткової ізоляції. З ростом протяжності електрифікованих доріг число аварій через пошкодження ізоляції зростає. По експлуатаційній надійності обладнання електровозів, які експлуатуються на українських залізницях, максимальний відсоток ушкоджень тягових двигунів з причини виткового замикання і пробією ізоляції на корпус обмоток якорів склав 21% від загального числа пошкоджень двигуна. Досить високий відсоток пошкодження ізоляції обмоток якорів в експлуатації пояснюється недоброякісним їх ремонтом, далеко недосконалими методами випробувань ізоляції, особливо, обмоток якорів допоміжних машин і важкими умовами експлуатації.

Беручи до уваги, що вартість ізоляції становить близько половини вартості всіх матеріалів електричної машини і в експлуатації за термін служби машини ізоляція частково або повністю замінюється, стає зрозумілим велике

значення якості і надійності електричних машин постійного струму, що виготовляються нашою промисловістю.

У зв'язку з цим для підвищення якості та надійності виготовляємих і ремонтуваних електричних машин постійного струму необхідно в процесі виробництва забезпечити гарну якість корпусної і виткової ізоляції. Це досягається дотриманням правильно розробленої технології виготовлення ізоляції та обмоток і досконалими методами контролю стану і оцінки працездатності корпусної і виткової ізоляції. Найбільш досконалі методи випробувань ізоляції обмоток електричних машин повинні дозволяти не тільки виявити наявність пошкоджень, а й визначити місце дефекту. Останнє особливо необхідно на заводах, що ремонтують електричні машини постійного струму у великій кількості, а саме, на ремонтних заводах, де відсоток браку по причині виткового замикання і пробою ізоляції на корпус обмоток якорів ще досить значний.

Можливість визначення місця (точки) дефекту ізоляції обмотки електричної машини дозволяє підвищити продуктивність праці при ремонті, економити дорогий ізоляційний матеріал, аналізувати причини браку і, ґрунтуючись на цьому, удосконалювати технологію виробництва обмоток, а найголовніше, завдяки підвищеній чутливості до дефектів, посилити контроль стану ізоляції і тим самим підвищити надійність роботи електричних машин в експлуатації.

Електричні машини постійного струму не знаходять собі такого широкого застосування, як інші машини змінного струму. Тому питання випробування та виявлення місць дефектів ізоляції обмоток електричних машин постійного струму приділялася як у нас у країні, так і за кордоном значно менше уваги. Найбільш розповсюджені методи то прилади, що використовуються для випробування ізоляції обмоток електричних машин, головним чином змінного струму.

В даний час найбільш прогресивними методами випробування та виявлення дефектів ізоляції обмоток електричних машин є імпульсні методи: випробування хвилею, що біжить і випробування індукованою імпульсною напругою. Стосовно до обмоток якорів колекторних електричних машин постійного струму випробування індукованою імпульсною напругою малоефективні в силу наявності в них природних короткозамкнених контурів, що ускладнює точне виявлення пазу дефектної виткової ізоляції і не дозволяє створити достатніх за величиною випробувальних напруг. Іншим недоліком цього методу випробування є низька продуктивність, викликана необхідністю фіксувати індуктор і індикаторний електромагніт над кожним досліджуваним пазом на час, необхідний для спостереження за показаннями індикатора. Тому в даний час для випробування ізоляції обмоток якорів електричних машин постійного струму застосовується метод біжучої хвилі і його різновиди: метод звірення хвиль і розряд генератора імпульсних напруг на частини випробовуваної обмотки, під'єднані до пари сусідніх колекторних пластин якоря.

При випробуваннях хвилею, що біжить найбільшого поширення набули два методи індикації виткового замикання: бруківці метод і метод змінного напрямку руху хвилі. Однак цими методами можна виявити лише наявність виткового замикання в яку випробовують обмотці. Точно визначити паз, в якому розташований короткозамкнений виток не представляється можливим.

Різновид мостової схеми випробування стосовно обмоток якорів колекторних електричних машин постійного струму використовується до теперішнього часу на багатьох заводах, що виготовляють і ремонтують електричні машини постійного струму, має задовільну індикацію наявності виткового замикання і для деяких видів обмоток (в основному для хвильової обмотки) дозволяє знайти секцію з витковим замиканням при малому перехідному опорі в місці дефекту ізоляції. Для петльових обмоток якорів з зрівняльними з'єднаннями ця випробувальна схема малоефективна, так як електричні стани, дійсно дефектної секції і секцій, безпосередньо з'єднаних з

останньої урівнювачами, практично однакові, особливо при великих перехідних опорах в місці дефекту. Тому точно виявити секцію з дефектною витковою ізоляцією часто не вдається.

Серія приладів, працює на принципі розряду ПГІ, на частину обмоток якоря і порівняння індуктивностей цих ділянок. Випробування проводять шляхом почергового дотику щупами всіх суміжних пластин до колектора, порівнюючи показання індикатора. Зрозуміло, що при масовому виробництві колекторних електричних машин постійного струму такий метод контролю стану виткової ізоляції практично неприйнятний через низьку продуктивність і велику стомлюваність відповідних працівників. Істотним недоліком цих приладів є порівняно низька чутливість до виткового замикання через великі перехідні опори в місці дефекту. Особливо важлива ця чутливість при виявленні місця виткового замикання в обмотках якорів з зрівняльними сполуками.

Що стосується питання виявлення місця (точки) пробою корпусної ізоляції в обмотках якорів колекторних електричних машин постійного струму, то воно до останнього часу не було вирішено зовсім. Випалювання місця дефекту корпусної ізоляції шляхом пропускання великого струму не слід вважати методом виявлення місця пробою, так як при цьому вигорає не тільки ізоляція, а й мідь обмотки і навіть залізо пазової частини якоря. Зрозуміло, що це крайній захід, який приймається через відсутність ефективного методу виявлення місця пробою корпусної ізоляції. Разом з тим на заводах, що виготовляють і ремонтують електричні машини постійного струму, ефективний метод виявлення місця пробою вкрай необхідний.

Обмотка якоря є основною, найбільш важливою і відповідальною частиною електричної машини постійного струму. Однак не менш важливими є полюсні (головні і додаткові) і компенсаційні котушки машин постійного струму. Основну складність представляють випробування виткової ізоляції і виявлення місця виткового замикання в цих катушках. На сьогоднішній день

розроблено методи та апаратуру в основному для діагностики машин мінного струму і дуже мало для тягових машин постійного струму.

При загальновідомих перевагах і практичній важливості зазначених вище методів і апаратури для індикації наявності виткового замикання в котушках вони володіють і істотними недоліками: складний і різноманітний характер кривих імпульсного напруги на екрані електронно трубки індикатора, відповідних відсутності або наявності виткового замикання в випробовуваних котушках різних типів необхідно постійно мати еталонну котушку і високовольтний перемикач напряму руху хвилі порівняно низька чутливість стрілочних індикаторів виткового замикання, обумовлена методами індикації випробування індукуються імпульсним напругою менш зручні в виробничих умовах, ніж з безпосереднім впорскуванням випробувальної напруги на висновки котушки, і цей метод практично неприйнятний для випробування, наприклад, котушок головних, додаткових полюсів і компенсаційних котушок в зібраному кістяку тягового двигуна.

Зазначені вище методи випробування виткової ізоляції котушок не дозволяють виявити місце (точку) виткового замикання, що є істотним недоліком, що утрудняє проведення ремонту дефектних котушок. Описаний в метод виявлення місця виткового замикання в котушках трансформаторних обмоток непридатний до полюсним і компенсаційним котушок електричних машин постійного струму, так як конструктивно це різні обмотки.

На заводах, що виготовляють тягові двигуни електровозів і тепловозів або ремонтують їх, бажано мати апаратуру, яка дозволяє виявляти місце (точку) виткового замикання в секціях розрізного типу обмоток якорів. Відомі на цей час пристрої, в яких використовується метод виявлення місця виткового замикання в котушках трансформаторних обмоток, володіють значними недоліками, які не дали цим пристроєм знайти широкого застосування. До числа цих недоліків відносяться: незадовільна робота індикатора виткового замикання при нестабільному горінні електричної дуги в місці дефекту

виткової ізоляції із застосуванням випробувальної напруги; мінливість чутливості індикатора в залежності від того, які витки замикають (крайні або внутрішні); низька перешкодозахищеність; складність і громіздкість схем генератора випробувальних напруг і індикатора виткового замикання.

Імпульсні випробування ізоляції обмоток електричних машин нерозривно пов'язані з хвильовими процесами в них, без глибокого знання яких неможливо створити ефективних методів індикації та виявлення місця дефекту ізоляції. Особливо це відноситься до обмоток якорів колекторних електричних машин постійного струму, що представляє собою найбільш складні об'єкти випробування з точки зору хвильових процесів в них.

Дослідження і розробка теорії хвильових процесів в лініях електропередачі, трансформаторах і обертових електричних машинах стали проводитися з початку 30-х років. Причому, в центрі уваги опинилися лінії електропередачі і трансформатори, найбільш схильні до атмосферних перенапруг, а пізніше - електричні машини змінного струму. Цим питанням присвячено ряд монографій і окремих статей вчених Г.Н.Петрова, М.В.Костенко, Л.І.Сіротінського, В.А.Карасева, Р.А.Лютера, С.П.Грецького, Г.С.Щвеца, Е.С.Фріда, д.З.Разевіга, А.І.Аорамова, З.Г.Каганова, В.А.Люлько, Ю.А.Бахвалова та інших, які дозволяють створити досить точне уявлення про фізику хвильових процесів в лініях електропередачі, в обмотках трансформаторів і електричних машин змінного струму, дають методику розрахунку хвильових напруг. Причому, зазначені вище основні праці присвячені розвитку теоретичних питань, спрямованих на встановлення загальних закономірностей хвильових процесів. Тим часом сучасні потужні трансформатори, турбогенератори, гідрогенератори і тягові двигуни постійного струму електричних локомотивів мають досить складну структуру обмоток.

Тому в останні роки поряд з подальшим розвитком загальної теорії хвильових процесів, широкий розмах придбали експериментальні дослідження, що доповнюють і уточнюють теоретичні розробки. Необхідно підкреслити той

факт, що правильно зняті осцилограми хвильових напруг в обмотках електричних машин є зразками, до яких повинен наближатися аналітичний розрахунок і моделювання цих процесів. Тому в даній роботі велика увага приділяється експериментальним дослідженням хвильових процесів в обмотках якорів машин постійного струму.

Дослідження хвильових процесів в обмотках електричних машин постійного струму почалися значно пізніше, ніж в обмотках машин змінного струму і обумовлені широким розвитком електрифікації залізничного транспорту. До останнього часу проводилися дослідження розподілу хвильових напруг в силовому ланцюзі електровоза або електропоїзда і в обмотках тягових двигунів в режимі навантаження. В основному в цих роботах цікавилися тільки хвильовими напруженнями щодо корпусу. Причому, на початку розвитку вітчизняного електровозобудування застосовувалися чотиріполюсні тягові двигуни порівняно невеликої потужності: ДПЕ-400 на електровозі ВЛ-22м, мали просту хвильову обмотку якоря.

На наступних більш потужних і більш сучасних електровозах як вітчизняного виробництва, так і зарубіжного, експлуатованих на наших залізницях, застосовуються шестиполюсні тягові двигуни, якоря яких мають петлеву обмотку з зрівняльними сполуками. Як буде показано в даній роботі, з точки зору хвильового процесу петлева обмотка якоря з зрівняльними сполуками істотно відрізняється від хвильової і є більш складною в сенсі розробки ефективних методів виявлення місць дефектів ізоляції. Проте тих відомостей про хвильові процеси електричних машин постійного струму, якими володіє практика, недостатньо для розробки найбільш ефективних методів індикації та виявлення місць дефектів ізоляції в їх обмотках.

Для практики імпульсних випробувань обмоток електричних машин постійного струму великий інтерес представляють поздовжні міжсекційні $U_{m.c}$ і міжвиткові $U_{m.v}$ хвильові напруги, дослідженню яких приділялася дуже мало уваги, і імпульсне магнітне поле, що випробовується обмотки якоря, яке раніше

зовсім не досліджувалась, за винятком теоретичного розрахунку розподілу електромагнітного поля в системах з шихтованою сталлю. Незважаючи на те, що в своїй конструкції електричні машини постійного струму мають багато спільного з машинами змінного струму, для яких поздовжні хвильові напруги $U_{м.в}$ досліджені досить повно і докладно, як буде показано в даній роботі, фізика формування і характер розподілу $U_{м.в}$ уздовж обмотки випробовується якоря машини постійного струму істотно відмінні у порівнянні з обмотками машин змінного струму.

Виходячи з недостатньою вивченості хвильових процесів в обмотках електричних машин постійного струму і недосконалості відомих методів і апаратури для випробування ізоляції обмоток цих машин, поставлено такі завдання:

- 1) Дослідити розподіл хвильових напруг щодо корпусу, міжсекційних і междуніткових напружень в обмотках якорів колленторних електричних машин постійного тону при випробуваннях ізоляції імпульсним методом.
- 2) Визначити хвильові параметри і зробити розрахунок хвильових напруг в обмотках якорів при випробуваннях ізоляції імпульсним методом з метою обґрунтувати фізику формування хвильових напруг.
- 3) Дослідити імпульсне поле випробовуваної обмотки якоря.
- 4) На основі проведених досліджень розробити нові модернізовані ефективні методи індикації та виявлення місць дефектів ізоляції в обмотках електричних машин постійного струму.

Основний обсяг дослідних робіт проведено на петлевий обмотці якоря з зрівняльними сполуками шестиполюсних тягових двигунів серійних магістральних електровозів змінного струму, так як цей тип обмотки якоря є в даний час найбільш прогресивним для тягових двигунів як у нас, так і за кордоном.

ГЛАВА ПЕРША

ІМПУЛЬСНІ ПРОЦЕСИ В ЯКОРНИХ ОБМОТКАХ ЗІ ЗРІВНЮВАЛЬНИМИ З'ЄДНАННЯМИ В ТЯГОВИХ ДВИГУНАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1. Опис імпульсної установки для проведення досліджень величин та градієнтів напруг в якорних обмотках

Так як на сучасних електровозах вітчизняного виробництва і зарубіжного, експлуатованих на наших залізницях, застосовуються в основному шестиполюсні тягові двигуни, що мають петлеву обмотку якоря з зрівнювальними сполуками, то основним типом обмоток досліджених якорів була проста петлевая з зрівняльними сполуками. Досліджувалися якоря двигунів різної потужності, напруги, конструктивного виконання обмоток якорів. Додатково проводились дослідження на хвильовій обмотці якорів допоміжних машин постійного струму електровозів.

Стосовно повністю зібраної обмотки якоря із зрівняльними сполуками машин постійного струму найбільш ефективним методом випробування виткової ізоляції є в даний час метод біжучої хвилі, що забезпечує достатні величини випробувальних міжвиткових напружень. Тому в даній роботі була поставлена мета провести дослідження формування та розподілу хвильових напруг в випробовуваних обмотках якорів саме при імпульсному методі.

Для проведення досліджень був розроблений пристрій генерації імпульсної напруги ППІ, як розрядника якого застосований високовольтний імпульсний тиратрон типу ТГІІ-Іф00 / Іб-Л2 (рис 1,а). Підпал тиратрона здійснюється позитивною напівхвилею випрямленої напруги промислової частоти мережі живлення. Підпал тиратрона позитивної напівхвилі випрямленої напруги мережі живлення при дотриманні всіх інших паспортних вимог цілком прийнятний, більш простий і надійний. Застосування тиратрона потрібно для того, щоб не пропускати розрядний струм ємності в ударі з ППІ через вторинну обмотку трансформатора ТР2 підпалу тиратрона.

Періодично повторювані імпульси напруги з частотою проходження 50 мксек формувалися на досліджуваному об'єкті (обмотці якоря) за допомогою МІГ: Перший каскад схеми містить ємнісний накопичувач $C1$, ємність якого дорівнює 13,7 мкФ, індуктивність L і тиристор $T1$. Другий каскад містить конденсатори $C2 = 44,5$ нФ і $C3 = 44,52$ нФ, і дросель насичення $L2$. Еквівалентна ємність, що є навантаженням генератора, входить в третій каскад і позначена $C4$. Ємність $C1$ заряджається через зарядну індуктивність $L1$ постійною напругою до 1 кВ, накопичуючи при цьому енергію. На тиристор $T1$ подається керуючий сигнал, і збережена в ємнісному накопичувачі $C1$ енергія через підвищувальний трансформатор $TV1$ передається в конденсатори $C2$ і $C3$. Під дією струму розмагнічування сердечник дроселя $L2$ знаходиться в насиченому стані, що призводить до зарядки конденсаторів $C2$ і $C3$ за схемою паралельного включення. $C2$ і $C3$ заряджаються до 5,5 кВ кожен. Для надійного замикання тиристора $T1$, ємність $C1$ обрана менше еквівалентної ємності $C2$ і $C3$. В результаті, конденсатор $C1$ після повної розрядки перезаряджається до напруги - 400 В, тому що розрядка йде на велику ємність. Це обумовлює наявність в ланцюзі негативного струму, що замикає тиристор.

У момент часу коли процес передачі енергії з первинного каскаду у вторинний завершується, тиристор $T1$ закривається, і ємність $C1$ знову заряджається для формування наступного імпульсу. Дросель $L1$ переходить в ненасичене стан і конденсатор $C2$ перезаряджається. Тепер конденсатори включені послідовно і їх сумарна напруга досягає значення 11 кВ. При цьому сердечник дроселя $L1$ насичується. Ємності $C1$ і $C2$ розряджаються через підвищувальний автотрансформатор $TV2$ формуючи в навантаженні робочий імпульс.

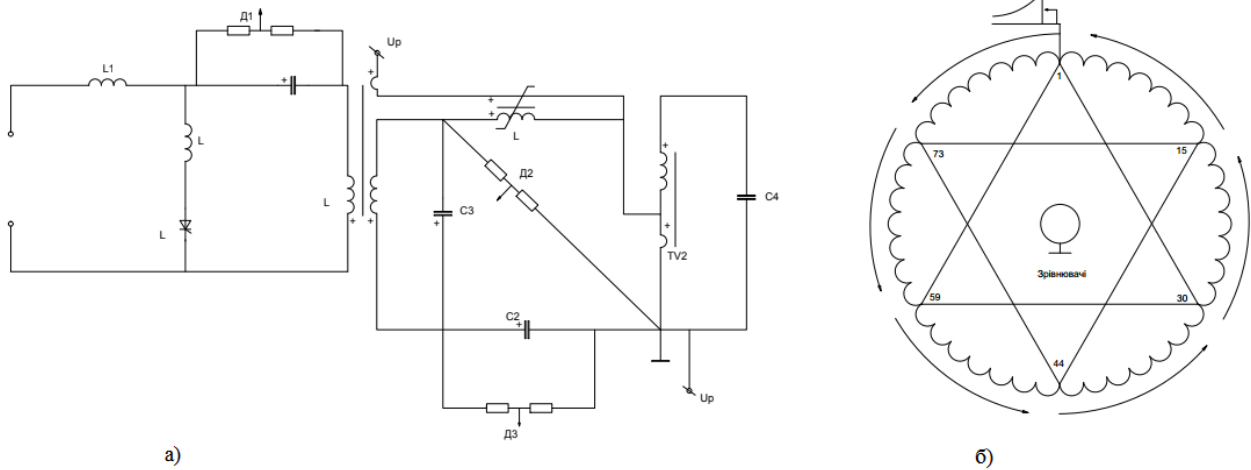


Рисунок 1.1 – а) електрична схема магнітоімпульсного генератора, б) схема з'єднання зрівнювальних з'єднань по колектору

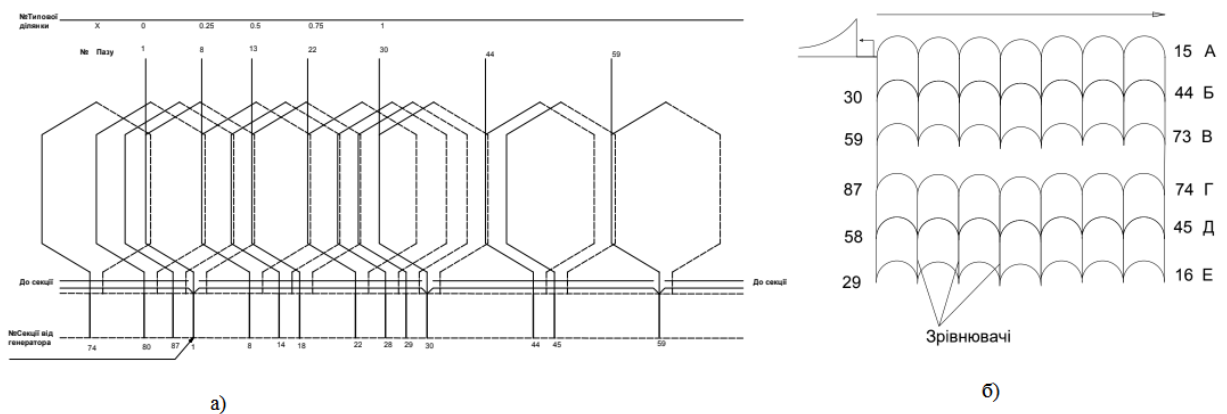


Рисунок 1.2 – а) типова ділянка обмотки якоря, б) схема з'єднання зрівнювальних з'єднань

Таким чином обрані параметри розрядної ланцюга ППГ забезпечують практично незмінну тривалість падаючої хвилі на вхід обмоток, якорів всіх досліджених типів. Фронт падаючої хвилі визначався в основному вхідною (фронтною) ємністю досліджуваної обмотки якоря. Спеціальна фронтна ємність в ППГ не застосовувалася, так як основна мета роботи - дослідження розподілу максимально можливих випробувальних міжвиткових напруг $U_{м.в}$ при випробуванні ізоляції методом біжучої хвилі. Тобто додаткового

згладжування фронту падаючої хвилі на обмотку якоря не потрібно при випробуваннях.

Відомо, що обмотки електричних машин можна вважати лінійними ланцюгами, параметри яких не залежать від амплітуди падаючої хвилі в межах до 20 кВ. Грунтуючись на цьому, всі дослідження в даній роботі проводилися при пониженій величиною амплітуди падаючої хвилі $150 + 200$ В імп, що дозволило, не застосовуючи додаткових дільників напруги, подавати досліджувані напруги безпосередньо на вхід електронного осцилографа. Ідентичні вимірювання хвильових напруг проводилися на 2-3-х обмотках якорів машин одного типу.

1.2 Опис імпульсної установки для проведення досліджень величин та градієнтів напруг в якорних обмотках.

Стосовно до обмоток якорів з зрівняльними сполуками поняття методу біжучої хвилі цілком прийнятно, незважаючи на те, що загальна закономірність розподілу междувітнових $U_{м.в}$ і міжсекційних $U_{м.с}$ напруг, властива обмоткам електричних машин змінного струму, для яких цей метод і був спочатку розроблений, не характерна для обмоток якорів з зрівняльними сполуками. Якщо для всіх обмоток електричних машин змінного струму максимальні $U_{м.в}$ мають місце на початку обмотки і значне зниження їх до середньої частини, то в обмотках якорів з зрівняльними сполуками максимальні $U_{м.в}$ властиві середній частині, а на початку обмотки $U_{м.с}$ можуть бути або менше, або такої ж величини, як максимальні в залежності від числа елементарних секцій в котушці і числа зрівнювачів на паз.

Загальною закономірністю імпульсного методу як для обмоток електричних машин змінного струму, як і для обмоток якорів машин постійного струму є характер зміни хвильових напруг обмотки відносно корпусу U_k : згладжування фронту хвилі в міру просування її уздовж обмотки; загасання амплітуди хвилі напруги до заземленого кінця випробовуваної

обмотки або максимальні перенапруги на ізольованому кінці обмотки, що мають вид коливальних згасаючих імпульсів.

При подачі імпульсної напруги на колектор щодо корпусу в обмотці якоря має місце специфічний характер розподілу хвильових напруг, що повторюються на цілком певних ділянках обмотки. Типовою ділянкою, з цієї точки зору, є частина обмотки якоря, укладена між початком і кінцем одного зрівнювача, на початок (або кінець) якого падає хвиля напруги.

На рис.2,а приведена спрощена розгорнута схема обмотки якоря шестиполюсного тягового двигуна НБ-4І8К з виділенням зазначених типових ділянок І, ІІ, ІІІ (аналогічно для інших двигунів з таким же типом обмоток якорів).

На розгорнутій схемі секції (котушки) зображені одним витком (елементарної секцією). На рис.2б, в показані тільки ті зрівнювачі, які утворюють типові ділянки І, ІІ і ІІІ і безпосередньо за якими подається хвиля напруги на всі три ділянки. Стрілками вказані напрямку руху хвилі. Розгорнута схема типового ділянки І (рис.2, б) зображена трохи докладніше з виділенням окремих секцій, що лежать в загальних пазах, з метою аналізу індуктивних зв'язків. Умовна довжина одного типового ділянки X прийнята за 1.

З розгляду схеми по рис.1,б, та рис.2,б видно, що при випробуваннях методом біжучої хвилі проста петлева обмотка якоря з зрівняльними сполуками складається з шести паралельних гілок (А, Б, В, Г, Д, Е). Тому для аналізу хвильових процесів обмотку якоря зручно представляти їх у вигляді шести паралельних гілок з зрівняльними сполуками по рис.2,б. Причому, виділені з точки зору хвильового процесу паралельні гілки відповідають загальновідомим поняттям і кількості паралельних гілок обмоток машин постійного струму [45,46,47] Тобто для простої петлевої обмотки якоря число паралельних гілок $2a$ дорівнює числу полюсів $2p$:

$$2a = 2p, \quad (1.1)$$

Для практики імпульсних випробувань необхідно встановити зв'язок паралельної гілки з конструктивними даними обмотки якоря. Одна паралельна гілка складається з числа елементарних секцій (витків), укладених в один крок по пазах (крок за зубців) Y_z , і чисельно дорівнює першому кроці Y_1 , рівному відстані між початковою і кінцевою сторонами секції (котушки):

$$Y_1 = U_n \cdot Y_z \quad (1.2)$$

Де $U_n = S/Z = K/Z$ - число елементарних секцій (витків) в одній якірній котушці (секції), виражене через число секцій S , колекторних пластин K і число пазів (зубців) Z якоря.

Для практичних цілей зручніше користуватися зазвичай відомим кроком по пазах Y_z , рівним

$$Y_z = Z/2p \quad (1.3)$$

і характеризуючим собою по кількості секцій одну паралельну гілку обмотки якоря.

Як видно з рис.1,а,б та рис.2а, типова ділянка обмотки якоря ($X = 1$) складається з двох послідовно з'єднаних паралельних гілок, а, отже, дорівнює за кількістю секцій подвоєному кроку по пазах $2Y_z$ або

$$x = 2Y_z = Z/p \quad (1.4)$$

При аналізі хвильових напруг в обмотці якоря щодо корпусу зручніше користуватися схемою по рис. 2, б, де чітко видно початок і кінець обмотки якоря і усувається заплутує уявлення про ці обмотках як "замкнених на себе". Без урахування індуктивних зв'язків і зв'язків зрівнювача (за винятком тих, які утворюють паралельні гілки) схема обмотки якоря по рис. 2, б з точки зору аналізу хвильових процесів аналогічна схемам обмоток електричних машин змінного струму з декількома паралельними гілками. Тут кінець паралельної гілки аналогічний ізольованою нейтралі машини змінного струму.

Схема по рис. 2, б не містить індуктивних зв'язків секцій, що лежать в загальних пазах, а, отже, не може аналіз розподілу $U_{m.v}$ і $U_{m.c}$ в обмотці якоря. Для останньої мети зручніше користуватися спрощеною розгорнутою схемою по рис.2,а з виділеними типовими ділянками і додатково укладеними таблицями, що відображають індуктивні зв'язку в загальних пазах.

Необхідно відзначити, що крім сильних індуктивних зв'язків секцій, які лежать в загальних пазах, існує індуктивний зв'язок лобових частин сусідніх секцій. Однак індуктивний зв'язок секцій в основному визначається пазовими зв'язками.

Як видно з аналізу рис.1-2, а, б, в петльових обмотках якорів існують індуктивні зв'язки секцій половини ($X = 1 / 2$) одного типового ділянки (рис.1) або однієї паралельної гілки та секцій двох половин двох інших типових ділянок або двох інших паралельних гілок (для шестиполюсних машин). Перша секція індуктивно пов'язана з останньою або передостанньою секцією різних паралельних гілок, середня - із середніми інших паралельних гілок.

1.3. Імпульсні перенапруги в обмотках якорів відносно корпусу, міжвиткові і міжсекційні, методика індикації швидкоплинних електромагнітних процесів.

Якщо осцилографування хвильових напруг обмотки якоря щодо корпусу, зазвичай заземленого, здійснюється досить просто загальновідомими методами і апаратурою, то осцилографування поздовжніх хвильових напруг (міжсекційних $U_{м.с.}$ і междувіткових $U_{м.в.}$) вимагає векторного пояснення.

У даній роботі поздовжні хвильові напруги $U_{м.с.}$ і $U_{м.в.}$ осцилографувалися шляхом безпосереднього підключення входу осцилографа типу ДЕСО-І, СІ-8А до відповідних точок обмотки якоря по колектору (рис.1, а). При цьому осцилограф підключався до мережі живлення через розділовий трансформатор ТР, що має малу ємність між обмотками, порядку 40пФ. Магнітопровід розділового трансформатора і корпус осцилографа ізолювались від землі. Досить високий вхідний омичний опір 0,5-1,0 МОм і мала вхідна ємність 20-40 пФ, що застосовувалася при дослідженнях осцилографів не могли впливати на форму вимірюваних хвильових напруг $U_{м.с.}$, $U_{м.в.}$ і тим більше U_k (щодо корпусу).

Для більшої переконливості при дослідженні $U_{м.с.}$ паралельно входу осцилографа, до двох сусідніх колекторних пластин, між якими вимірювалися $U_{м.в.}$, підключилася ємність в десятки разів більша міжвиткової ємності обмотки якоря. При цьому ніяких змін форми $U_{м.в.}$ на екрані осцилографа не спостерігалось. Отже, вхідний опір осцилографа не може змінити дійсної форми досліджуваних напруг.

З точки зору хвильового процесу це можна пояснити тим, що на формування поздовжніх хвильових напруг в обмотках якорів поздовжня междувіткова ємність практично не впливає. Дійсно, міжвиткова ємність проявляється дуже слабо при формуванні $U_{м. в.}$, так як кожна секція (котушка) шунтована двома (для шести полюсних машин) іншими секціями, безпосередньо з'єднаними між собою урівнювачами.

Застосування розділового трансформатора для живлення осцилографа бажано для зменшення ємності вимірювача щодо заземленого корпусу, що вноситься в досліджувану точку обмотки якоря. Однак, необхідно відзначити,

що підключення додаткової ємності до досліджуваної точці обмотки якоря щодо корпусу, величина якої в десятки разів більше ємності одного витка щодо корпусу, не спотворює хвильові напруги в досліджуваній зоні обмотки, так як при цьому не змінюється істотно повна ємність обмотки якоря щодо корпусу.

Дослідження поздовжніх хвильових напруг U_m в обмотках якорів проводилося також і за допомогою електронних осцилографів, типу G1-15, G1-17, що мають диференціальні входи. За допомогою цих осцилографів можна досліджувати міжвиткові напруги в обмотці якоря як різниця потенціалів щодо корпусу відповідних колекторних пластин.

Висновки по главі 1:

- методи індикації і виявлення пробою корпусної ізоляції, засновані на вимірюванні по колектору напруги відносно корпусу, не дозволяє знайти точно секцію з дефектною корпусною ізоляцією через наявність зв'язку по зрівнювачам.
- перехідні процеси в обмотках зі зрівнювальними з'єднаннями відрізняються від обмоток без зрівнювачів.

2. ОБГРУНТУВАННЯ ВЕЛИЧИН ВИПРОБУВАЛЬНИХ НАПРУГ ТА ВЛИВ ДЕФЕКТІВ НА ХАРАКТЕР ХВИЛЬОВОГО ПРОЦЕСУ

2.1 Влив паралельних гілок та зрівнювальних з'єднань на хвильові процеси в якорних обмотках

Хвиля імпульсного напруги, подана від ППІ, на першу умовну секцію 1 обмотки якоря (Рис.2, б, Рис.1, в), поширюється на типових ділянках I, II і III за двома зустрічних напрямках, до середин цих ділянок або, що те ж саме, до кінця кожної паралельної гілки (Рис.2, б). Те, що відбувається при цьому формування хвильових напруг в обмотках якорів не вдається пояснити, користуючись теорією хвильових процесів в довгих лініях з їх законом відображення, яка зазвичай в своїй основі поширюється на хвильові процеси в обмотках електричних машин змінного струму. Так, наприклад, в [19] стверджується, що один період коливання напруги на ізольованому кінці обмотки електричної машини змінного струму можна прийняти відповідним чотириразовому часу пробігу хвилі уздовж обмотки. Однак для обмоток якорів машин постійного струму такого твердження зробити не можна. Відповідно до закону відображення можна записати по [19]

$$l_{\text{ел}} = \frac{1}{4}T, \quad (2.1)$$

де $l_{\text{ел}}$ – електрична довжина обмотки, в мксек;

T – період коливання напруги на ізольованому кінці обмотки в мксек.

Для перевірки цього проаналізуємо час пробігу вздовж обмотки або електричну довжину обмотки $l_{\text{ел}}$, хвильову швидкість ϑ , хвильвий опір Z і частоту власних коливань f , досліджуємих обмоток якорів машин постійного струму.

На рис.3, 4, наведені осцилограми хвильових напруг обмоток якорів НБ-418к, НБ-412к, відповідно, щодо корпусу U_k для половини типової ділянки (для однієї паралельної гілки), де цифрами вказані номери секцій або пар секцій, відповідні рис.1-1, б. Розподіл максимальних величин напруг секцій щодо корпусу U_k уздовж обмоток якорів НБ-418к і НБ-412к наведені на рис.5, а,б,в, відповідно, (криві U_k).

Згладжування фронту хвилі, чітко спостерігається на цих осцилограмах, відповідає поширенню хвилі, що біжить. Однак поступовий розвиток коливань напруги U_k в міру просування хвилі уздовж обмотки якоря і максимальні перенапруги в середині кожного типового ділянки (в кінці кожної паралельної гілки) не вдається пояснити явищем відбиття хвилі від ізолюваного кінця. З аналізу осцилограм напруг щодо корпусу U_k на початку (1; 1) і в кінці (1; 15 або 1; 13) обмотки якоря (рис.3; 4) можна стверджувати, що електрична довжина обмотки якоря $l_{ел}$ (половини типового ділянки або однієї паралельної гілки), а, отже, і хвильова швидкість залежать від того, для якої точки фронту хвилі, що біжить (початкової точки (ек) або гребня (ій) хвилі) ці величини визначаються. Причому, хвильову швидкість, яка визначається по зміщенню гребня хвилі, слід обчислити за часом руху гребня хвилі, що біжить на рівні напруги падаючої хвилі (рис.1-б), а не на рівні гребня напруги на ізолюваному кінці обмотки, як в [19].

В останньому випадку гребінь хвилі знаходиться в області коливальної складової напруги, і тому не характеризує час руху хвилі уздовж обмотки.

Необхідно відзначити, що початковою точкою фронту хвилі, що прийшла до кінця обмотки, слід вважати точку перетину кривої з віссю часу (мається на увазі, звичайно, не почав розгортки). Перша негативна частина напруги U_k в кінці обмотки індукована хвилею напруги, що розповсюджується на першій секції по ходу руху хвилі (рис.3, 4, 5).

Існують і інші методи визначення хвильової швидкості. Один з них заснований на вимірюванні часу подвійного пробігу хвилі по обмотці, який

починається від початкової точки фронту падаючої хвилі до моменту приходу початку фронту відбитої хвилі по осцилограмам напруги на початку обмотки при ізолюваному і закороченому її кінцях [19,48]. Однак цей метод недостатньо точний, так як початкова точка фронту відбитої хвилі, що знаходиться в місці перегибу кривих падаючої і відбитої хвиль, визначається не зовсім однозначно.

Відомий метод визначення хвильової швидкості за допомогою стоячих хвиль [49]. Цей метод заснований на збудженні в обмотці стоячих хвиль шляхом приєднання обмотки до джерела синусоїдальних сигналів відповідної частоти.

Нарешті, відомий метод визначення середнього часу пробігу, а, отже, і хвильової швидкості по осцилограмі хвилі на ізолюваному кінці обмотки [2,19,50]. При цьому методі вважають, що один перший період коливання напруги на ізолюваному кінці обмотки відповідає чотириразовому часу пробігу хвилі. Однак всі перераховані методи визначення хвильової швидкості (і електричної довжини) за справедливим твердженням в [19] дають різні значення.

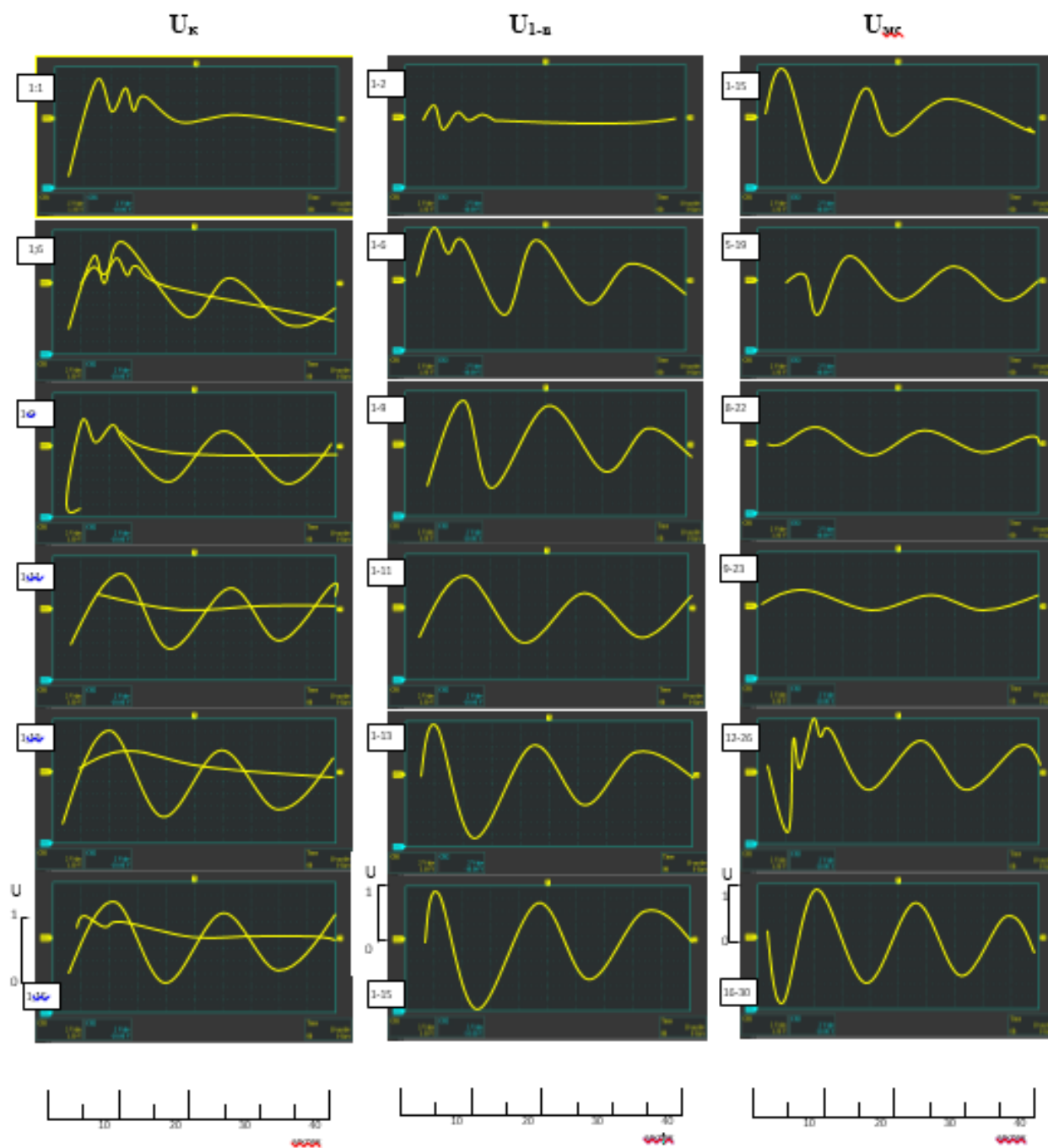


Рисунок 3 - Хвильові напруги U_K , U_{1-N} , U_{3K} в обмотці якоря НБ – 418к.

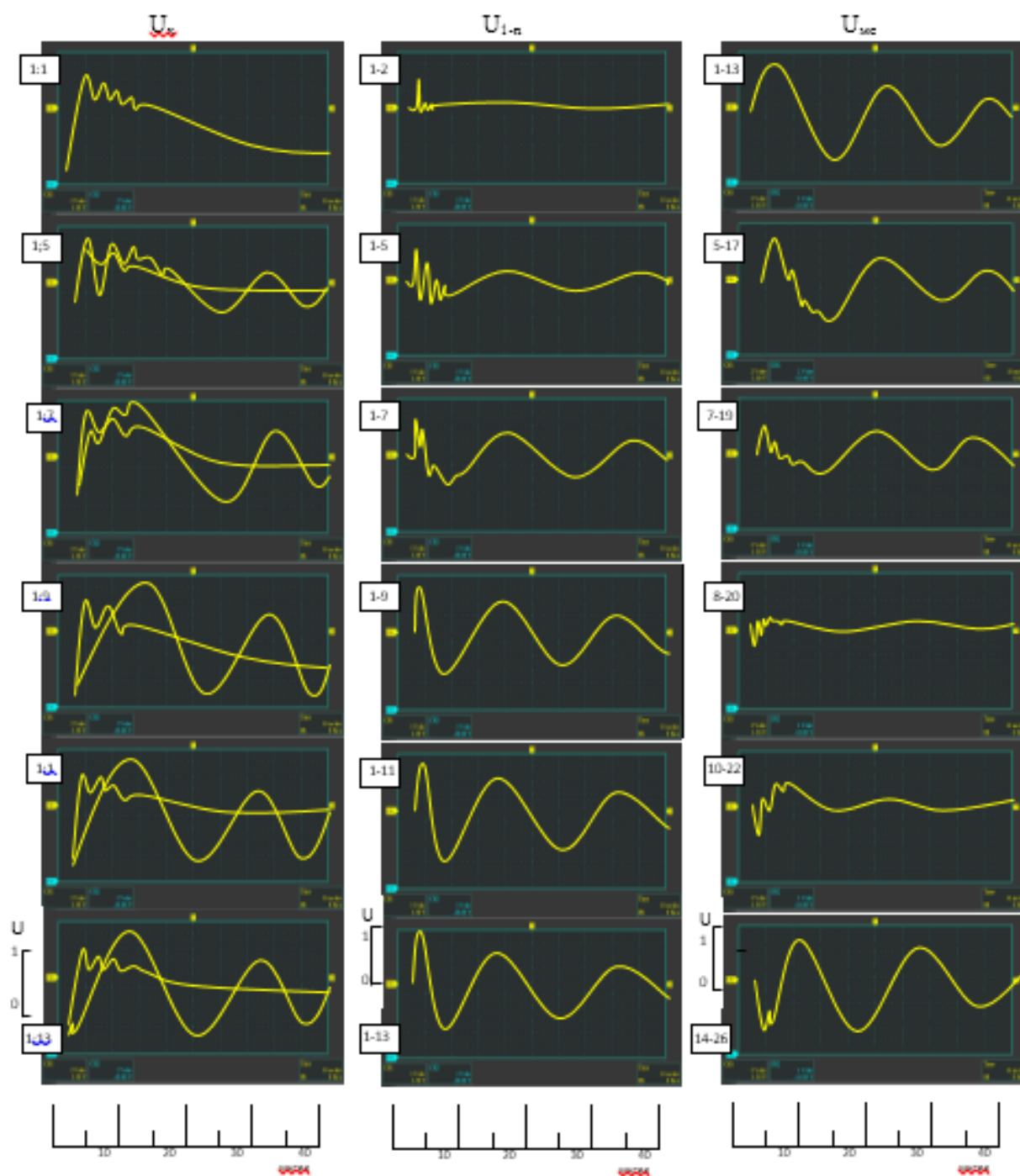


Рисунок 4 - Хвильові напруги U_k , U_{1-N} , U_{mc} в обмотці якоря НБ – 412к

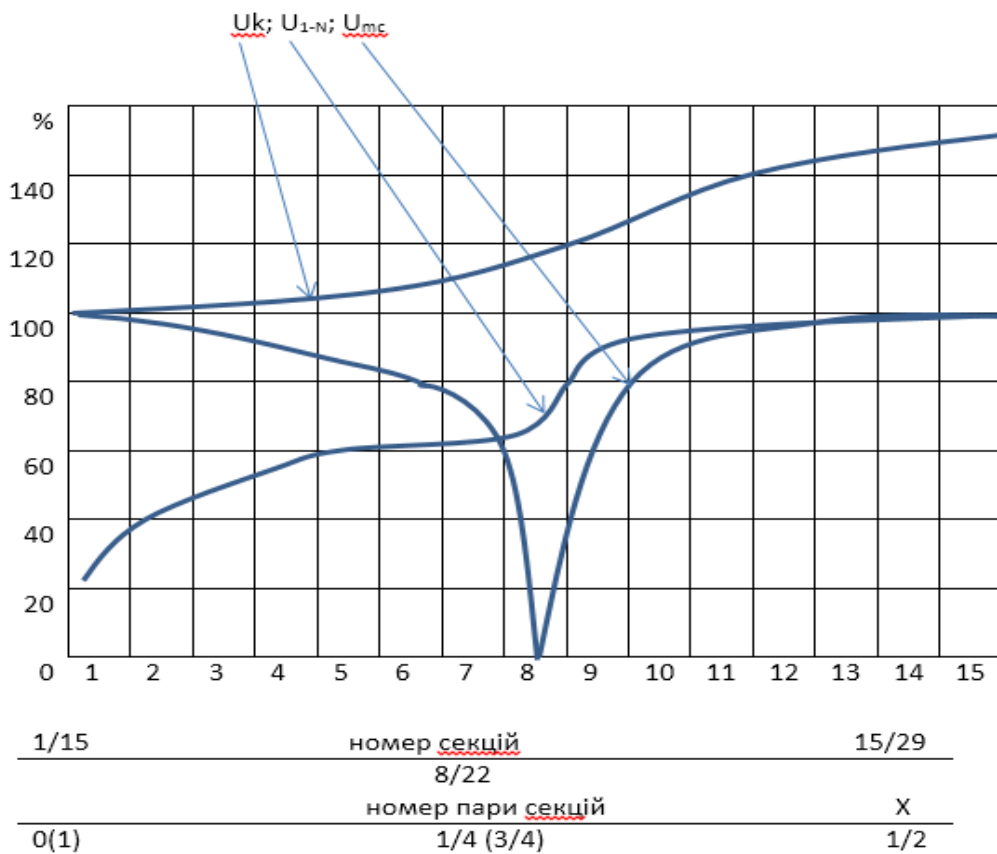


Рисунок 5 – Розподіл максимальних величин напруг секцій відносно корпусу, у лобових частинах та міжвиткові напруги вздовж обмотки якоря(однієї паралельної гілки) двигуна НБ418К

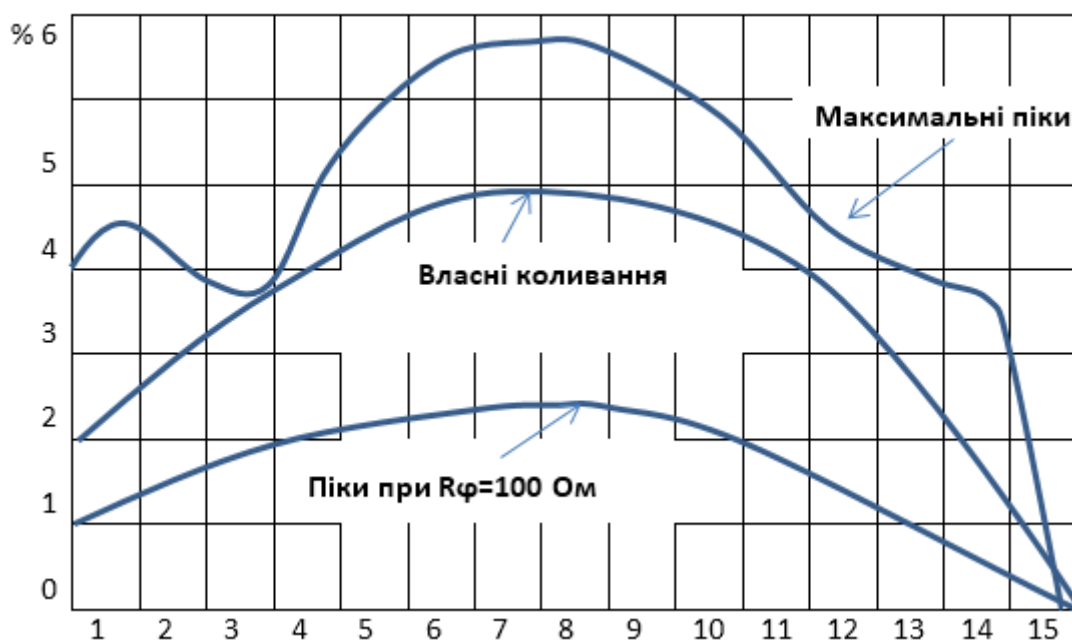


Рисунок 6 - – Характер розподілу максимальних значень міжвиткових напруг обмотки якоря(однієї паралельної гілки) двигуна НБ418К.

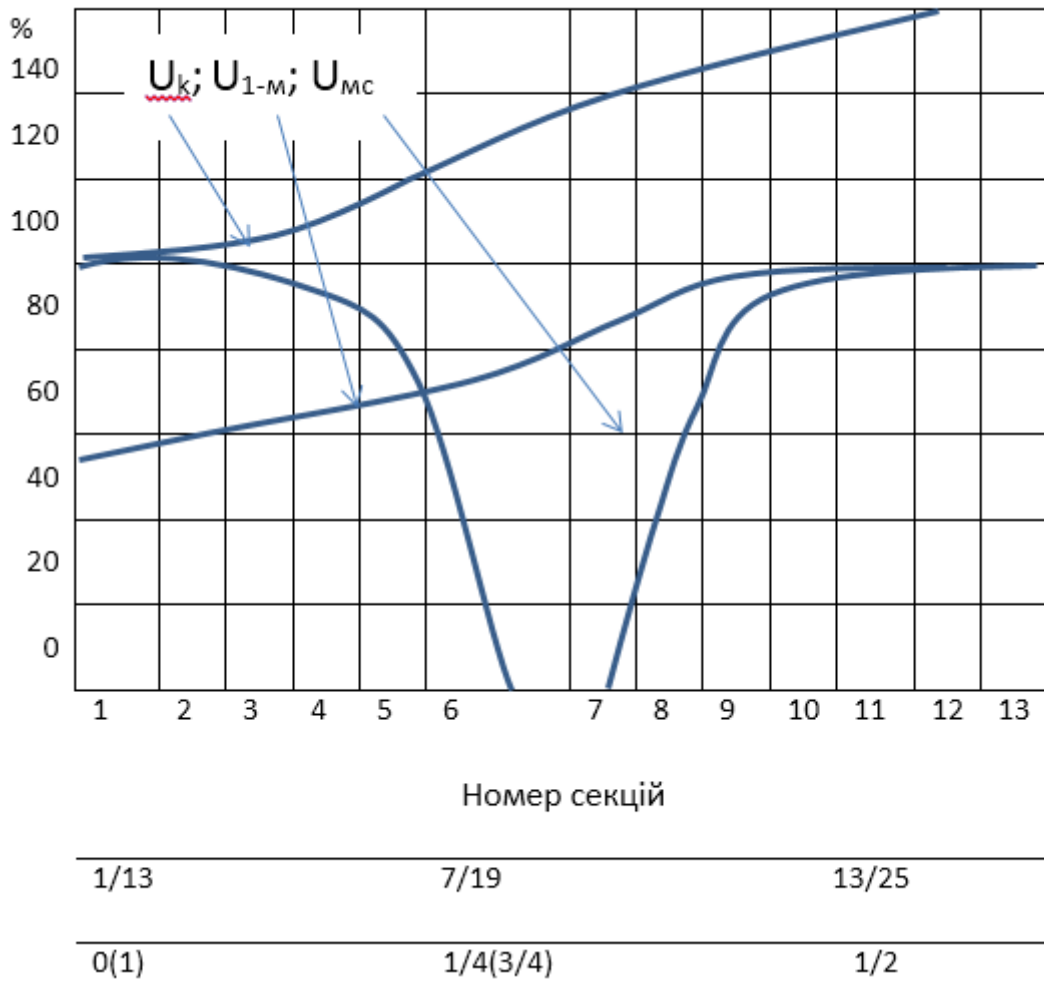


Рисунок 7 - Розподіл максимальних величин напруг секцій відносно корпусу, у лобових частинах та міжвиткові напруги вздовж обмотки якоря(однієї паралельної гілки) двигуна НБ412К

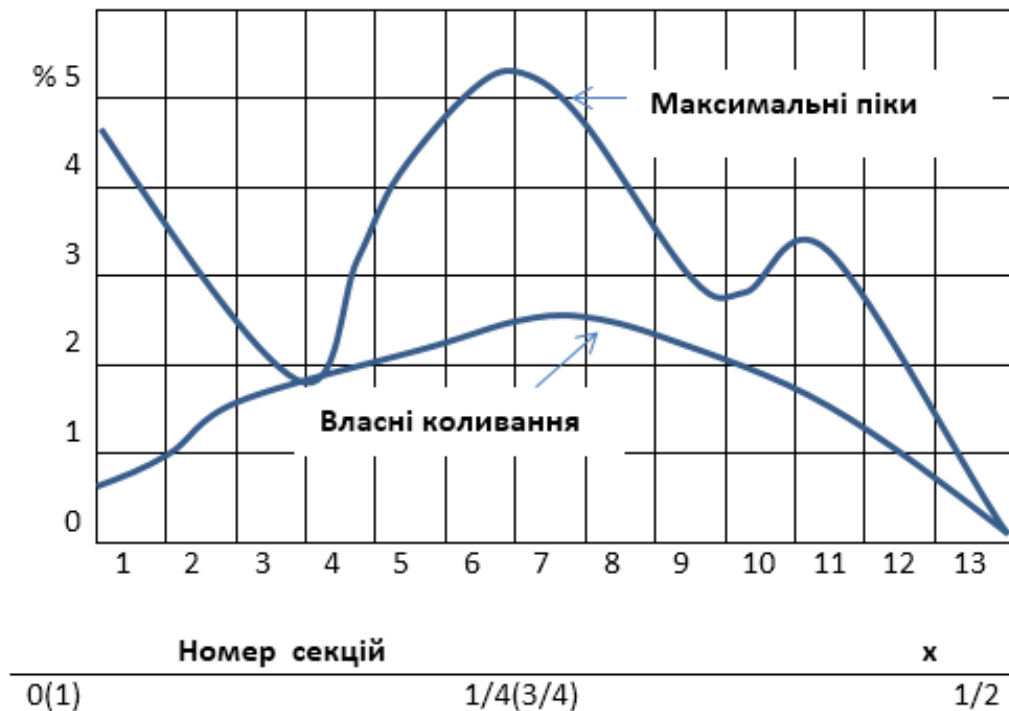


Рисунок 8 – Характер розподіл максимальних значень міжвиткових напруг обмотки якоря(однієї паралельної гілки) двигуна НБ412К.

Відповідно до теорії хвильових процесів в довгих лініях (закон відбиття), перетворюючи (1.5), можна записати наступний вираз для частоти вільних коливань напруги на ізолюваному кінці обмотки

$$f = \frac{1}{4 \cdot l_{\text{ел}}} \quad (2.2)$$

Певні з осцилограм напруг, наведених на рис. 1-3, 1-4, 1-5, електрична довжина $l_{\text{ел}}^{\text{н}}$ і $l_{\text{ел}}^{\text{гр}}$, відповідні зміщенню на початковій точці (н) і гребня (гр) біжучої хвилі, частота власних коливань f_c і частота коливань напруги на ізолюваному кінці обмотки якоря f , визначена за (1.6), зведені в нижченаведену таблицю.

Таблиця 1 – Визначення напруг із осцилограм

Тип якоря	$l_{\text{ел}}^{\text{H}}$	$l_{\text{ел}}^{\text{rp}}$	$f_{\text{с}}$	$f = \frac{1}{4 \cdot l_{\text{ел}}}$		f	$V = \frac{l}{l_{\text{ел}}}$		$V_{\text{ср}}$
				f_{H}	f_{rp}		V_{H}	V_{rp}	
	мксек	мксек	кГц	кГц	кГц	м	м/мксек	м/мксек	м/мксек
НБ 418к	1,5	3	48	167	84	174	87	35	61
НБ 412к	2	5	31	125	50	97	64	32	48

Як видно з таблиці 1, частота коливань напруги f на ізолюваному кінці обмоток якорів, визначена відповідно до закону відбиття хвиль, далеко не збігається з дійсною частотою власних коливань напруги $f_{\text{с}}$ в обмотках якорів машин постійного струму. Це вказує на те, що коливальний характер напруги на ізолюваному кінці обмотки якоря не вдається пояснити, користуючись законом відбиття хвиль теорії хвильових процесів в довгих лініях.

Максимальні коливальні перенапруги на ізолюваному кінці з власною частотою можуть бути пояснені резонансними властивостями обмотки випробовується якоря. Для аналізу хвильового процесу, що має місце при випробуванні ізоляції методом біжучої хвилі по рис. 2, г, обмотку якоря можна уявити коливальним контуром у вигляді П-ланки, що складається з еквівалентної індуктивності всіх паралельних гілок L і двох ємностей, відповідних половині ємності обмотки якоря щодо корпусу Ся. Як відомо [Л.Ю], при впливі на такий контур хвилі напруги з крутим фронтом і пологим спадом на ізолюваному кінці обмотки (на ємності) має місце коливальний напруга, частота якого визначається індуктивністю і ємністю щодо корпусу обмотки електричної машини. Перша (в точці Н) ємність $C_{\text{я}} / 2$ (рис.1-7) впливає тільки на фронт падаючої хвилі.

Тому перенапруги на ізолюваному кінці обмотки якоря слід пояснювати виникненням в ній власних коливань як при ударному імпульсному збудженні

послідовного коливального контуру $L - C\pi/2$ /рис.1-7/ подібно випадків, описаним в [10,61,67].

Однак явища послідовного резонансу недостатньо для пояснення формування хвильових напруг U_k щодо корпусу вздовж всієї обмотки якоря.

Поступове збільшення амплітуди напруги секцій обмотки якоря щодо корпусу U_k (рис.3, 4, 5, 6) слід пояснювати складним перехідним процесом в досліджуваній обмотці подібно до того процесу, який має місце у відповідній ланцюгової схемою заміщення обмотки якоря при розряді ємності установки для генерації імпульсних напруг.

Поняття хвильового опору обмоток електричних машин, також запозичене з теорії хвильових процесів в довгих лініях, і нерозривно пов'язане з явищами відображення хвилі [10,19,20,21,51].

Однак, якщо підключити до кінця обмотки якоря хвильовий опір, який зменшує амплітуду хвилі на ізолюваному кінці на 50%, то не тільки усуваються коливання, але і зменшиться амплітуда аперіодичної складової коливального напруги на кінці обмотки. З порівняння цих осцилограм, що мають однакові масштаби напруги і часу, видно, що біжить хвиля U_k приходить до кінця обмотки якоря (10) з амплітудою, що дорівнює амплітуді хвилі на початку обмотки (1). Але щодо цієї хвилі, як щодо нульової лінії, виникли власні коливання.

Природно, що для усунення коливань на ізолюваному кінці потрібно опір значно більше, ніж те, яке зменшить амплітуду цих коливань на 50%, зокрема, з аналізу осцилограм напруг U_k на кінцях обмотки (1-10) якоря НБ-418к наведена на рис.5, чітко видно, що амплітуда прийшла хвилі до ізолюваного кінця (аперіодична складова) не дорівнює амплітуді відбитої хвилі (не подвоюється), як це повинно бути по теорії хвильових процесів в довгих лініях. Тобто коливальні перенапруги і тут не вдається пояснити явищем відбиття хвилі, що біжить від ізолюваного кінця обмотки якоря.

Тому, виходячи з пояснення перенапруг на ізолюваному кінці обмотки якоря її резонансними властивостями, хвильовий опір Z_k слід розглядати як опір, підключення якого до ізолюваного кінця обмотки при випробуванні її методом біжучої хвилі усуває перенапруження уздовж всієї обмотки.

При цьому спостерігається рівність амплітуд падаючої і прийшла до кінця обмотки хвиль. При поясненні коливань напруги на ізолюваному кінці обмотки якоря виникненням власних коливань як при ударному збудженні послідовного коливального контуру величина перенапруги визначається добротністю обмотки якоря як для контуру.

Добротність обмоток якорів визначається втратами в сталі на вихрові струми, в міді обмотки і діелектричними втратами. Певні по запропонованому методу хвильові опору Z_k обмоток якорів порівнювалися з результатами, отриманими при обчисленні хвильового (вхідного) опору за відомою формулою [19,51].

$$Z(t) = \frac{U_2(t)}{U_1(t) - U_2(t)} \cdot R_\Phi, \quad (2.3)$$

де U_1 і U_2 - максимум падаючих хвиль до фронтового опору R_Φ і на вході обмотки, відповідно (рис.2, а,б).

На рис.2, а побудовані залежності хвильових опорів Z : від часу t для обмоток якорів тягових двигунів НБ-4І8К і НБ-4І2К, по [51] з яких за хвильовий слід брати найбільше значення для моменту часу, відповідного максимуму хвилі, падаючої на вхід досліджуваної обмотки якоря (крива 1, рис.2, а).

Значення хвильових опорів Z_k , визначені шляхом усунення резонансних перенапруг, і хвильового(вхідного) опору Z , зведені в нижченаведену таблицю 4.

Таблиця 2 - Значення хвильових опорів Z_k , визначені шляхом усунення резонансних перенапруг, і хвильового(вхідного) опору Z .

Тип якоря	Z_k	$Z = \frac{U_2}{U_1 - U_2} \cdot R_\phi$
	Ом	Ом
НБ 418к	150	170
НБ 412к	250	320

Як видно з аналізу даних таблиці 2, значення хвильових опорів Z , і опорів Z_k , усувають резонансні перенапруги на ізолюваному кінці обмотки якоря, не збігаються. Це природно, тому що фізична сутність зазначених опорів різна. Одне з цих опорів Z можна розглядати як опір, внесений в обмотку якоря як в послідовний резонансний контур (паралельно ємності) і повністю усуває коливання напруги на виході обмотки. А інший опір Z характеризує вхідний опір, в якому проявляється в основному вхідна (фронтowa) ємність обмотки якоря, не визначає резонансні перенапруги на її ізолюваному кінці. Дійсно, в [51] хвильовий опір 2 обмотки електричної машини пропонується визначати для моменту часу, відповідного максимального напруження на затискачах машини (до приходу відображеної хвилі), тобто в момент часу формування максимуму фронту падаючої хвилі. У такий короткий проміжок часу як тривалість фронту хвилі проявляється тільки вхідні (фронтowa) ємність обмотки. Тривалість фронту хвилі на вході обмотки визначається в основному постійної часу

$$T_\phi = R_\phi \cdot C_\phi \quad (2.4)$$

де - C_ϕ фронтowa (вхідна) ємність досліджуваної обмотки.

Однак фронтowa (вхідна) ємність випробовуваної обмотки якоря не є еквівалентною ємністю щодо її входу при ємнісний схемою заміщення обмотки якоря по [10,19] з наступних причин. Якби у формуванні фронту падаючої хвилі брали участь всі ємності (поздовжні і поперечні) обмотки якоря, то за час

тривалості фронту хвиля напруги пройшла б уздовж всієї обмотки до її кінця. Але для деяких типів обмоток якорів на останніх секціях не встигає формуватися навіть початкова точка фронту хвилі, що біжить, що видно з порівняння тривалості фронту падаючої хвилі (в даних дослідженнях близько 1 мксек) і електричної довжини $l_{\text{ел}}^{\text{H}}$ обмотки, визначеної за зміщення початкової точки фронту хвилі. Особенно переконливий цей факт для хвильових обмоток якорів.

Крім того, фронт (вхідна) ємність обмоток якорів не відповідає навіть порядку тієї величини, яка зазвичай визначається [10, 19] по ємнісній схемі заміщення обмотки електричної машини.

З аналізу осцилограм хвильових напруг U_k і $U_{\text{м.в}}$ обмотки якоря НБ-418К, також видно, що опір, R_{ϕ} включення в схему вимірювання Z послідовно з досліджуваною обмоткою, не тільки усуває коливальну складову поздовжніх напружень $U_{\text{м.в}}$ (при $R_{\phi} = 150 \text{ Ом}$), а й зменшують амплітуду першого піку (в порівнянні з малою величиною ($R_{\phi} = 1 \text{ Ом}$)). Це природньо, тому що зі збільшенням R_{ϕ} згладжується фронт хвилі, що формується на вході обмотки, а, отже, зменшується амплітуда першого піку поздовжніх хвильових напруг $U_{\text{м.в}}$, що є загальновідомим фактом.

Таким чином, включення опору R_{ϕ} до обмотки якоря викликає спотворення хвильових напруг щодо корпусу (сер. криві U_2 , і U_k при $R_k = 150 \text{ Ом}$) і поздовжніх міжвиткових напруг (ср $U_{\text{м.в.}}$, при $R_{\phi} = 1$ і 150 Ом і при $R_k = \infty$ і 150 Ом). За вказаними вище причин хвильовий опір, не є тим опором, яке тільки усуває коливальні перенапруги на ізолюваному кінці випробовуваної обмотки, не спотворюючи додатково основну аперіодичну складову біжучої хвилі, при підключенні опору такої величини як Z до кінця обмотки відносно корпусу.

З метою з'ясування характеру розподілу і форм міжсекційних напруг $U_{\text{м.с}}$ при випробуваннях ізоляції обмоток якорів методом біжучої хвилі

досліджувались ум.с. пар секцій, не тільки, що лежать в загальних пазах (при двошарових обмотках), а й інших секцій, які в лобових частинах можуть розташовуватися одна під одною. Для цього знімалися осцилограми хвильових напруг U_{1-N} (рис.1-3, 1-4) секцій обмотки якоря щодо точки падіння хвилі.

Розподіл максимальних значень U_{1-N} уздовж обмоток якорів НБ-418К і НБ-412К, (криві U_{1-N}). Як видно, максимальні значення U_{1-N} приходяться на пари секцій, що лежать на кінцях випробовуваної обмотки: на початку і середині типової ділянки, на початку і наприкінці кожної паралельної гілки, тобто це та напруга, яка виділяється при хвильовому процесі на всій індуктивності випробовуваної обмотки. Це в'яжеться з нашою трактуванням хвильових перенапруг, пояснених ударним збудженням обмотки якоря як послідовного коливального контуру, при якому, як відомо [10, 61, 67] максимальні напруги виділяються на індуктивності і ємності контуру. Відмінність від гармонійного послідовного резонансу полягає в тому, що при хвильовому процесі на індуктивності обмотки якоря виділяється коливальний напруга, приблизно рівна амплітуді падаючої хвилі. Це природньо, тому що при гармонійному резонансі на контур (або обмотку) впливають синусоїдальні коливання, а при хвильовому процесі аперіодичний імпульс.

Приблизна рівність амплітуд U_K падаючої хвилі і максимальної напруги U_{1-N} фізично можна пояснити наступним чином. Формування фронту падаючої хвилі на початок обмотки що випробовується завжди відбувається раніше, ніж хвиля, що біжить прийде до її кінця, тому різниця потенціалів початку і кінця обмотки якоря, що представляє собою максимальні поздовжні напруження U_{1-N} близька до амплітуди падаючої хвилі. Напруження U_{1-N} можуть бути визначені як різниця напруги щодо корпусу U_K відповідних секцій обмотки. Найбільш чітко це видно з порівняння пар осцилограмм U_K на початку і кінці обмоток якорів і осцилограм максимальних U_{1-N} 1 (рис.1-3,1-4). Аналізуючи ці осцилограми, можна зробити висновок, що напруга U_{1-N} складається з першого піку, створеного за рахунок деформації фронту хвилі, що біжить і коливальної

складової обумовленої ударним збудженням обмотки, тобто має ту ж частоту, що і коливальна складова напружень U_k .

Для підтвердження рівності амплітуд першого піку максимальних напруг U_{1-N} і падаючої хвилі U_k можна скористатися методикою [18], згідно з якою падіння напруги ΔU на ділянці обмотки, що створюється хвилею, що біжить дорівнює

$$\Delta U = \frac{l_{el}}{t_m} \cdot U_m \quad (2.5)$$

Розподіл максимальних значень U_{1-N} уздовж обмоток якорів НБ-418К та НБ-412К відповідно (криві U_{1-N}). Як можна побачити, максимальні значення U_{1-N} припадають на пари секцій, розташованих на кінцях випробуваної обмотки: на початку та в середині типової ділянки, на початку та в кінці кожної паралельної гілки, тобто це та напруга, яка виділяється при хвильовому процесі на всій індуктивності випробуваної обмотки. Це ув'язується з нашим трактуванням хвильових перенапруг, що пояснюються ударним збудженням обмотки якоря як послідовно коливального контуру, при якому, як відомо [10, 61, 67], максимальна напруга виділяються на індуктивності та ємності контуру. Відмінність від гармонічного послідовного резонансу полягає в тому, що при хвильовому процесі на індуктивності обмотки якоря виділяється коливальна напруга, яка приблизно дорівнює амплітуді падаючої хвилі. Це природньо, оскільки при гармонічному резонансі на контур (або обмотку) впливають синусоїдальні коливання, а при хвильовому процесі – аперіодичний імпульс.

Приблизна рівність амплітуд падаючої хвилі U_k та максимальної напруги U_{1-N} фізично можна пояснити наступним чином. Формування фронту падаючої хвилі на початок обмотки випробуваного якоря завжди відбувається раніше, ніж рухома хвиля дістанеться її кінця, тому різниця потенціалів початку та кінця обмотки якоря, що являє собою максимальні поздовжні напруги U_{1-N} , є близькою до амплітуди падаючої хвилі. Напруги U_{1-N} можуть бути визначені як різниця

напруг відносно корпусу U_K відповідних секцій обмотки. Найчіткіше це видно з порівняння пар осцилограм U_K на початку та в кінці обмоток якорів та осцилограм максимальних U_{1-N} (рис. 3, 4). Аналізуючи ці осцилограми, можна дійти висновку, що напруга U_{1-N} складається із першого піку, створеного за рахунок деформації фронту рухомої хвилі та коливальної складової, обумовленої ударним збудженням обмотки, тобто тієї, що має ту ж саму частоту, що і коливальна складова напруг U_K .

Для підтвердження рівності амплітуд першого піку максимальних напруг U_{1-N} та падаючої хвилі U_K можна скористатися методикою [18], згідно з якою падіння напруги ΔU на ділянці обмотки, створене рухомою хвилею, дорівнює:

$$\Delta U = \frac{l_{\text{ел}}}{t_m} \cdot U_m \quad (2.6)$$

де $l_{\text{ел}}$ - електрична довжина ділянки обмотки, мксек;

t_m - тривалість максимуму фронту падаючої хвилі, мксек;

U_m - амплітуда падаючої хвилі, В.

У граничному випадку за умови

$$t_m \leq l_{\text{ел}}, \quad (2.7)$$

що зазвичай виникає для всієї довжини обмотки якоря, маємо

$$\Delta U = U_m, \quad (2.8)$$

тобто максимальні поздовжні напруги U_{1-N} дорівнюють амплітуді падаючої хвилі

$$U_K = U_m, \quad (2.9)$$

При цьому слід лише уточнити, що електрична довжина обмотки якоря $l_{\text{ел}}$ в даному випадку визначається для гребня падаючої хвилі.

Максимальні $U_{M.C}$, рівні за амплітудою падаючої хвилі, відносяться до пари секцій, що лежать у спільному пазі, одна з яких є першою за ходом руху хвилі, а інша відстоїть на найбільшій відстані від першої, що дорівнює для обмоток якорів одному кроку по пазах або довжині половини типової ділянки (довжині однієї паралельної гілки).

Форми $U_{M.C}$ (напруг між секціями, що лежать у спільних пазах) на одній типовій ділянці обмотки якоря НБ-418Л наведено на рис. 3, а для обмотки якоря НБ-412К – на рис. 4.

На рис. 5, в наведено характер розподілу максимальних значень міжсекційних напруг $U_{M.C}$ в обмотках якорів НБ-418К та НБ-412К, відповідно (криві $U_{M.C}$).

Фізично характер розподілу $U_{M.C}$ можна пояснити наступним чином. Ці напруги являють собою різницю потенціалів відповідних пар секцій, що відстоять одна від одної (за числом секцій) на один крок по пазах. Відповідно до часу проходження цих пар секцій рухомою хвилею, що рухається в двох напрямках на кожній типовій ділянці, формуються перші піки $U_{M.C}$ позитивної або негативної полярності, більшої чи меншої амплітуди. Коли, наприклад, на першій секції сформувався фронт падаючої хвилі, до середньої секції типової ділянки, що складає пару першій, хвиля навіть не дійшла початковою точкою фронту як від початку, так і від кінця типової ділянки. Тому $U_{M.C}$ цієї пари секцій є максимальними та за амплітудою дорівнюють падаючій хвилі. У міру того, як хвиля проходить наступні секції, різниця потенціалів відповідних пар секцій поступово зменшується, незважаючи на зростання потенціалів U_K відносно корпусу і, нарешті, для симетрично розташованих відносно середини типової ділянки секцій $U_{M.C}$ найменші, оскільки до цих секцій падаюча хвиля приходить в один і той самий час із протилежних сторін типової ділянки. Тобто потенціали цих секцій майже однакові для будь-якого моменту часу.

Для інших пар секцій має місце поступовий перехід від максимальних $U_{M.C}$ до мінімальних. Зміна полярності $U_{M.C}$ (рис. 3, 4) пояснюється переважанням потенціалів U_K , створених рухомою хвилею одного з напрямків: від початку або

кінця типової ділянки до його середини (при незмінній полярності входу вимірювача та постійному напрямку обходу за колектором).

2.2 Вплив дефектів ізоляції на зміну імпульсних напруг в обмотках випробовуваного якоря.

Форми міжвиткових напруг $U_{M.B}$ та їх розподіл уздовж обмоток якорів машин постійного струму при випробуваннях ізоляції методом рухомої хвилі мають специфічний характер, відмінний від характеру розподілу напруг за секціями (при крутому фронті падаючої хвилі) обмоток електричних машин змінного струму і трансформаторів, при якому максимальні значення $U_{M.B}$ припадають на перші секції за рухом хвилі, мінімальні – відносяться до середньої частини обмотки, що поступово зменшуються до її кінця. [8, 10, 15, 39 та інші]. Характер розподілу максимальних значень (максимальні піки) міжвиткових напруг обмоток якорів НБ-418К та НБ-412К наведені на рис. 3, відповідно.

Як видно зі вказаних рисунків, максимальні $U_{M.B}$ мають місце в секціях, розташованих на відстані $1/4$ ($3/4$) від початку або кінця кожної типової ділянки, тобто у секціях середніх пазів кроку по пазах, вважаючи першим той, на який падає хвиля напруги. Мінімуми $U_{M.B}$ припадають на середину кожної типової ділянки, тобто на секцію, що відстоїть від першої на один крок по пазах. На перших секціях цих ділянок величини $U_{M.B}$ залежать від числа витків у секції та числа зрівнювачів на паз. Так, для обмотки якоря тягового двигуна НБ-418К, що має 4 витки в секції та 2 зрівнювача на паз, $U_{M.B}$ першої секції менше максимальних на типовій ділянці приблизно в 2 рази. В обмотці якоря тягового двигуна НБ-412К.

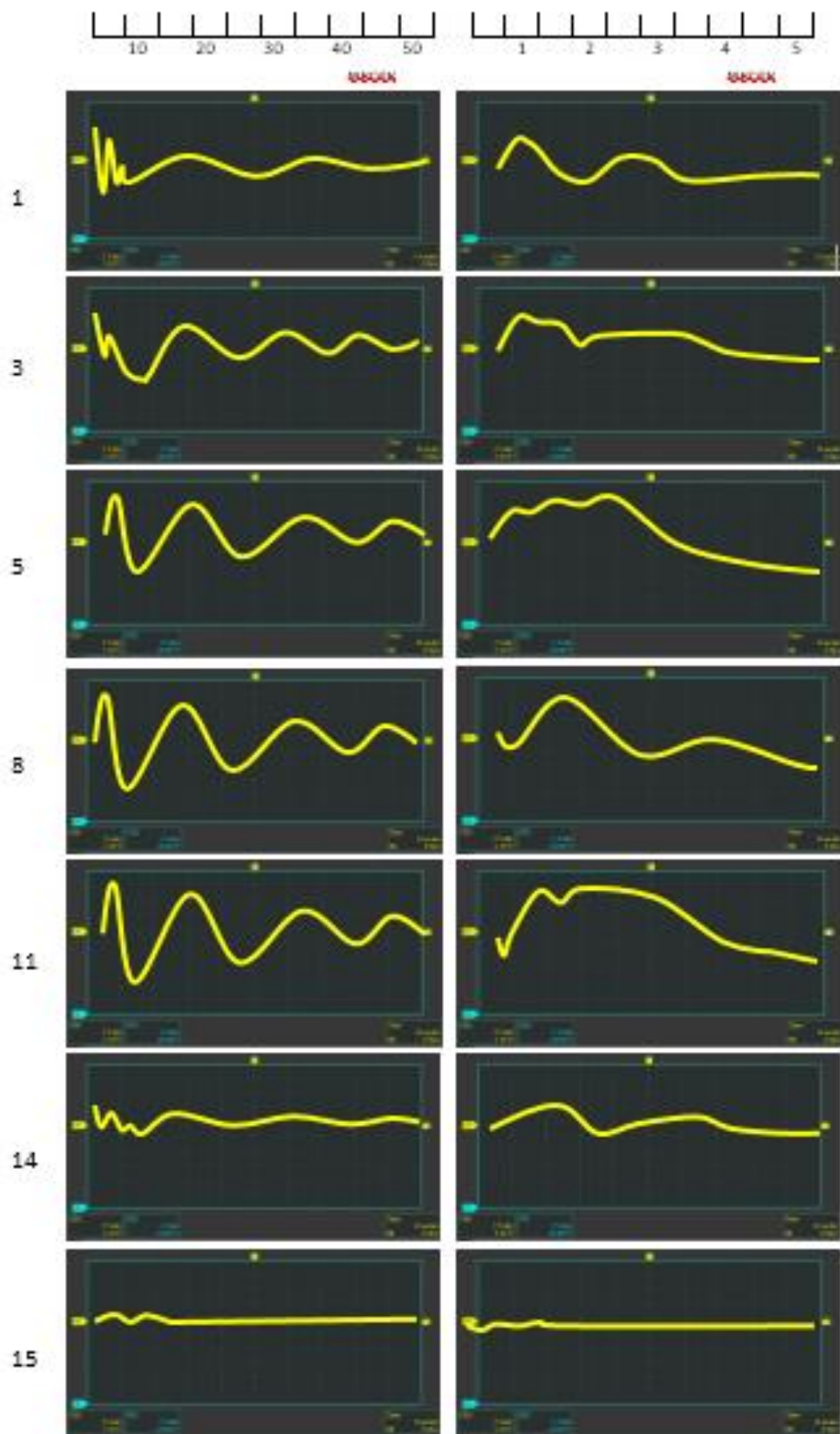
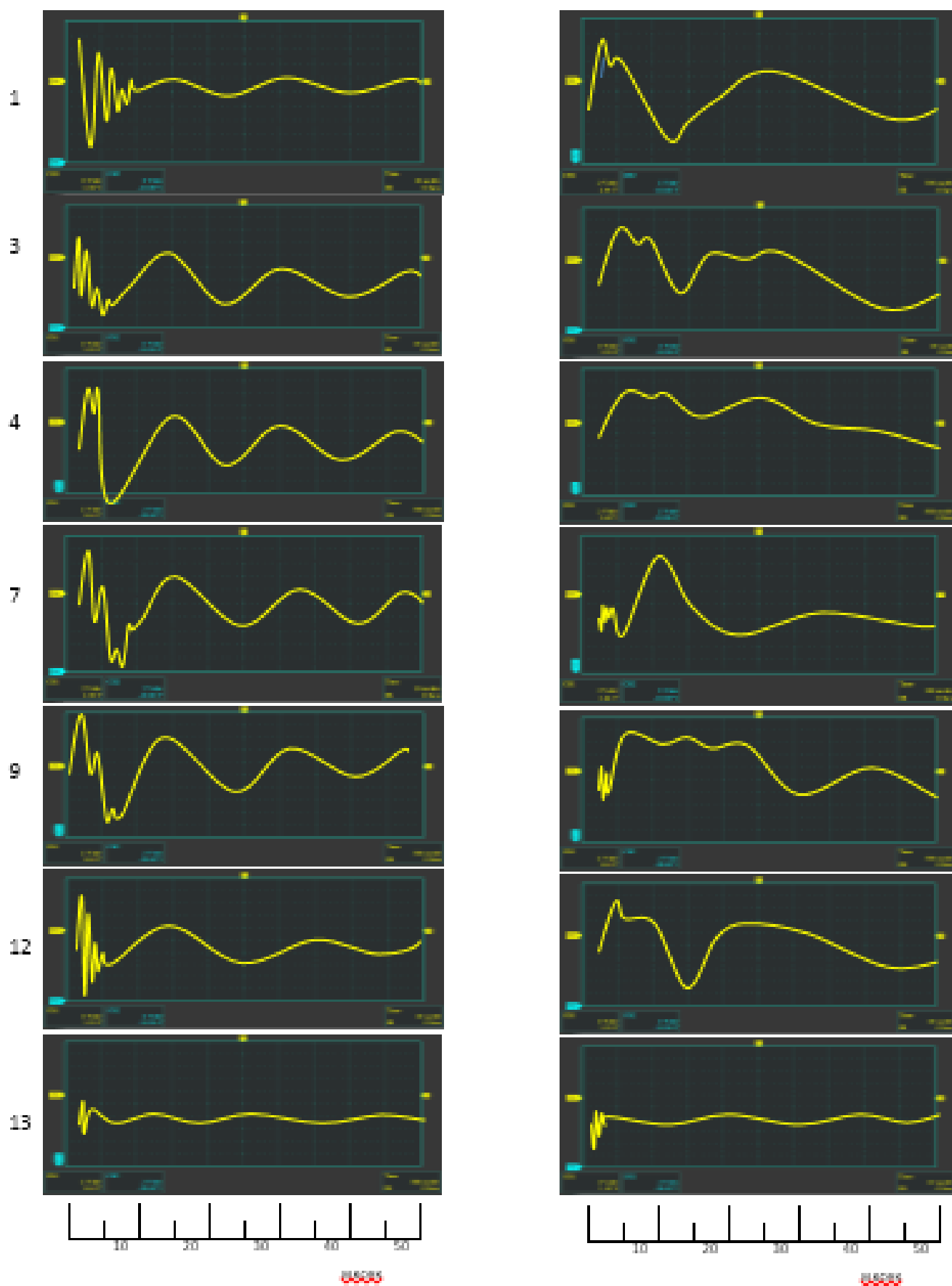


Рисунок 5 – Розподіл напруг $U_{м.в.}$ в обмотці якоря НБ-418кРисунок 6 - Розподіл напруг $U_{м.в.}$ в обмотці якоря НБ-412

приблизно дорівнюють максимальним $U_{M.B}$ на відстані $1/4$ ($3/4$) від початку або кінця кожної типової ділянки.

За формою $U_{M.B}$ є аналогічними $U_{M.C}$. Це природньо, адже $U_{M.C}$ являють собою суму $U_{M.B}$ ряду послідовно з'єднаних витків (секцій).

Для аналізу фізики формування повздовжніх хвильових напруг імпульси $U_{M.B}$ можна умовно розкласти на три складові: максимальний перший пік, наступний менший за амплітудою та зміщений в часі пік і коливальна складова, що характеризується частотою власних коливань обмотки якоря, максимальною амплітудою коливань та згасанням. Для пояснення формування міжвиткових напруг наведено осцилограми $U_{M.B}$ для однієї половини типової ділянки, зняті при двох масштабах часу.

Як зазначено вище, користуючись поняттям відображеної хвилі, не вдається пояснити формування хвильових напруг U_K обмоток якорів відносно корпусу: перенапруг на ізолюваному кінці, електричної довжини обмотки, хвильової швидкості та хвильового опору. Не вдається пояснити і формування $U_{M.B}$ секцій в обмотках якорів машин постійного струму, користуючись поняттям відображеної хвилі, запозиченим із теорії хвильових процесів в довгих лініях.

Специфічний характер розподілу $U_{M.B}$ в обмотках якорів можна пояснити при урахуванні індуктивних зв'язків верхньої та нижньої сторін секцій (катушок) що лежать у спільних пазах та належать до різних половин типових ділянок (різних паралельних гілок).

Аналізуючи осцилограми $U_{M.B}$ можна зробити наступні висновки. Перші піки $U_{M.B}$ початкових секцій типових ділянок створені за рахунок деформації фронту рухомої хвилі, тобто так само, як і в обмотках електричних машин змінного струму та трансформаторів.

Другі піки $U_{M.B}$ початкових секцій типової ділянки індуковано хвилями напруг, що проходять по секціях інших типових ділянок або паралельних гілок. Так, для $U_{M.B}$ секції 1 в обмотці якоря НБ-418К другий пік індуковано хвилями, що проходять по секціях 74 (типова ділянка III) та 15 (середня секція типової ділянки 1); для $U_{M.B}$ секції 2- по секціях 74 та 14; для $U_{M.B}$ секції 3 – по секціях 76 та 13 тощо. Індукуючі секції 74, 75, 76... і 15, 14, 13... розташовані в кінці відповідних паралельних гілок, в кінці обмотки якоря, тому другі піки $U_{M.B}$ початкових секцій (1, 3, ...) типової ділянки 1, що розглядається, зміщені за часом відносно перших піків. Індуковані піки $U_{M.B}$ початкових секцій являють собою результуючий вплив хвиль, що проходять по різних секціях, хвильові напруги яких дещо відрізняються. Так, для секції 2 типової ділянки одна індукуюча секція (75) типової ділянки III є аналогічною з точки зору хвильових напруг секції 13 типової ділянки. Друга індукуюча секція (16) має інші хвильові напруги, аналогічні напругам секції 14. Однак, за часом формування індукованих піків та за амплітудами індукуючих піків секції є практично однаковими. У мірі віддалення від початку типової ділянки перший та другий піки $U_{M.B}$ поступово зближуються та на відстані $1/4$ ($3/4$) від початку та кінця типової ділянки співпадають за часом.

Це природньо, оскільки формування піку, створеного за рахунок вирівнювання фронту рухомої хвилі по типовій ділянці, що розглядається, та індукованого піку відбувається в один і той самий час в силу симетрії секцій, що розглядаються (секції 8, 22, 81) відносно точки падіння хвилі напруги, та полярність індукованого піку є такою самою, як і у основного. З вказаних вище причин $U_{M.B}$ секцій, що знаходяться на відстані від початку та кінця кожної типової ділянки на $1/4$ та $3/4$ її довжини, виявляються максимальними.

Час формування першого піку $U_{M.B}$ відповідає часу приходу початкової точки фронту рухомої хвилі до даної секції. Однак, на секціях, розташованих ближче до кінця обмотки якоря (секція 14 та секція 12), перший пік $U_{M.B}$ формується раніше, ніж до них приходить рухома хвиля. На цих секціях появу першого піку $U_{M.B}$ можна пояснити тим, що він індукований хвилями, що

рухаються по секціях інших паралельних гілок. Зокрема, для секції 14 типової ділянки 1 обмотки якоря НБ-418К індукуючими є секції 87 типової ділянки III та секція 28, тобто початкові секції за рухом хвилі на відповідних типових ділянках, тому індукований пік $U_{M.B}$ останніх секцій обмоток якоря формується раніше, ніж пік, створений за рахунок вирівнювання фронту рухомої хвилі.

Осцилограми $U_{M.B}$ дозволяють визначити коефіцієнт індукованого зв'язку K_C секцій одного пазу, що належать до різних паралельних гілок. Коефіцієнт індукованого зв'язку K_C обмоток якорів визначається як відношення амплітуди індукованого піку $U_{YZ-1}^{M.B}$ до амплітуди індукуючого піку $U_1^{M.B}$

$$K_C = \frac{U_{YZ-1}^{M.B}}{U_1^{M.B}} \quad (2.10)$$

При визначенні коефіцієнта K_C слід брати за основу осцилограми $U_{M.B}$ першої (1) та передостанньої ($Y_Z - 1$) секцій обмоток якорів, на яких найчіткіше розмежовані індукований пік та пік, створений за рахунок деформації фронту рухомої хвилі, наприклад, секції 1 та 14. Для досліджених обмоток якорів машин постійного струму коефіцієнт індуктивного зв'язку має значення $K_C = 0,5 + 0,6$.

Міжвиткові напруги середніх секцій типових ділянок (секція 15, секція 13, секція 10) практично дорівнює нулю, оскільки рухомі хвилі, що приходять сюди та зустрічаються, від початку та кінця відповідної ділянки мають протилежний напрям. Причому, геометричні середини типових ділянок припадають на середні витки їх середніх секцій. Крім того, індуковані хвилі у верхній та нижній сторонах середніх секцій також мають різні напрями. Це підтверджується наступним простим експериментом: якщо зробити виткове замикання в секції однієї половини типової ділянки, що розглядається, то виникають $U_{M.B}$ в середніх секціях, полярність яких характерна для тієї половини ділянки, в якій зроблене виткове замикання. Тут має місце зменшення електричної довжини однієї половини типової ділянки через розмагнічену дію короткозамкненого витка і, отже, зміщення середини типової ділянки в зону неушкодженої половини тієї ж самої ділянки.

Із аналізу осцилограм $U_{M.B}$ видно, що уздовж всієї обмотки якоря, випробуваної методом рухомої хвилі, існують коливання напруги, частота яких дорівнює частоті коливань напруг відносно корпусу U_K та $U_{M.C}$, тобто являє собою основну частоту власних коливань обмотки якоря.

Розподіл максимальних значень коливальної складової $U_{M.B}$ (власні коливання) уздовж обмотки якоря здебільшого має такий самий характер, як і розподіл максимальних значень піків $U_{M.B}$. Різниця спостерігається лише на початкових секціях (1,2,3...) типових ділянок, що можна пояснити двома наступними причинами.

Амплітуда коливальної складової $U_{M.B}$ визначається першими піками як змушуючою силою та індуктивними зв'язками секцій, що лежать у спільних пазах. Причому, обидва моменти є взаємопов'язаними. Перші два піки $U_{M.B}$ початкових секцій формуються у різні моменти часу, як зазначено вище, і, отже, діють як змушуюча сила неузгоджено порівняно з цими з піками $U_{M.B}$ середніх секцій (секція 8; секція 7), що формуються в той самий час. Шунтуюча дія секцій одна на одну, безпосередньо з'єднаних за допомогою зрівнювачів, значною мірою проявляється для початкових секцій, що характеризуються меншою тривалістю перших піків, ніж для середніх секцій. Крім того, $U_{M.B}$ секцій, індуктивно зв'язаних (у спільних пазах) із початковими секціями, є незначними (секція 15; секція 13).

Формування максимальних перших піків і максимальних амплітуд коливальної складової міжвиткових напруг $U_{M.B}$ саме в середині обмотки якоря (1/4 і 3/4 довжини типової ділянки) не вдається пояснити ємкісними зв'язками відповідних секцій, що лежать у спільних пазах. Дійсно, ємкісні зв'язки можуть проявлятися за наявності електричного поля (різниця потенціалів) між відповідними секціями. Однак, потенціали відносно корпусу U_K секцій з максимальними міжвитковими напругами $U_{M.B}$ в серединях паралельних гілок (1/4 і 3/4 довжини типової ділянки) є однаковими, оскільки хвилі напруги приходять до цих секцій в один і той самий час. Тому різниця потенціалів

(електричне поле) між вказаними секціями відсутня, а, отже, ємкісний зв'язок між ними теж відсутній.

Вплив збільшення тривалості фронту падаючої хвилі (до 5 мксек) за рахунок збільшення фронтового опору ($R_\phi = R_3 = 100,0$ м, рис.1-1, а) на форми та характер розподілу максимальних значень міжвиткових напруг $U_{M.B}$ в обмотці якоря НБ-418К відображено осцилограмами (крива-піки при $R_\phi = 100,0$ м).

Як видно, збільшення тривалості фронту падаючої хвилі зменшує амплітуду міжвиткових напруг, однак фізика формування і характер розподілу уздовж обмотки $U_{M.B}$ при цьому не змінюється – усувається лише коливальна складова ($U_{M.B}$ при $R_\phi = 100,0$ м). Максимальні значення повздовжніх хвильових напруг $U_{M.B}$ не залежать від тривалості падаючої хвилі у широких межах до її мінімального значення (близько 5 мксек).

Вище зазначене також підтверджується даними, наведеними в [15].

Для практики імпульсних випробувань ізоляції обмоток якорів інтерес представляє форма падаючої хвилі з максимально можливою крутизною фронту, оскільки лише при цьому можна створити достатні за величиною випробувальні $U_{M.B}$.

Значна нерівномірність розподілу хвильових напруг в обмотках якорів колекторних електричних машин постійного струму при випробуваннях ізоляції методом рухомої хвилі не є таким істотним недоліком цього методу випробування, яким вона є для обмоток машин змінного струму та трансформаторів. Дійсно, подавши імпульсну напругу на колектор випробувального якоря відносно корпусу та тим самим створивши описаний вище розподіл хвильових напруг для одного його положення, провертають якір на валу при незмінному положенні високовольтного струмопідвідного контакту, забезпечуючи рівномірний вплив максимальних випробувальних напруг (відносно корпусу U_K , $U_{M.C}$ та $U_{M.B}$) уздовж всієї обмотки.

З'ясуємо можливість застосування наближеного розрахунку максимальних значень $U_{M.B}$ за методом [15] щодо обмоток якорів машин постійного струму. Для цього перетворимо вираз (1-10) до такого виду:

$$\Delta U^* \cdot 100\% = \frac{\Delta x}{v_{cp} t_m} 100\%, \quad (2.11)$$

де ΔU^* - максимальне значення $U_{M.B}$ у відносних одиницях;

Δx – геометрична довжина одного витку, м;

v_{cp} – середня хвильова швидкість обмотки якоря, м/мксек

(див. таблицю 1-3).

Тривалість максимуму фронту падаючої хвилі t_m для обмоток якорів НБ-418К та НБ-412 дорівнює 1 мксек.

На початковій секції обмотки якоря НБ-418К ($\Delta x = 1,66$ м) максимальні $U_{M.B}$ складають 2,72%, а для обмотки якоря НБ-412К ($\Delta x = 1,91$ м) – 4% від амплітуди падаючої хвилі U_K . Отримані результати розрахунку $U_{M.B}$ незначною мірою розходяться із дійсними максимальними значеннями $U_{M.B}$ початкових секцій цих обмоток якорів, що підтверджує можливість наближеного розрахунку максимальних значень $U_{M.B}$ початкових секцій обмоток якорів машин постійного струму за [18].

Однак для розрахунку максимальних значень $U_{M.B}$ інших секцій, окрім початкових, обмоток якорів машин постійного струму формула (1.12) дає значно занижені величини $U_{M.B}$. Це пояснюється тим, що методика розрахунку, розроблена щодо обмоток електричних машин змінного струму, не враховує впливу індуктивних зв'язків секцій, що лежать у спільних пазах, «дальніх зв'язків» [18]. З цієї причини максимальні значення $U_{M.B}$ секцій обмоток якорів, що знаходяться на відстані $1/4$ і $3/4$ довжини типової ділянки від його початку або кінця, не можуть бути розраховані за формулами (1.10, 1.12). Невірні результати будуть отримані і при розрахунку $U_{M.B}$ за формулою (1.12) для секцій в середині типової ділянки обмотки якоря, де, як було зазначено вище, перший пік (максимальний за амплітудою пік) індукований хвилею, що рухається по іншій секції того самого пазу, де лежить секція, що розглядається.

Якщо в обмотках електричних машин змінного струму величина $U_{M.B}$, які наводяться рухомою хвилею в секціях іншої фази, становить близько $7\div 8\%$ $U_{M.B}$ в індукуючій секції, і це дає підставу не брати до уваги «дальні зв'язки» при розрахунках $U_{M.B}$ [Л. 18, 19], то в обмотках якорів машин постійного струму індукований пік $U_{M.B}$ становить близько 60% від індукуючого відповідної секції іншої паралельної гілки, тому при розрахунках $U_{M.B}$ в обмотках якорів машин постійного струму необхідно враховувати індуктивний зв'язок секцій різних паралельних гілок - «дальні зв'язки».

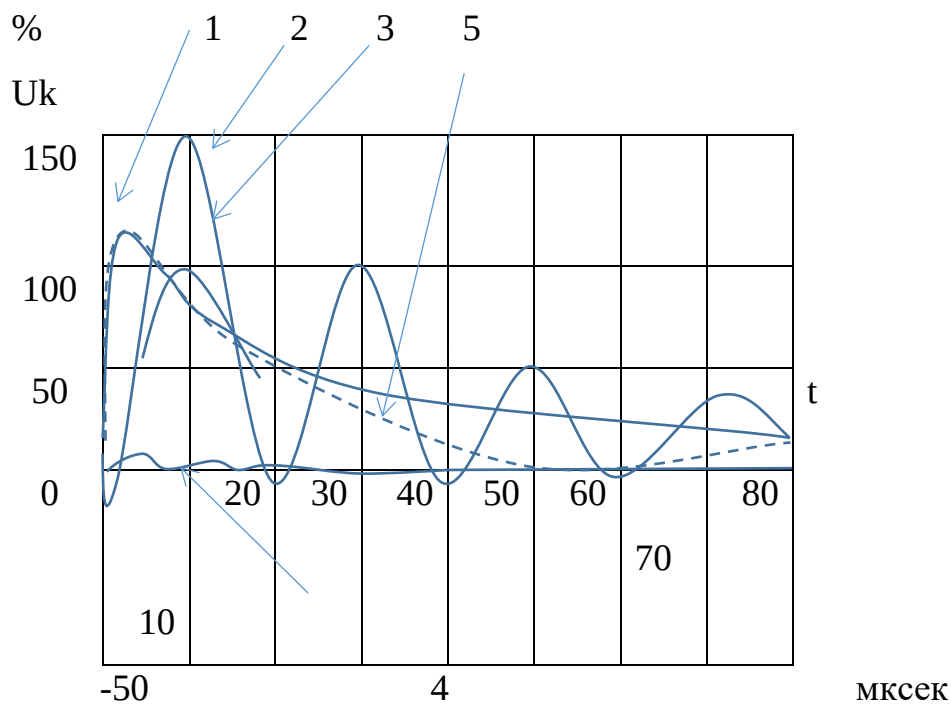


Рисунок – Параметри імпульсів падаючої хвилі, 1 - перша секція, 2 - друга секція, 3 - третя секція, 4 - четверта секція, 5 – п'ята секція.

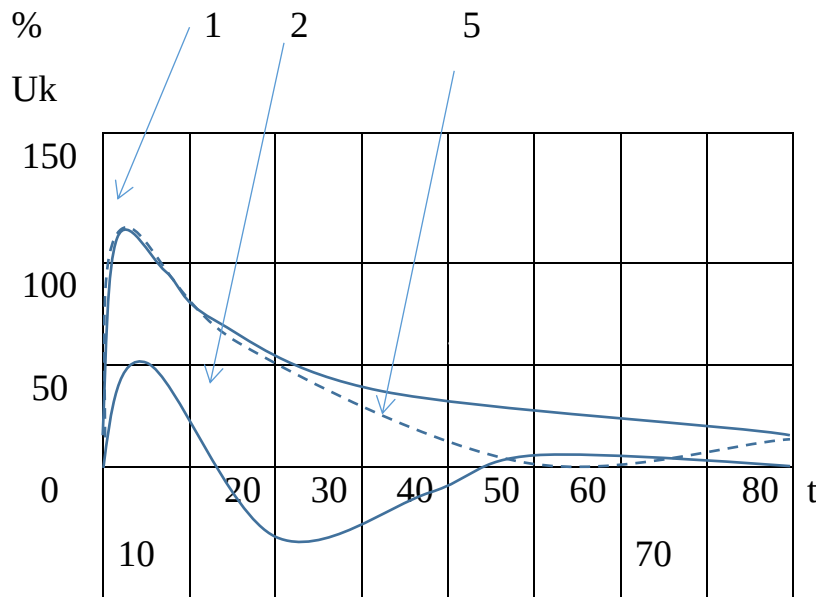


Рисунок – Параметри імпульсів падаючої хвилі, 1 та 5 – міжвитковий пробій у секції, 2 – міжсекційний пробій ізоляції.

2.3 Обґрунтування величин імпульсних перенапруг при випробуванні ізоляції якорних обмоток

Обмотки якорів тягових двигунів сучасних магістральних електровозів мають декілька паралельних гілок (зазвичай 6) і більшу кількість зрівнювальних з'єднань (один, два та навіть повне число зрівнювачів на паз). З метою більш глибокого дослідження хвильових процесів в таких обмотках були виконані додаткові експерименти, які дозволяють оцінити вплив паралельних гілок та зрівнювальних з'єднань на хвильові процеси. Дослідження проводилися на обмотці якоря тягового двигуна НБ-418К восьмивісного магістрального електровозу змінного струму ВЛ-80К.

Для дослідження було взято частину обмотки якоря НБ-418К, що складає половину типової ділянки (одна паралельна гілка), тобто 15 секцій, укладених в пази та з'єднаних послідовно один з одним по колектору. Крім цього, проводилися дослідження розподілу хвильових напруг на частини обмотки того ж самого якоря, що становить одну типову ділянку із 29 та 30 секцій, відповідно, з одним та двома зрівнювачами на один перший та останній пази.

З аналізу осцилограм хвильових напруг U_K та $U_{M.B}$ реальної обмотки та в частині обмотки якоря, що являє собою одну паралельну гілку (15 секцій), та

відповідних кривих розподілу максимальних значень U_K та $U_{M.B}$ (криві 15, 87) видно, що основна закономірність зміни напруг U_K і навіть їх основні кількісні співвідношення, що характеризують повну обмотку якоря, властиві частині обмотки якоря у вигляді однієї паралельної гілки (1-15). Дещо відрізняються частоти власних коливань, згасання цих коливань та відсутній у формі напруги U_K на ізолюваному кінці ділянки (1-15) перший негативний пік, обумовлений індуктивними зв'язками в реальній обмотці якоря. Ці відмінності пояснюються наступним чином. Ємність частини обмотки (однієї паралельної гілки) відносно корпусу складає $1/6$ (обмотка має 6 паралельних гілок) ємності повної обмотки якоря. А індуктивність частини обмотки (15 секцій) не збільшується чітко в 6 разів порівняно з шістьма паралельними гілками повної обмотки якоря через відсутність взаємної індуктивності M . Тому частота власних коливань частини обмотки якоря (однієї паралельної гілки), що дорівнює 57 кГц, відрізняється від дійсної частоти власних коливань повної обмотки, що дорівнює 49 кГц.

Згасання коливань напруги U_K для частини обмотки є меншим, ніж для повної обмотки.

Ослаблені місця виткової ізоляції в розрізних секціях обмоток електричних машин, що призводять при випробувальному напрузі до замикання між витками, і явні металеві замикання складають ще досить великий відсоток на заводах, що виготовляють і ремонтують електричні машини.

Для усунення дефектів виткової ізоляції секцій без пошкодження всієї основної частини корпусних і виткової ізоляції потрібно пристрій, що дає можливість при випробувальному напрузі точно і швидко визначити місце виткового замикання (точку замикання).

Відомі розробки, призначені для цієї мети, мають ряд суттєвих недоліків або призначені для секцій і котушок трансформаторних обмоток, але не машинних.

Запропонований спосіб визначення місця замикання між двома паралельними гілками трансформаторних обмоток покладено в основу розробки пристрою, призначеного для знаходження місця виткового замикання саме в розрізних секціях обмоток електричних машин. Пристрій складається з пристрою генерації синусоїдальних коливань і індикатора, що представляє собою багатокаскадний підсилювач змінного струму, на вхід якого підключений індукційний датчик.

Основні недоліки цього пристрою наступні:

1. Незадовільна робота індикатора при виникненні електричної дуги в місці ослабленою виткової ізоляції перевіряється секції. Це пояснюється тим, що при нестійкому горінні дуги змінюється струм, що протікає по короткозамкненими контуру, а, отже, змінюється ЕРС в датчику, що призводить до безпорядочному зміни показань індикатора, що не дає можливості впевнено визначити місце дефекту виткової ізоляції.
2. Чутливість індикатора непостійна: залежить від того, які витки секції замикають (крайні, ближче розташовані до датчика; крайні, віддалені від датчика і середні витки).
3. Потрібне ретельне екранування індукційного датчика та вимірювальної схеми індикатора.
4. Застосований в цьому пристрої спосіб подачі випробувального напруги (одночасно на всі пари витків) створює несприятливі умови для роботи індикатора через ємнісних струмів між неушкодженими витками випробовуваної секції.
5. Порівняльна складність і громіздкість пристрою генерації і індикатора.

Усунення зазначених вище недоліків відомого пристрою досягнуто шляхом застосування в якості випробувального напруги імпульсного з крутим фронтом і частотою слідування імпульсів 50 імпульсів/сек, яке по черзі подається на кожну пару сусідніх витків перевіряється секції. Крім того, індукційний датчик виконаний у вигляді індуктивних котушок жорстко

пов'язаних, рівномірно намотаних кожна на феритових кільцях з повітряним зазором, з'єднаних між собою відповідно до і розташованих паралельно бічних гранях по обидва боки контрольованої секції.

Індуктивні котушки датчика І.Д. виставляються площинами феритових кілець паралельно бічних гранях секції (паралельно витків), а повітряні зазори кілець - на рівні середньої лінії витків. Застосування феритових кілець в якості магнітопроводів котушок значно знижує відношення електричних перешкод до корисного сигналу і, завдяки цьому, не потрібно екранування датчика та вимірювальної схеми індикатора.

В результаті використання двох згідно включених індуктивних котушок, розташованих у різних граней секції, забезпечується постійна чутливість індикатора при різних варіантах вітково-вих замикань: замикають або крайні витки з однієї грані або з іншого, або середні. Котушки датчика І.Д. намотані рівномірно по всій довжині феритових кілець. Повітряний зазор в осерді необхідний для того, щоб він був неврайонованим в магнітному стані. Котушки датчика розташовуються саме у бічних граней, що випробовується секції тому, що в цих зонах має місце найбільше різностное поле двох струмів, що мають зустрічний напрямок і протікають по замикаючим між собою витків секції. Причому, це різностное поле визначається в основному струмом, що протікає по дефектному витка, розташованому ближче до однієї з котушок датчика І.Д.

На рис.1.1,а приведена схема пристрою генерації імпульсних напруг ПГІ, використовуваного в описуваному пристрої. В основному це такий же ПГІ, як і застосований для обмоток якорів.

Параметри зарядної ланцюга ПГІ: зарядний опір $R1 = 3000 \text{ Ом}$; зарядна ємність (ємність в ударі) $C = 2,0 \text{ мкф}$. Параметри розрядної ланцюга: розрядний опір $R3 = 30 \text{ Ом}$; фронтовий опір $R4 = 4 \text{ Ом}$.

При вибраних параметрах зарядної і розрядної ланцюгів ПГІ і відсутності виткового замикання в перевіряємій секції напруга на яку випробовують

парі витків є аперіодический імпульс. При замиканні між витками, на які подано напругу від ПГІ, форма і амплітуда імпульсу різко змінюються: фронт стає біліше крутим, тривалість - коротше, амплітуда різко зменшується. Це пояснюється зміною параметрів розрядної ланцюга ПГІ і характеру об'єкта випробування (навантаження ПГІ).

Легко довести саме такий характер зміни форми імпульсу на секції при гвинтовому замиканні шляхом наступного розрахунку. Як відомо, при обраних певним чином параметрах розрядної ланцюга, на виході ПГІ виникає аперіодичний імпульс

$$U = A(e^{-\frac{t_1}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}), \quad (2.12)$$

крутизна фронту якого визначається, головним чином, постійної часу T_2 , а спад - постійної T_1 .

У нормалізованому формі рівняння аперіодичного імпульсу має вигляд

$$y = e^{-\theta} - e^{-\frac{\theta}{\alpha}}, \quad (2.13)$$

$$\text{де } y = \frac{U}{A}; \quad \theta = \frac{t}{T_1}; \quad \alpha = \frac{T_2}{T_1}.$$

При цьому форма імпульсу характеризується відносною довжиною випрямлення фронту $\theta_\phi = \frac{\tau_\phi}{T_2}$, відносною довжиною хвилі $\theta_B = \frac{\tau_B}{T_1}$, відносною амплітудою імпульсу $y_m = \frac{U_m}{A}$.

Вихідними даними для розрахунку є електричні параметри розрядної ланцюга ПГІ. Междувіткова ємність секції, наприклад, обмотки якоря тягового двигуна НБ-4І2К дорівнює $C_{об} = 950$ пФ, а опір замкнутих витків

секції $R_{в.з.} = 0,19 \text{ Ом}$ (при замиканні на відстані $3/4$ довжини витка від місця подачі напруги).

При відсутності виткового замикання

$$T1 = C \cdot R3 = 2 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 60 \text{ мксек} \quad (2.14)$$

$$T2 = C_{об} \cdot R3 = 0.95 \cdot 10^3 \cdot 4 = 3.8 \text{ мксек} \quad (2.15)$$

$$\alpha = \frac{T2}{T1} = \frac{3,8 \cdot 10^3}{60} = 0,063 \cdot 10^{-3}. \quad (2.16)$$

З графіків залежності $\frac{\theta_{\phi}}{\alpha}, \theta_{в}, y_m$ у відношенні до постійних часу $\alpha = \frac{T2}{T1}$ для аперіодичного імпульсу другого порядку при $\alpha = 0,063 \cdot 10^{-3}$ маємо:

$$\frac{\theta_{\phi}}{\alpha} = \frac{\tau_{\phi}}{T_2} = 3,2; \quad (2.17)$$

$$\theta_{в} = \frac{\tau_{в}}{T_1} = 0,69. \quad (2.18)$$

З графіків залежності $\frac{\theta_{\phi}}{\alpha}, \theta_{в}, y_m$, у відношенні до постійної часу $\alpha = \frac{T2}{T1}$ для аперіодичного імпульсу другого порядку $\alpha = 0,063 \cdot 10^{-3}$ маємо:

$$\frac{\theta_{\phi}}{\alpha} = \frac{\tau_{\phi}}{T_2} = 3,2; \quad (2.19)$$

$$\theta_{в} = \frac{\tau_{в}}{T_1} = 0,69. \quad (2.20)$$

Отже, імпульс на виході ПГІ має довжину випрямлення фронту

$$\tau_{\phi} = 3,2 \cdot 3,8 \cdot 10^{-3} = 0,0122 \text{ мксек} \quad (2.21)$$

И довжину хвилі

$$\tau_{\text{в}} = 0,69 \cdot 60 = 41,4 \text{ мксек} \quad (2.22)$$

При замиканні між витками перевіряється секції міжвиткова ємність шунтується, а розрядний опір ПГІ дорівнює

$$R = \frac{R3(R4 + R_{\text{в.з}})}{R3 + R4 + R_{\text{в.з}}} = 3.67 \text{ Ом.} \quad (2.23)$$

Постійна часу T2 при цьому дорівнює нулю. Постійна часу T1 визначається тепер як:

$$T1 = C \cdot R = 2 \cdot 10^3 \cdot 3,67 \cdot 10^{-3} = 7,34 \text{ мксек} \quad (2.24)$$

$$\alpha = \frac{T2}{T1} = 0. \quad (2.25)$$

Для $\alpha = 0$ по графікам залежності $\frac{\theta_{\phi}}{\alpha}$, $\theta_{\text{в}}$, $y_{\text{м}}$, від α

$$\theta_{\text{в}} = 0,69 \text{ и } \frac{\theta_{\phi}}{\alpha} = 3,2. \quad (2.26)$$

Довжина спрямленого фронту $\tau_{\phi} = 3,2 \cdot 0 = 0$, тобто виникає імпульс з нескінченно крутим фронтом.

Довжина хвилі $\tau_v = 0.69 \cdot 7.34 = 5.1$ мксек.

Зменшення амплітуди імпульсу на замкнутих витках секції пояснюється перерозподілом напруги між опорами R4 і Rв.з.

Таким чином, результати розрахунку добре узгоджуються з формами імпульсів на секції як для бездефектної секції, так і при витковому замиканні.

На підставі наведеного розрахунку можна зробити висновок про те, що при прийнятих параметрах розрядної ланцюга ПГІ і практично можливих значний міжвиткової ємності і величини опору контуру, що утворюється при витковому замиканні, імпульси ПГІ мають досить крутий фронт як для бездефектної секції, так і при витковому замиканні. А крутизною фронту визначається чутливість індикації до пробойів виткової ізоляції через великі перехідні опори. Оцінити цю чутливість можна наступним розрахунком.

Еквівалентна частота фронту $f_{\text{экв}}$ імпульсу на бездефектній секції може бути визначена за відомим виразом

$$f_{\text{экв}} \approx \frac{1}{2 \cdot t_m}, \quad (2.27)$$

Де t_m - тривалість максимуму фронту хвилі, мксек.

Для секцій обмоток якорів тягових двигунів $t = 0,5 - 1$ мксек при зазначених вище параметрах розрядної ланцюга ПГІ. Тоді частота еквівалентної синусоїди

$$f_{\text{экв}} = \frac{1 \cdot 10^3}{2 \cdot 1} = 500 \text{ кГц}. \quad (2.28)$$

Для секції якоря НБ-4І2К ємкісний опір між парою сусідніх витків становить при цьому

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{экв}} \cdot C_{\text{об}}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 10^6 \cdot 950 \cdot 10^{-12}} = 336 \text{ Ом.} \quad (2.29)$$

Тобто завдяки високочастотній складовій фронту імпульсу випробувальної напруги, чутливість індикації пробою виткової ізоляції може бути реалізована досить високою: кілька сот Ом.

При відсутності виткового замикання в перевірній секції в датчику індикатора наводиться ЕРС, обумовлена ємнісним струмом в міжвиткової ізоляції випробовуваної секції і передана через ємнісний зв'язку датчика І.Д. і секції. У вхідному ланцюзі індикатора формується вхідна напруга $U_{\text{вх}}$, що представляє собою затухаючі коливальні імпульси з невеликим рівнем негативної частини. Частота цих коливань не дорівнює основній гармоніці імпульсного напруги на секції, а визначається параметрами індукційного датчика: ємністю і індуктивністю. При цьому транзистор Т вимірювальної схеми індикатора працює як відділювач: не пропускає позитивні піки вхідної напруги $U_{\text{вх}}$ і підсилює негативні.

Витковое замикання в яку випробовують секції обумовлює магнітну передачу імпульсу в індукційний датчик індикатора. Тому тривалість позитивної частини імпульсів в секції і в датчику індикатора, на вході вимірювальної схеми, $U_{\text{вх}}$ приблизно однакові.

Вхідний імпульс $U_{\text{вх}}$ індикатора містить негативну частину, що має значно більшу тривалість, ніж позитивний пік (приблизно в 50 разів) і в такому вигляді не відповідає індукуючій формі напруги.

Із аналізу форм імпульсів на вході $U_{вх}$ і виході $U_{вих}$ схеми індикатора видно, що стан транзистора різко змінюється від замкненого до насиченого, тобто схема працює в режимі ключа з глибоким насиченням. Тому при виникненні електричної дуги в місці ослабленою виткової ізоляції випробовуваної секції показання індикатора не змінюються, так як зміна амплітуди індуктірованої в датчик І.Д. ЕРС при нестабільному горінні дуги не впливає на стан ключа: транзистор залишається і в цьому випадку відкритим.

Форми імпульсів вхідної і вихідної напруг в схемі індикатора відповідають одному і тому ж значенню випробувальної напруги. З порівняння форм напруг $U_{вих}$ їх середнє значення за період проходження імпульсів (50 імп/сек), яке визначається в основному тривалістю вихідної напруги, для бездефектної секції більш ніж в 10 разів менше, ніж в разі виткового замикання. Такої чутливості цілком достатньо для виявлення виткового замикання в секції, яка випробовується необхідною по амплітуді напругою (в нашому випадку порядку 1 кВ.імп) конкретного місця (точки) дефекту виткової ізоляції секції здійснюється наступним чином. Висновки витків випробовуваної секції вставляють в контактну колодку ППІ, з'єднану через перемикач П з виходом. Датчик І.Д. розташовують поблизу висновків витків, де подається випробувальну напругу. Подаючи черзі напруга на кожну пару сусідніх витків за допомогою перемикача П, положення якого відповідають порядковим номерам пар витків секції, за максимальними показниками індикатора знаходять замикають між собою витки: як металеві замикання, так і пробую ізоляції через електричну дугу. Далі, переміщаючи датчик І.Д. по периметру випробовуваної секції знаходять місце, де показання індикатора різко падають до нуля, тобто припиняється протікання розрядного струму ППІ по замкнутих між собою витків. Це положення датчика щодо секції і буде відповідати місцю дефекту виткової ізоляції.

При відсутності імпульсної напруги або подачі його на пару витків, які не мають між собою замикання, показання індикатора майже дорівнюють нулю.

Практична необхідність в описаному вище пристрою очевидна: завдяки точному знаходженню дефекту виткової ізоляції полегшується і прискорюється ремонт дефектної секції. При цьому економиться дорогий ізоляційний матеріал корпусної ізоляції, так як для усунення дефекту виткової ізоляції досить зняти корпусні ізоляцію тільки в зоні дефекту або переізолювати тільки одну ділянку пазової або лобовій частині з місцем виткового замикання.

Індикація виткового замикання в полюсних котушках електричних машин постійного струму. Найбільш складним і важливим питанням в методах імпульсних випробувань виткової ізоляції котушок є індикація пошкоджень ізоляції. Створення необхідних величин випробувальних міжвиткових напруг не зустрічає труднощів при імпульсних методах особливо для маловиткових котушок. Котушки головних, додаткових полюсів і компенсаційні котушки потужних тягових двигунів електровозів мають невелике число витків (4-50) і є зазвичай одношаровими.

Відомі ряд вітчизняних і зарубіжних розробок призначених для випробування і виявлення дефектів виткової ізоляції котушок електричних машин. Однак далеко не всі з них можуть застосовуватися для полюсних котушок тягових двигунів електровозів в силу специфічності конструкції і особливостей випробувань при масовому виробництві їх.

У всіх зазначених установках застосовується або метод випробування індукованою імпульсною напругою або випробування при безпосередній подачі імпульсної напруги на кінці котушки. Причому, в останньому випадку є кілька варіантів, викликаних застосуванням того чи іншого методу індикації пошкодження виткової ізоляції. До числа цих варіантів відносяться: мостовий метод; метод порівняння повних опорів.

Однак усім цим установкам і методам індикації виткового замикання властиві істотні недоліки стосовно до масового виробництва і ремонту електричних машин, наприклад, в області електровозобудування. Досить важкі полюсні котушки (вагою 90-100кг). І у великій кількості (кілька сотень в зміну)

вкрай незручно випробовувати індукованою імпульсною напругою, так як при цьому потрібно додаткові операції по установці індуктора на яку випробовуній котушці, на що йде багато часу. Методи порівняння двох випробовуваних котушок незручні і менш продуктивні тому, що для процесу випробування потрібні дві котушки або постійна наявність зразковою котушки. Але при великій різноманітності типів випробовуваних котушок потрібно багато зразкових котушок, які з плином часу самі можуть опинитися дефектними, що призведе до пропуску браку.

Ті ж недоліки відносяться і до мостовим методам випробування. Істотним недоліком методу випробування при безпосередній подачі напруги на висновки, що випробовується котушки і здійснення індикації виткового замикання зі зміни форми кривої випробувальної напруги на екрані електронно-променевої трубки [3] є незручність через великого розмаїття типів котушок та видів виткового замикання (металеве виткове замикання, пробій через електричну дугу, замикання середніх або крайніх витків котушки), а, отже, через великого розмаїття форм кривих на екрані електронно променевої трубки.

Для підвищення чутливості, чіткості і однотипності індикації на яку випробовують котушці формують імпульси, тривалість негативної неробочої частини яких значно більше тривалості позитивної робочої частини, а індикацію здійснюють зі зміни негативної неробочої частини імпульсів за показаннями стрілочного індикатора.

Частота проходження імпульсів 50 імпульсів/сек. Величина імпульсного випробувальної напруги між витками випробовуваної котушки може бути отримана порядку 350 - 1000 В на виток і більше в залежності від числа витків в котушці яку випробовують і необхідної для задовільної індикації величини обмежує опори R_3 розрядних ланцюга ППІ. Менші величини випробувальних напруг відноситься до котушок з великим числом витків.

Розрядний ланцюг ППІ, що складається з ємності в ударі $C1$, що обмежує опори $R3$ і випробовуваної котушки L може бути представлена схемою заміщення достатньою за кількістю елементів для аналізу основного переходу процесу при розряді ємності C (в схемі заміщення не враховані паразитна індуктивність сполучних, токопроводів і вхідні ємності випробовуваної котушки).

Як відомо з теоритичних основ електротехніки, в початковий момент розряду ємності C в послідовної ланцюжку C - R - L при $t = 0$ має місце рівність

$$[L \cdot di/dt + Ri]_{t=0} = [L \cdot di/dt]_{t=0} = [-U_c]_{t=0} \quad (2.30)$$

Або

$$U_L = -U_c \quad (2.31)$$

Тобто теоретично при будь-якій величині індуктивності котушки імпульсне, пікове значення випробувального напруги на ній залишається незмінним як для бездефектної котушки, так і при винтовому замиканні в ній, що викликає зменшення індуктивності. Практично через наявність паразитного індуктивності токопроводів при сумірності індуктивності випробовуваної котушки і паразитної індуктивності проводів відбувається перерозподіл напруг і на котушці L випробувальна напруга зменшується.

Однак це зменшення незначне особливо для котушок з великим числом витків. Тому застосування пікових імпульсних вольтметрів для індикації виткового замикання в котушках при подібному методі випробування малоефективно через низьку чутливість до виткових замикань. Якщо в деяких відомих пристроях застосовується піковий індикатор, то він швидше за реагує

на зміну середнього за період проходження імпульсів значення позитивної, робочої частини випробувального напруги. Крім того, пікові вольтметри мають похибку: занижують дійсну величину імпульсної напруги при вимірюванні дуже коротких імпульсів. При розряді практично розумною ємності С ПГІ на полюсну котушку тягового двигуна, що має порівняно малу індуктивність (близько 25-180 мкГн), формуються досить короткі імпульси: близько 2 -10 мксек. Тому індикація зі зміни позитивної, робочої частини випробувальних імпульсів при використанні імпульсних вольтметрів, що реагують як на пікове, так і на середнє значення імпульсів, не володіє достатньою чутливістю і чіткістю.

Для полюсних котушок тягових двигунів електровозів які мають невелике число витків і відповідно малу індуктивність можна підібрати параметри розрядних ланцюгів ПГІ таким чином, що на випробовуваній котушці будуть формуватися аперіодичні імпульси з одним переходом напруги через нуль.

Як відомо з теоретичних основ електротехніки, така форма випробувальної напруги на котушці можлива при дотриманні умови

$$R > 2 \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (2.32)$$

для схеми заміщення розрядної ланцюга ПГІ. Оцінимо ступінь зміни негативної неробочої частини імпульсу на яку випробовують котушці при витковому замиканні в ній. Розрахунок зробимо для котушки головного полюса тягового двигуна НБ-412К електровоза. Котушка має 20 витків шини перетином 65 x 2 мм² і намотана на ребро (виток до витка - плазом). Індуктивність котушки (без сердечника) на частоті 1000 Гц дорівнює 180 мкГн, а її індуктивність при витковому замиканні середніх витків зменшується до 36

мкГн. Параметри розрядного ланцюга практичного варіанту ПГІ наступні.
Ємність в ударі $C = 2,0$ мкФ, що обмежує опір $R = 40$ Ом.

З'ясуємо характер розряду ПГІ на випробовувану котушку без виткового замикання

$$2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{180 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-6}}} = 19 \text{ Ом}, < R = 40 \text{ Ом} \quad (2.33)$$

тобто розряд ПГІ аперіодичний з одним переходом напруги на котушці
 $U_{вх}$ через нуль

При витковому замиканні маємо

$$2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{36 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-6}}} = 8,48 \text{ Ом}, < R = 40 \text{ Ом} \quad (2.34)$$

тобто аперіодичний характер розряду не порушується.

Для оцінки ступеня зміни максимальної амплітуди має негативного робочої частини імпульсу на котушці скористаємося відомим виразом для напруги на індуктивності U_L в послідовній ланцюжку С- R - L

$$U_L = L \frac{di}{dt} = \frac{U_0}{2\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} (\alpha_2 \cdot e^{\alpha_2 t} - \alpha_1 \cdot e^{\alpha_1 t}), \quad (2.35)$$

Де

$$U_0 = [U_c]_{t=0} \quad (2.36)$$

$$\delta = \frac{R}{2L} \quad (2.37)$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad (2.38)$$

$$\alpha_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \quad (2.39)$$

Відомо також, що напруга на котушці U_L при

$$t = \frac{\left(\ln \frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)}{\alpha_1 - \alpha_2} = t_m \quad (2.40)$$

тобто в момент максимуму абсолютного значення розрядного струму ПГІ, переходить через нуль, а при $t = 2 t_m$ досягає єдиного максимуму в негативній частині (позитивна полярність імпульсу на котушці вимірюється щодо землі, Поклавши $U_0 = 1$, для бездефектної котушки головного полюса двигуна НБ-4І2К напруга U_L в момент часу $t = 2 t_m$ - максимальна амплітуда негативної частини імпульсу U_L – складе $0,45 [U_L]_{t=0}$ або 45% від максимального випробувального значення позитивної робочої частини імпульсу U_L . При витковому замиканні в випробувальній котушці максимальна амплітуда негативної частини U_L – складе $0,127 [U_L]_{t=0}$.

Таким чином, виткове замикання викликає зменшення максимальної амплітуди негативної частини імпульсу U_L приблизно 3,5 рази, в той час як амплітуда позитивної робочої частини імпульсу U_L змінюється майже

непомітно - на 10-20%. Крім того, тривалість негативної, неробочої частини імпульсу U_L значно більше тривалості позитивної, робочої частини.

Так, у наведеному вище прикладі тривалість позитивного піку для бездефектної котушки дорівнює часу t_m формування максимуму абсолютного значення струму розряду ПГІ і становить 14,2 мксек, в той час як тривалість негативної частини визначається в основному часом розряду ємності в ударі, яке орієнтовно можна визначити за постійною часу розряду ПГІ

$$T = R \cdot C = 40 \cdot 2 = 80 \text{ мксек} \quad (2.41)$$

Тобто чутливість індикації до виткового замикання і по зміні тривалості негативною неробочої частини імпульсів на котушці вище, ніж по зміні позитивної робочої частини (більш ніж в 5 разів в нашому прикладі).

В індикаторі використана схема транзисторного ключа, на транзисторі Т типу р-п-р за схемою з загальним емітером. На вхід ключа (емітер-база транзистора Т) подається частина імпульсного напруги на яку випробовують Катюша-ке L з омичного подільника R4 - R5. Форма вхідної напруги $U_{вх}$ в схемі індикатора подібна формі випробуваної напруги на котушці. Деякі спотворення в основному на фронті імпульсу, зазвичай викликаються омичними дільниками, не істотні для індикації виткового замикання, що здійснюється за зміни негативної неробочої частини імпульсу.

При наявності на вході ключа імпульсу $U_{вх}$ з негативною півхвилею, відповідного відсутності виткового замикання в перевірній котушці L, транзистор входить в насичення. На виході ключа, на його колекторній навантаженні (стрілочному вимірювальному приладі магнітоелектричної системи) формується при цьому імпульс, тривалість якого відповідає тривалості негативної напівхвилі імпульсу на вході ключа $U_{вх}$, в той час як позитивна частина вхідного імпульсу $U_{вх}$ замикає транзистор.

У режимі насичення транзисторного ключа величина амплітуди вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ залишається незмінною для будь-якого типу, котушки що випробовується, а тривалість імпульсу залежить від індуктивності котушки. В даному випадку мається на увазі тривалість, відповідна достатньому для введення транзистора в режим насичення рівнем напруги негативної частини вхідних імпульсів.

Вимірювання середнього за період проходження значення вихідних імпульсів U вих можливо за допомогою розповсюджених мікроамперметрів магнітоелектричної системи, наприклад, типу М-24 на 50 мкА і більше.

З причини того, що шпаруватість Q вимірюваних вихідних імпульсів $U_{\text{вих}}$, що визначається як відношення періоду проходження імпульсів $T_{\text{п}}$ до тривалості імпульсу $t_{\text{и}}$

$$Q = \frac{T_{\text{п}}}{t_{\text{и}}} \quad (2.42)$$

Для усунення коливання стрілки вимірювального приладу індикатора, паралельно приладу включений конденсатор C_2 , що забезпечує квазіпостійну напругу на колекторному навантаженні транзистора. Правильним підбором величини конденсатора C_2 індикатора можна домогтися збільшення середнього значення вимірюваних імпульсів $U_{\text{вих}}$. При замиканні крайніх витків випробовуваної котушки різко змінюється форма випробувальної напруги. Зокрема, різко зменшується амплітуда негативної напівхвилі $U_{\text{вх}}$. Показання індикатора при цьому також різко зменшуються.

Виткове замикання середніх витків випробовуваної котушки викликає зменшення амплітуди негативної напівхвилі практично до нуля (менший за амплітудою імпульс), і, відповідно, зменшуються показання індикатора.

Виявлення наявності виткового замикання в котушках здійснюється наступним чином. Виводи випробовуваної котушки L підключають за допомогою двох виносних затискачів в схемі імпульсного генератора і індикатора. Встановлюють необхідну випробувальну напругу для даної котушки (в залежності від числа витків) і за показаннями приладу та індикатора судять про наявність виткового замикання: максимальні показання відповідають відсутності виткового замикання; показання близькі до нульових (5-10% всієї шкали) відповідають наявності виткового замикання або ослабленого місця виткової ізоляції, що виявляється при випробувальній напрузі. Практична користь даного ізобретевія полягає в надійному і високоефективному випробуванні виткової ізоляції, як з точки зору величин напруги випробування, так і по чутливості індикації виткового замикання на стадії виготовлення до накладення дорогої корпусної ізоляції.

Новий спосіб визначення місця виткового замикання в одношарових котушках

В процесі виробництва і ремонту обмоток електричних машин, зокрема, полюсних котушок тягових двигунів електровозів часто потрібно знайти місце (точку) виткового замикання для того, щоб усунути брак.

Суть запропонованого методу полягає в наступному. На виводи випробовуваної котушки подається імпульсна випробувальна напруга аперіодичної форми з одним переходом напруги через нуль і за допомогою індукційного датчика І.Д. і індикатора досліджується її імпульсне магнітне поле. Для підвищення точності визначення конкретного місця (точки) виткового замикання в одношарових котушках індукційний датчик, орієнтований повітряним зазором магнітопровода уздовж витків котушки, що перевіряється, переміщують по її утворючій і по мінімальному рівню імпульсного магнітного поля (за мінімальними показаннями індикатора) знаходять витки, що замикають між собою, потім, орієнтуючи датчик повітряним зазором поперек витків, переміщують його вздовж замикаючих

витків (уздовж короткозамкнутого контуру) і по максимальному рівню імпульсного магнітного поля (за максимальними показниками індикатора) знаходять конкретне місце (точку) виткового замикання.

Слід тільки вказати, що при витковому замиканні навіть середніх витків випробовуваної котушки на її виводах формуються аперіодичні імпульси з одним переходом напруги через нуль. Однак амплітуда негативної, неробочої частини цих імпульсів незначна. Саме така форма імпульсів забезпечує підвищену точність визначення конкретного місця виткового замикання.

Для бездефектної котушки рівні її імпульсного магнітного поля уздовж твірної (по висоті котушки) максимальні і приблизно однакові: трохи ослаблено поле у країв котушки (у верхніх і нижніх витків). При витковому замиканні рівні поля випробовуваної котушки різко зменшуються і поле стає вкрай нерівномірним через розмагнічуючу дію струму в короткозамкненому витку.

При переміщенні датчика вздовж контура котушки спостерігається два нульових рівня імпульсного магнітного поля (нульових показань індикатора), розташовані по обидва боки короткозамкнутого контуру. Ці нульові рівні поля котушки обумовлені взаємодією двох зустрічних полів: поля основного розрядного струму ПГІ I_1 , що протікає по неушкодженим виткам і поля струму в короткозамкненим контурі I_2 . При розташуванні датчика повітряним зазором на рівні короткозамкнутого контуру поле струму, що проявляється, має зустрічний напрямок по відношенню до поля неушкодженою частини котушки.

Таким чином, переміщаючи датчик уздовж твірної дефектної котушки за двома мінімумами показань індикатора, що охоплює дефектні витки, знаходять короткозамкнений контур.

Орієнтуючи датчик повітряним зазором поперек витків, відбудовуються як від поля неушкодженою частини котушки, так і від поля короткозамкнутого контуру. Показання індикатора при цьому нульові. Однак практично досягти нульових показань індикатора при такій орієнтації датчика можна тільки при

невеликій дезорієнтації (на $5-10^\circ$) датчика від розташування його повітряним зазором строго поперек витків. Така дезорієнтація датчика наближається до випадків знаходження нульових рівнів поля при знаходженні короткозамкнутого контуру. Переміщаючи датчик при зазначеній вище орієнтації вздовж короткозамкнутого контура знаходять зону, де рівень імпульсного поля різко збільшується. Це і буде конкретне місце (точка) виткового замикання. У цій точці короткозамкнутого контуру струм розряду ПГІ І1 і струм короткозамкнутого контуру І2 протікають в одному напрямку по контуру, що утворює котушка. Тому поле, створене в точці замикання струмами І1 і І2, замикаючись по магнітопроводу датчика, індукує в ньому ЕРС, яка призводить до різкого збільшення показань індикатора.

Завдяки використанню імпульсного напруги з крутим фронтом імпульсів виявилось можливим застосування для індикації простої схеми ключа в індикаторі, що не вимагає екранування, так як при цьому відношення корисний сигнал до перешкод досить високо. Крім того, ключова схема (режим) індикатора не реагує на коливання струму в перевірній котушці при виникненні електричної дуги в місці ослабленою ізоляції.

Таким чином, застосування імпульсної напруги аперіодичної форми зі значно подовженою негативною, неробочий частиною і невеликої амплітуди в порівнянні з позитивною робочою частиною імпульсу вдається відбудуватися від поля неушкодженою частини випробовуваної котушки шляхом невеликої просторової дезорієнтації датчика.

Показання індикатора значно більше при тій орієнтації, коли в датчику створюється ЕРС тієї полярності, при якій негативна частина її, відмикає транзистор ключа, відповідає більш тривалого в часі спаду розрядного струму ПГІ або негативній частині імпульсу випробувальної напруги на котушці. Описана вище послідовність дослідження імпульсного поля випробовуваної котушки дозволяє точно визначити конкретне місце виткового замикання.

Висновки по главі 2:

- показано, що доцільно проводити випробування на типових ділянках обмотки. Максимальні міжвиткові піки напруг спостерігаються на відстані $\frac{1}{4}$ та $\frac{3}{4}$ від кінців типових ділянок, що обумовлено накладенням імпульсного фронту і фронтом індукованої напруги.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКОПЛИННИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ЯКОРНИХ ОБМОТКАХ ЗІ ЗРІВНЮВАЛЬНИМИ З'ЄДНАННЯМИ

Розподіл напруги по обмотці двигуна значною мірою залежить від хвилі напруги, нанесеної на обмотку. Цей розподіл не є однорідним у випадку крутих фазових перехідних процесів, оскільки більша частина прикладеної напруги зазвичай концентрується на перших кількох витках обмотки. Високочастотні електромагнітні перехідні процеси можуть бути вивчені з використанням внутрішніх моделей (тобто моделей для аналізу поширення та розподілу падаючого імпульсу уздовж обмоток), а також моделі чорної коробки (тобто моделі для аналізу відповіді двигуна від його вузлів і для розрахунку передачі напруги).

Досвід показує, що перехідні перенапруги є не тільки небезпечними через їх амплітуду, а й через їх швидкість підйому; Тобто часті перенапруги з меншою амплітудою і більш високою швидкістю росту можуть бути настільки ж небезпечними, як перенапруги з вищою амплітудою.

Електромагнітні перехідні процеси завдяки високочастотним хвилям (тобто хвиль з крутим фронтом) широко вивчаються з використанням внутрішніх моделей, які враховують поширення та розподіл падаючого імпульсу уздовж обмоток та моделей терміналів (чорний ящик), які враховують відповідь машини з її вузлів і може також дозволити розрахунок переданих напруг.

Явища розповсюдження хвилі вздовж обмотки можна точно відтворити за допомогою моделі розподіленого параметра та з урахуванням частотно залежних втрат. Хоча моделі, засновані на теорії ліній електропередачі мульти-провідників, успішно використовуються, модель із зосередженими параметрами також може дати адекватні результати для швидких перехідних процесів (до 1 МГц). Тому моделі для високочастотного перехідного аналізу

можуть бути описані як з представленням розподіленого параметра, або як каскад з сегментами зосереджених параметрів.

Взагалі, передбачається, що для високих частот потоки не проникають в магнітопровід, тому відповідно втратами у магнітопроводі можна знехтувати, тобто основна індуктивність вважається як цілком лінійний елемент, оскільки високі частоти досягають зменшення щільності магнітного потоку.

Розподіл напруги уздовж обмотки значною мірою залежить від хвилі напруги, яка прикладається на обмотки. Можна помітити, що при частоті живлення розподіл вздовж обмоток лінійний, але у випадку швидких перехідних процесів більша частина напруги, що подається, розподіляється на перші кілька витків обмотки.

Модель тягового двигуна заснована на синтезованій мережі RLC, яка приблизно дорівнює матриці вхідного вузла фактичного двигуна у частотному діапазоні, що представляє інтерес. Нормальною практикою при моделюванні двигуна як системного компонента є створення зменшеної моделі двигуна, зі збереженням всіх необхідних параметрів. Виклик у створенні надійної зведеної моделі полягає в тому, що, оскільки розмір моделі зменшується, кількість дійсних власних значень також повинна зменшуватися, і це зменшення створює модель, яка насправді менш точна, ніж більш детальна модель. Необхідно враховувати частотну залежність параметрів обмотки на високих частотах. Поверхневі ефекти створюють частотну залежність обмотки та опору магнітопровода через зменшення проникнення потоку.

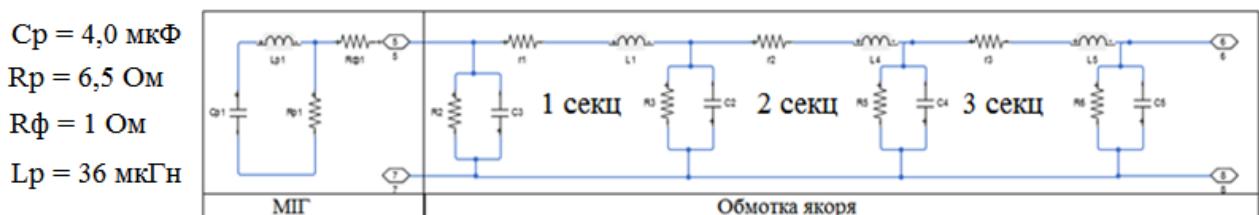


Рисунок 3.1 – П-подібна ланцюгова схема заміщення обмотки якоря змодельована у системному пакеті MatLab Simulink.

Обчислення параметрів високочастотних моделей базується на аналогічних підходах від моделей низьких та середніх частот. Незалежно від моделі, використовуваної для моделювання перехідних процесів двигуна, індуктивні, ємнісні та втрати на активний опір моделі в цілому необхідні для точного опису перехідного процесу високих частот.

Набагато простіше представлення моделі можна отримати шляхом комбінування елементів. Отриману в результаті модель серійного типу можна легко ввести в програму моделювання перехідних процесів (наприклад, MatLab), точність не буде порушена там, де є геометрична однорідність всередині обмотки.

Навіть якщо б були доступні детальні моделі, їх використання дозволило б створити моделі системи занадто великі, щоб вони були ефективним у системних дослідженнях. Нормальною практикою при моделюванні трансформатора як системного компонента є створення моделі зменшеного трансформатора, що представляє термічну модель трансформатора. Проблема у створенні надійної зведеної моделі полягає в тому, що, оскільки розмір моделі зменшується, кількість дійсних власних значень також повинна зменшуватися, і це зменшення створює модель, яка насправді менш точна, ніж більш детальна модель.

Необхідно враховувати частотну залежність параметрів обмотки на високих частотах. Поверхневі та близькі ефекти створюють частотну залежність обмотки та опору основного матеріалу через зменшення проникнення потоку. Необхідно враховувати частотну залежність параметрів обмотки на високих частотах. Поверхневі та близькі ефекти створюють частотну залежність обмотки та опору основного матеріалу через зменшення проникнення потоку.

Обчислення параметрів для моделей високочастотних трансформаторів базується на аналогічних підходах від моделей низьких та середніх частот.

Можна виділити три основні методології: (а) застосування формул з використанням табличних даних та геометрії трансформатора; (b) експериментальне визначення за допомогою лабораторних випробувань; (с) моделювання електромагнітного поля (наприклад, застосування методу кінцевих елементів на основі геометрії).

Незалежно від моделі, використовуваної для моделювання перехідних трансформаторів, індуктивні, ємнісні та компоненти втрат моделі в цілому необхідні для точного опису поведінки на високих частотах. Важливим питанням визначення параметрів для моделей високочастотних трансформаторів є те, що вона вимагає дуже детальної інформації про геометричну конфігурацію трансформатора, яка доступна лише для виробників. Проте, якщо перенапруги, що генеруються в обмотках, не потрібні, параметри можуть бути отримані з кінцевих вимірювань для потрібного діапазону частот. Оскільки це в значній мірі залежить від налаштування вимірювання та відповідної приладів, точне виведення параметрів може бути складним завданням.

Формулювання моделі на основі лінійної передачі для багатоканальної трансформаторної котушки, в області Лапласа може бути виражено за допомогою рівнянь наступним чином:

$$\frac{dI(x, s)}{dx} = -Y(s)V(x, s) \quad (3.1)$$

де Z та Y - $n \times n$ матриці опорів і шунтових допусків на одиницю довжини, де n - кількість провідників (дисків або поворотів); $V(x, s)$ та $I(x, s)$ - це вектори напруг та струмів у точці x обмотки.

Беручи другу похідну рівняння (1)

$$\frac{d^2 V(x, s)}{dx^2} = Z(s)Y(s)I(x, s) \quad (3.2)$$

$$\frac{d^2 I(x, s)}{dx^2} = Y(s)Z(s) \quad (3.3)$$

Застосовуючи модальний аналіз, система може бути представлена наступною матрицею

$$\begin{pmatrix} I_{R(s)} \\ I_{R(s)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & -B \\ -B & A \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{S(s)} \\ V_{R(s)} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Де $I_S(s)$ та $I_R(s)$ є поточними векторами на вихідному та прийому кінця обмотки, $V_S(s)$ та $V_R(s)$ є векторами напруги на відправному та прийому кінця обмотки.

$$A = Y(s)S\gamma^{-1} \cdot \coth(\gamma l) S^{-1} \quad (3.4)$$

$$B = Y(s)S\gamma^{-1} \cdot \operatorname{cosech}(\gamma l) S^{-1} \quad (3.5)$$

S - матриця власних векторів ZY , γ - власне значення ZY , l - довжина обмотки.

Відповідно до схеми, наведеної на рис. 1а, кінець кожної обмотки пов'язаний з початком наступної обмотки, що призводить до зигзагоподібного з'єднання. Це можна визначити наступним чином:

$$V_{ri} = V_{s(i+1)} \quad i_{ri} = -i_{s(i+1)} \quad i = 1 \dots n - 1 \quad (3.6)$$

Опір, з'єднаний у кінці n -го елемента, може бути використаний для подання або нейтрального опору, або залишкової частини обмотки, коли деталізовано моделюється тільки частина обмотки.

Припустимо, що котушка представлена як модель, основана на модулі лінійної передачі для багатоканальної трансформаторної котушки, диференціальна секція якої може мати таку еквівалентну схему. Ця модель може бути зменшена за рахунок скупчення елементів серії всередині витка та шунтового елементів між витками, в якій розглядаються лише ємності між сусідніми витками. Враховуючи зв'язок між витками, один виток може бути представлений як серія взаємоіндуктивних елементів між витками, а також паралельними та серійними ємностями, розташованими. Ємність "Виток до витка" була розподілена паралельно з індуктивністю, тоді як ємність на землю була зосереджена і зменшена вдвічі на кожному кінці витка. Потім котушку можна представити як стільки блоків схеми, скільки є витків. Подальше зменшення порядку можна досягти за рахунок зсуву параметрів в межах моделі котушки. Отримана модель являє собою серію схем з взаємними магнітними з'єднаннями, подібними до того, що зображено, де кожен сегмент представляє кілька витків або навіть повну котушку. Правильний вибір довжини сегмента для моделювання зосереджених параметрів є фундаментальним. Аналіз швидкодіючих перехідних процесів (в порядку сотні кГц), який використовує один сегмент на котушку обмотки, може бути достатнім, тоді як дуже швидкий аналіз перехідних процесів (у порядку МГц) може вимагати розгляду одного сегмента на кожен виток. Тому навіть схема зосереджених параметрів може бути дуже великою і дорогою для обчислювання.

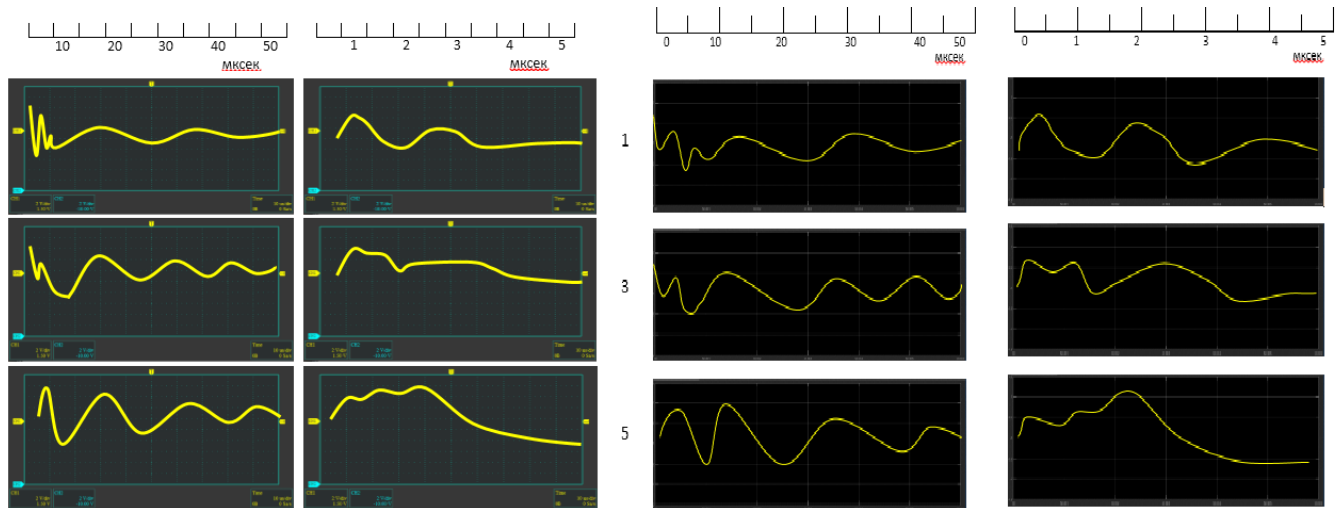


Рисунок 3.3 - Порівняння есперементальних осцилограм з даними отриманими в процесі моделювання без дефекту

Рівняння мережі для схеми, розглядаючи каскадне з'єднання рівних сегментів n можна описати наступним чином:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_i \mathbf{i}(t) &= \hat{\mathbf{C}} \frac{d\hat{\mathbf{v}}(t)}{dt} + \hat{\mathbf{G}} \hat{\mathbf{v}}(t) \\ \mathbf{Q}_v \hat{\mathbf{v}}(t) &= \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}_L(t)}{dt} + \mathbf{R} \mathbf{i}_L(t) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Де $\vec{v}(t)$ вектор напруг вузла, у тому числі вхідний вузол, $\vec{c}$ та $\vec{g}$ - вузлові матриці ємностей і провідностей, $\mathbf{i}_L(t)$ - вектор індуктивних струмів, $\mathbf{L}$ і $\mathbf{R}$ - це матриці індуктивності та опору, а $\mathbf{Q}_v$ та $\mathbf{Q}_i$ - матриці з'єднання напруги вузлів та індуктивних струмів, елементи яких мають значення 1 і -1. Це можна довести, як

$$\mathbf{Q}_i = -[\mathbf{Q}_v]^T \quad (3.8)$$

Рівняння мережі можна переставити шляхом вилучення вхідного вузла k , оскільки його напруга відома. Отже, рівняння можна переписати так:

$$-Q^T i_L(t) = C \frac{dv(t)}{dt} + Gv(t) + C_k \frac{dV_k(t)}{dt} + G_k v_k(t) \quad (3.9)$$

$$P_i v_k(t) + Qv(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} + Ri_L(t) \quad (3.10)$$

де C та G є вузовими матрицями ємностей і провідностей, відповідно, з видаленим k -й рядком і стовпчиком, $v(t)$ - вихідний вектор напруги вузла $n-1$, який залишається після видалення вхідного вузла C_k і G_k є k -ї стовпчиків $\vec{C}$ та $\vec{G}$ без k -го ряду, Q являє собою матрицю зв'язків напруг, які виникають після видалення колонки вхідного вузла, а P - стовпчик Q , що відповідає вхідному вузлу.

Дві різних формули розв'язку рівняння (3.9 і 3.10) докладно описані нижче.

1) Рівняння вузла: використовуючи тотожність $u(t) = v_k(t)$ для напруги вхідного вузла, рівняння (3.9 і 3.10), виражені в домені Лапласа, стають наступними:

$$sCV(s) + GV(s) + Q^T I_L(s) = -sC_k U(s) - G_k U(s) \quad (3.11)$$

$$PU(s) + QV(s) = sLI_L(s) + RI_L(s) \quad (3.12)$$

Вирішення відносно $I_L(s)$ приводить до такого рівняння:

$$\begin{aligned} & sCV(s) + GV(s) + Q^T (R + sL)^{-1} QV(s) \\ &= sC_k U(s) - G_k U(s) - (R + sL)^{-1} \cdot PU(s) \end{aligned} \quad (3.13)$$

які можна переставити наступним чином:

$$I(s) = Y(s) \cdot V(s) \quad (3.14)$$

де $Y(s)$ - матриця узгодження допущення схеми

$$Y(s) = sC + G + Q^T \cdot (R + sL)^{-1} \cdot Q \quad (3.15)$$

$I(s)$ - вузловий вектор струму, заданий

$$I(s) = sC_k U(s) - G_k U(s) - (R + sL)^{-1} \cdot P U(s) \quad (3.16)$$

Поширення напруги вздовж обмотки можна обчислити шляхом вирішення (3.14) для $V(s)$. Тоді часова реакція схеми може бути отримана алгоритмом чисельного перетворення частоти-часу [14].

Вирішуючи рівняння (3.14) для вектора напруги, одержують рівняння для опору:

$$V(s) = Z(s) \cdot I(s) \quad (3.17)$$

де $Z(s) = [Y(s)]^{-1}$.

Припускаючи, що єдиним ненульовим елементом $I(s)$ є елемент рядка, що відповідає вхідному вузлу (тобто, k -й вузол), а рівняння (3.17) для напруг призводить до:

$$\frac{U_j(s)}{U_k(s)} = \frac{Z_{jk}(s)}{Z_{in}(s)} \quad \text{для } j \neq k \quad (3.18)$$

де $Z_{in}(s) = Z_{jk}(s)$ - це вхідний опір обмотки.

Нулі $Z_{in}(s)$ визначають резонанс намотування.

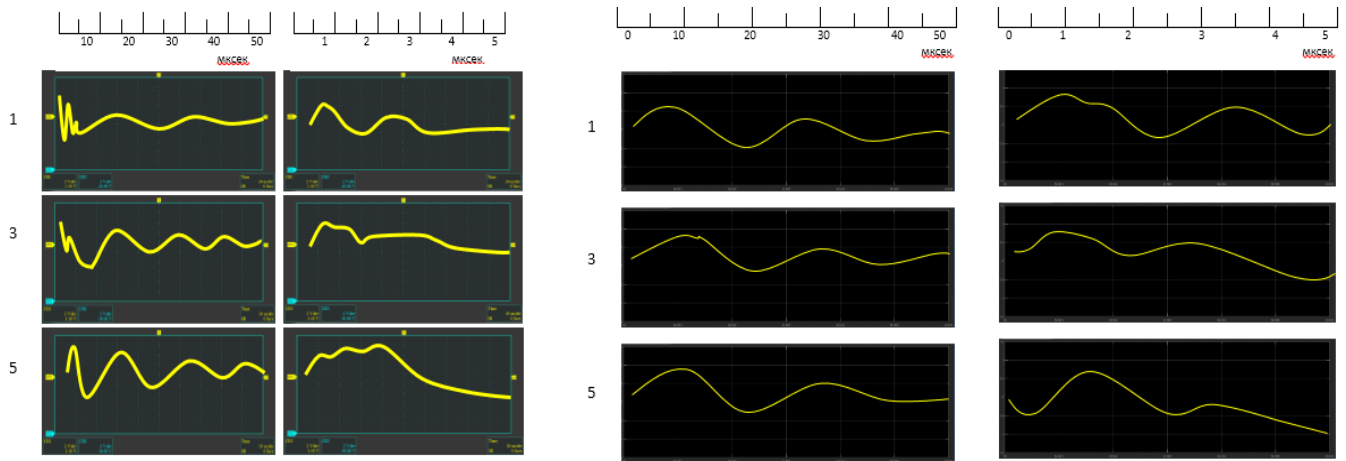


Рисунок 3.2 – Порівняння есперементальних осцилограм з даними отриманими в процесі моделювання з дефектом

2) Рівняння з постійною змінною: відповідно до процедури, представленої в цій главі, змінні стану для схеми, обрані наступним чином:

$$x_1(t) = v(t) + C^{-1}C_k u(t) \quad (3.19)$$

$$x_2(t) = i(t) \quad (3.20)$$

$$x(t) = \begin{matrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{matrix} \quad (3.21)$$

ці рівняння можуть бути переорієнтовані за допомогою умовного формулювання змінної стану:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + du(t) \quad (3.22)$$

$$v(t) = cx(t) + du(t) \quad (3.23)$$

де $x(t)$ - вектор стану, $v(t)$ - вихідний вектор напруг вузла (без вхідної напруги, v_k), і $u(t)$ - прикладена напруга ($= v_k(t)$).

Матриця стану та вектори рівнянь стану (3.22 і 3.23) отримуються наступним чином:

$$A = \begin{bmatrix} -C^{-1} \cdot G & -C^{-1} \cdot Q^T \\ L^{-1} \cdot Q & -L^{-1} \cdot R \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$b = \begin{bmatrix} -C^{-1} \cdot (G_k - G \cdot C^{-1} \cdot C_k) \\ L^{-1} \cdot (P - Q \cdot C^{-1} \cdot C_k) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$c = [U \ 0] \quad (3.26)$$

$$d = -C^{-1} \cdot C_k \quad (3.27)$$

Сукупність рівнянь, заданих у (17), може бути вирішена чисельним інтегруванням або іншими методами чисельної оцінки для рішення матриці просторового переходу. Рішення цих рівнянь просторі можна записати як [27]:

$$x(t) = e^{At}x - \int_0^t e^{A(t-\tau)}bu(\tau)d\tau \quad (3.28)$$

де $x(0)$ - вектор стану при $t = 0$ - і припускається, що він дорівнює нулю.

Вищезазначене вираз $x(t)$ можна аналітично оцінити для простого введення $u(t)$. Після отримання значень змінних стану схеми напруга вузла може бути отримана з рівняння (3.22). Таким чином, цей підхід може бути використаний для отримання розподілу напруги вздовж обмотки та оцінити природні частоти обмотки від власних значень матриці A .

Коли обрано чисельну оцінку, проблема полягає в обчисленні матриці переходу стану e^{At} . Методи, які можуть бути розглянуті, включають: пошук власних значень та власних векторів, отримання розкладу серії e^{At} , пошук полюсів і нулів передавальних функцій.

Висновки по главі 3:

- порівняння розрахункових та експериментальних досліджень. Максимальне відхилення результатів складає 10-12 відсотків, що достатньо для інженерної точності. Встановлено, що максимальні міжвиткові напруги складають від 5 до 10 відсотків від амплітуди випробувального імпульсу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Берштейн Л. М. Изоляция электрических машин общего назначения. Москва, Энергия, 1981.
2. Борисоглебский П. В. Физические основы и методы профилактики промышленной изоляции. Госэнергоиздат, 1949.
3. Скипетров В. В. і Альбицкая О. Н. Электрическая изоляция в условиях тропиков. Электричество, 1957
4. Таран В. П. Диагностирование электрооборудования, Киев, Техніка, 1983.
5. Мамиконянц Л. Г. Контроль влажности изоляции электрических машин и трансформаторов по изменению емкостей их обмоток. Электрические станции, 1945
6. Иерусалимова М. Е. Лабораторный практикум по технике высоких напряжений, Киев, 1977
7. Суворов Н. И. Исследование КП и их влияния на надежность изоляции низковольтных АД. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н., 1973.
8. В. Г. Каганов Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы.
9. З. Г. Каганов Волновые явления в электрических машинах. Новосибирск, 1964.
10. Харлан Г. Д., Прись А. М., Вакуленко К. Н. Частотные характеристики высотных обмоток АД. Электромашиностроение и электрооборудование, Изд. «Техника», Киев, 1974.

11. Electromagnetic Transients in transformer and Rotating Machine Windings. Charles, Q. Su, 2007.
12. *Ю. К. Горбунов*. Высокочастотная диагностика изоляции обмоток электрических машин : автореферат - Новосибирск, 199.
13. *A. BOGLIETTI, E. CARPANETO*(2001). An Accurate Induction Motor High-Frequency Model for Electromagnetic Compatibility Analysis. Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Elettrica Industriale, C.so Duca degli Abruzzi, 24 10129 Torino, Italy.
14. *A. Boglietti; Cavagnino A.; M. Lazzari* (2007). Experimental High-Frequency Parameter Identification of AC Electrical Motors. Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Elettrica Industriale, C.so Duca degli Abruzzi, 24 10129 Torino, Italy.