

УДК 621.316.97

В. М. ЛЯШУК, І. В. ДЕМ'ЯНЮК (ДНУЗТ)

Кафедра Електропостачання залізниць, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 793-19-11, ел. пошта: [lyashuk52@gmail.com](mailto:lyashuk52@gmail.com)

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ МІЖВИТКОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ В ОБМОТКАХ ТЯГОВИХ СУХИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

### Постановка проблеми

В даний час існує обладнання, дозволяюче визначати міжвиткове порушення ізоляції в обмотках сухих трансформаторів постійного струму [1, 2, 3, 4]. Але діагностування передвідмовного стану ізоляції викликає певні труднощі.

### Аналіз досліджень

Пропонується ще один варіант проведення діагностування, заснований на вимірюванні діелектричних втрат в ізоляції обмоток трансформаторів шляхом подачі вимірювальної напруги звукової частоти. На виміри у великій мірі впливає вологість ізоляції, тому необхідно перед проведенням діагностування виміряти її відомими методами [5].

Попередньо проводиться загальна оцінка стану ізоляції обмотки по методиці вимірювання рівня оберненої напруги [6, 7, 8, 9]. Вимірюється опір ізоляції (при опорі менше 40 МОм подальші виміри не проводяться). Аналіз стану ізоляції проводиться по куту нахилу дотичної до початку кривої зміни рівня оберненої напруги до його величини.

Діагностування проводиться шляхом подачі змінної напруги звукової частоти через конденсатор, ємність якого спільно з індуктивністю обмотки трансформатора, при певній частоті, викликає резонанс напруги. Величина випробувальної напруги на два порядки менше робочої. При порушенні ізоляції (збільшення провідності) обмотки трансформатора резонанс може виникнути на іншій частоті або взагалі не наступити. Схема підключення генератора до обмотки трансформатора наведена на рис. 1.

Існує метод, коли паралельно до обмотки трансформатора підключають певну ємність і на отриманий контур подають прямокутний імпульс. За осцилограмою спостерігають характер загасання власних коливань. Якщо спостерігається 5-6 періодів, значить контур високочастотний, а добротність контуру визначається в першу чергу індуктивністю. Для визначення місця короткого замикання застосовуються індуктивні датчики. За схемою побудови індук-

тивні датчики можна розділити на одинарні та диференціальні. Одинарний індуктивний датчик містить одну вимірювальну гілку, диференціальний - дві.

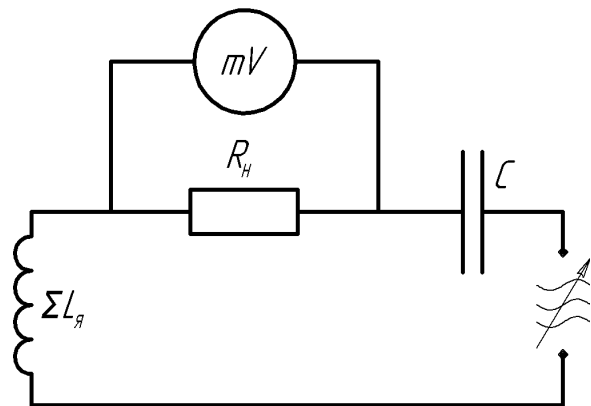


Рис. 1. Схема підключення генератора до обмотки трансформатора  $L_m$

### Постановка задачі

Дослідити і розробити можливі методи діагностування порушення міжвиткової ізоляції обмоток тягових трансформаторів із застосуванням індуктивних датчиків. Місце порушення стану ізоляції, а саме, визначення місця передбачуваного пробою (руйнування) ізоляції знаходиться за допомогою індуктивного датчика.

### Основний матеріал

У диференціальному індуктивному датчику при зміні параметра одночасно змінюються індуктивності двох однакових котушок, причому зміна відбувається на одну і ту ж величину, але з протилежним знаком.

Як відомо, індуктивність котушки:

$$L = \frac{W\Phi}{I} \quad (1)$$

Струм пов'язаний з магніторушійною силою співвідношенням:

$$I = \frac{HL}{W} \quad (2)$$

звідки отримуємо

© Ляшук В. М., Дем'янюк І. В., 2013

$$L = \frac{W^2}{R_M}, \quad (3)$$

де  $R_M = HL / \Phi$  – магнітний опір індуктивного датчика.

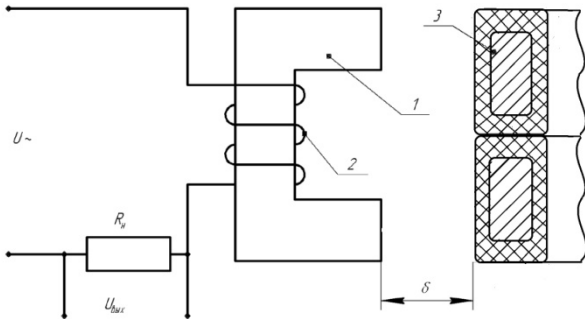


Рис. 2. Використання одинарного індуктивного датчика

Розглянемо систему вимірювання на основі одинарного індуктивного датчика (рис. 2). В основу роботи покладено властивість дроселя з повітряним зазором, а саме, змінювати свою індуктивність при зміні величини повітряного зазору.

Система вимірювань складається з магнітопроводу 1 з обмоткою датчика 2 і обмоткою трансформатора 3. На обмотку 2 через опір навантаження  $R_n$  подається напруга живлення змінного струму. Струм в ланцюзі навантаження визначається як

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_n + r_d) + (\omega L)^2}}, \quad (4)$$

де  $r_d$  - активний опір дроселя;

$L$  - індуктивність датчика.

Так як активний опір кола величина постійна, то зміна струму може відбуватися тільки за рахунок зміни індуктивної складової  $XL = I \cdot R_n$ , яка залежить від величини повітряного зазору  $\delta$ .

Кожному значенню  $\delta$  відповідає певне значення  $I$ , що створює падіння напруги на опорі  $R_n$ :  $U_{\text{вих}} = I \cdot R_n$  - представляє собою вихідний сигнал датчика.

Можна вивести аналітичну залежність  $U_{\text{вих}} = f(\delta)$ , за умови, що зазор досить малий і потоками розсіяння можна знехтувати, і знехтувати магнітним опором заліза  $R_{\text{МЖ}}$  в порівнянні з магнітним опором повітряного зазору  $R_{\text{МВ}}$ .

Наведемо кінцевий вираз

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_n R_n}{\sqrt{(R_n + r_d)^2 + \left(\frac{0,4 \cdot 10^{-8} \mu_0 S W^2 \omega}{2\delta}\right)^2}} \quad (5)$$

У реальних пристроях активний опір ланцюга набагато менший індуктивного, тоді вираз зводиться до вигляду

$$U_{\text{вих}} \approx \frac{5 \cdot 10^8 U_n R_n}{\mu_0 S W^2 \omega} \delta \approx K_d \delta. \quad (6)$$

Залежність  $U_{\text{вих}} = f(\delta)$  має лінійний характер (у першому наближенні) (рис. 3). Реальна характеристика має вигляд (штрихпунктирна лінія (рис. 3)).

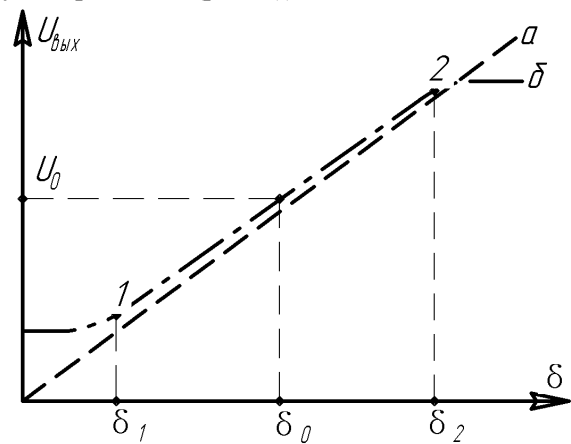


Рис. 3. Характеристика датчика

Відхилення від лінійності на початку пояснюється прийнятим допущенням  $R_{\text{МЖ}} \ll R_{\text{МВ}}$ .

При малих  $\alpha$  магнітний опір заліза сумірно з магнітним опором повітря.

Відхилення при великих  $\alpha$  пояснюється тим, що при великих  $RL$  становиться сумірною з величиною активного опору –  $R_n + r_d$ .

В цілому розглянутий індуктивний датчик має ряд істотних недоліків:

- не змінюється фаза струму при зміні напрямку переміщення;
- при необхідності вимірювати в обох напрямках переміщення потрібно встановлювати початковий повітряний зазор і, отже, струм  $I_0$ , що незручно;
- струм у навантаженні залежить від амплітуди і частоти живлячої напруги;
- в процесі роботи датчика на ярмо діє сила тяжіння до магнітопроводу, яка нічим не урівноважується, і значить вносить похибку в роботу датчика.

Система вимірювань на основі диференціальних індуктивних датчиків (рис. 4) являють собою сукупність двох нереверсивних датчиків і виконуються у вигляді системи, що складається з двох магнітопроводів із загальним ярмом і двома котушками. Для диференціальних індуктивних датчиків необхідні два роздільних джерела живлення, для чого зазвичай використовується роздільний трансформатор 5.

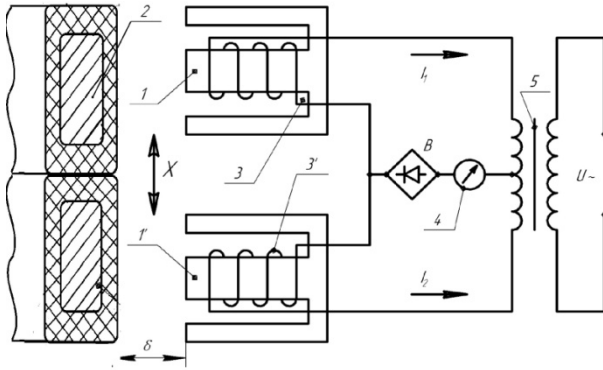


Рис. 4. Диференціальний індуктивний датчик

Диференційно-індуктивні датчики складаються з листів електротехнічної сталі з магнітопроводом Ш-подібної форми (на частотах вище 1000 Гц застосовуються залізонікелеві сплави - пермалой) і циліндричні, з суцільним магнітопроводом круглого перетину.

Вибір форми датчика залежить від конструктивного поєднання його з контрольованим пристроєм.

Для живлення диференційно-індуктивного датчика використовують трансформатор 5 із виведенням середньої точки на вторинній обмотці. Між ним і загальним кінцем обох котушок включається прилад 4. Повітряний зазор 0,2-0,5 мм.

При середньому положенні ярма, коли повітряні зазори однакові, індуктивні опори котушок 3 і 3' однакові, отже величини струмів в котушках дорівнюють  $I_1 = I_2$  і результуючий струм в приладі дорівнює 0.

При невеликому відхиленні ярма датчика в ту або іншу сторону під дією контрольованої величини  $X$  змінюються величини зазорів і індуктивностей, прилад реєструє різницевий струм  $I_1 - I_2$ , він є функцією зміщення ярма, яким, в даному випадку являється магнітопровід трансформатора, від середнього положення (постійна складова). Різниця струмів реєструється за допомогою магнітоелектричного приладу 4 (мікроамперметра) з випрямною схемою В.

Характеристика індуктивного датчика має вигляд (рис. 5).

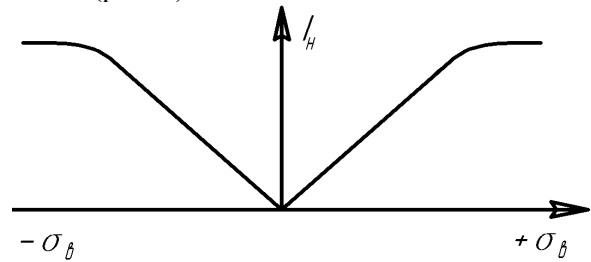


Рис. 5. Характеристика індуктивного датчика  $\sigma_B$

Полярність вихідного струму залишається незмінною незалежно від знака зміни повного опору котушок. При зміні напрямку відхилення ярма від середнього положення міняється на протилежний (на  $180^\circ$ ) фаза струму на виході датчика. При використанні фазочутливих випрямних схем можна отримати індикацію напрямку переміщення ярма від середнього положення. Характеристика диференціального індуктивного датчика з фільтром верхніх частот (ФВЧ) має вигляд (рис. 6).

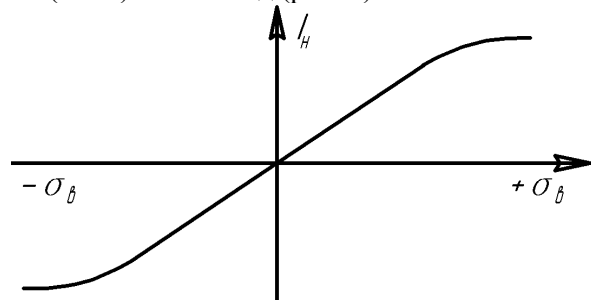


Рис. 6. Характеристика диференціального індуктивного датчика з ФВЧ

Інформативна здатність індуктивного датчика в значній мірі визначається його похибкою перетворення вимірюваного параметра в обмотці ярма  $L_{Я}$ .

Для локалізації місця, де ізоляція має суттєві відхилення діагностичних параметрів, вимірювальну напругу подають на обмотку ярма за певним алгоритмом. Інформацію одержують за допомогою індуктивного датчика рівня електромагнітного поля, який переміщається по окружності в безпосередній близькості від ярма (відстань обмежена товщиною діелектричної прокладки між датчиком і корпусом ярма).

Щоб рівень випробувальної напруги не чинив вплив на проведення вимірювань, використовується мостова схема.

## Висновки

Таким чином, для визначення ступені порушення ізоляції секцій обмоток по запропонованим методам, проводиться неруйнівний контроль стану ізоляції, а саме, визначення місця

передбачуваного пробою (руйнування) ізоляції. Це дозволить запобігти можливості виникнення

короткого замикання, при експлуатації тягових сухих трансформаторів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бессуднов Е. П. Обнаружение мест дефектов изоляции обмоток электрических машин постоянного тока / Е. П. Бессуднов – М.: Энергия, 1977. – 120 с.
2. Каминский М. Л. Проверка и испытание электрических машин / М. Л. Каминский – М.: Энергия, 1977. – 103 с.
3. Сахновский Н. Л. Испытание и проверка электрического оборудования / Н. Л. Сахновский – М.: Энергия, 1975. – 103 с.
4. Бажанов С. А. Профилактические испытания изоляции оборудования высокого напряжения / С. А. Бажанов, В. Ф. Воскресенский – М.: Энергия, 1977. – 288 с.
5. Гончаренко Г. М. Испытательные установки и измерительные устройства в лабораториях высокого напряжения / Г. М. Гончаренко – М.: Энергия, 1966 – 326 с.
6. Боднар Б. Є. Діагностування та прогнозування стану ізоляції обмоток тягових електродвигунів локомотивів / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца, В. М. Ляшук // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2002. – № 6(52). – С. 21–25.
7. Ляшук В.М. Устройство для оценки состояния изоляции обмоток тяговых электродвигателей локомотивов / В.М. Ляшук, Я.Е. Савич, М.И. Капіца //Зб. наук. пр. Київ. ун-ту економіки і технологій трансп. Сер.: Транспортні системи і технології. – К.: КУЕТТ, 2003. – Вип. 1–2. – С. 72–79.
8. Капіца М. І. Як відмовитись від передчасного руйнування ізоляції тягових електричних машин локомотивів під час проведення випробувань / М. І. Капіца, В. М. Ляшук, Д. В. Бобир // Зб. наук. пр. Київ. ун-ту економіки і технологій трансп. Сер.: Транспортні системи і технології. – К.: КУЕТТ, 2006. – Вип. 9. – С. 69–77.
9. Капіца М. І. Неруйнівні методи контролю стану ізоляції електричних машин та високовольних силових кабелів / М. І. Капіца, Д. В. Бобир // Зб. наук. пр. ДонІЗТ. – 2007. – Вип. 12. – С. 127–138.

Надійшла до друку 31.05.2013.

**Ключові слова:** неруйнівний контроль, діагностування, сухі трансформатори, якість ізоляції, індуктивні датчики, генератор звукової частоти, резонанс напруги.

## REFERENCES

1. Bessudnov E. P. Obnaryjenie mest defektov izolyatsii obmotok elektricheskikh mashyn postoyannogo toka [Detecting defects places winding insulation of electrical machines DC]. *Energya* [Energy], 1977, 120p.
2. Kaminsky M. L. Proverka I ispytanie elektricheskikh mashyn [Inspection and testing of electrical machines]. *Energya* [Energy], 1977, 103p.
3. Sahnovsky N. L. Ispytanie i proverka elektricheskogo oborydovaniya [Testing and inspection of electrical equipment]. *Energya* [Energy], 1975, 103p.
4. Bazhanov S. A. Profilakticheskie ispytania izol'yatsii oborydovaniya vysokogo nyaprageniya [Routine tests in isolated high-voltage equipment], *Energya* [Energy], 1977, 288p.
5. Goncharenko G. M. Ispytatelnye ystanovki i izmerytelnye ysstroystva v laboratoriah vysokogo nyaprageniya [Test facilities and instrumentation in the laboratory of high voltage], *Energya* [Energy], 1966, 326p.
6. Bodnar B. E., Kapitsa M. I., Lyashuk V. M. Diagnostyvana ta prognozyvana stany izolyatsii obmotok tyagovykh elektrodvygyniv lokomotyviv [Diagnosis and prognosis of winding insulation locomotive traction motors], *Visnyk Shydneykrainskogo natsionalnogo yversytety im. V. Dyala* [Journal of East Ukrainian National University by V. Dal], Lugansk, 2002, no. 6(52), 21-25p.
7. Lyashuk V. M., Savitch J., Kapitsa M. I. Ystroystvo dlya otsenki sostoyaniya izolyatsii obmotok tyagovykh elektrodvigately lokomotivov [The device for the assessment of the electrical motor winding insulation of traction locomotives], *Zb. nayk. Pr. Kyiv. yn-ty ekonomiki i tekhnologiy transp. Ser.: Transportni systemy i tekhnologii.-K.:KYETT* [Collection. Science. Kyiv Ave. Univ of Economics and Technology transp. August.: Transport systems and technologies. - K. KUETT], Kyiv, 2003.-Vyp.1-2.-72-79p.
8. Kapitsa M.I., Lyashuk V.M., Bobir D.V. Yak vidmovytys vid peredchasnogo rynyvanna izoliatsii tyagovykh electrychnykh mashyn lokomotyviv pid chas provedenna vyprobyvan [How can I stop premature destruction of insulation of electric traction vehicles locomotives during trials], *Zb. nayk. Pr. Kyiv. yn-ty ekonomiki i tekhnologiy transp. Ser.: Transportni systemy i tekhnologii.-K.:KYETT* [Collection. Science. Kyiv Ave. Univ of Economics and Technology transp. August.: Transport systems and technologies. - K. KUETT], Kyiv, 2006.-Vyp.9.-69-77p.
9. Kapitsa M. I., Bobir D. V. Neryinivni metody kontroly stany izoliatsii elektryshnykh mashyn ta vysokovolnykh sylovykh kabeliv [Nondestructive methods for monitoring the insulation of electrical machines and high-voltage power cables], *Zb. nayk. pr. DonIZT., [Collection. Science. DonIZT Ave.]*, 2007, Vyp.12.-127-138p.

Внутрішній рецензент *Костін М. О.*

Зовнішній рецензент *Танкевич Є. М.*

Оцінка фактичного стану силового електрообладнання за результатами діагностичних вимірів є на сьогоднішній день складною і актуальною задачею. Його значна частина виробила свій ресурс, але продовжує експлуатуватися через нестачу фінансових коштів на його заміну. Відповідно з кожним роком зростають витрати на проведення комплексних обстежень і діагностики. Основними причинами відключень, пов'язаних з внутрішніми КЗ, є недостатня стійкість обмоток при КЗ і пробоя внутрішньої ізоляції.

В статті розглянуто методи неруйнівного контролю стану міжвиткової ізоляції обмоток тягових сухих трансформаторів. Розглянуто систему дослідження на основі одинарного індуктивного датчика та диференціального індуктивного датчика.

Для попередження виникнення аварійної ситуації, що тягне за собою важкі пошкодження обмоток трансформатора, бажано визначати місця порушення ізолюючих властивостей обмотки. Це проводиться шляхом аналізу інформації одержуваної з індуктивних датчиків при подачі напруги прямокутної форми на обмотку трансформатора

**УДК 621.316.97**

**В. М. ЛЯШУК, И. В. ДЕМЬЯНИЮК (ДНУЖТ)**

Кафедра Электроснабжение железных дорог, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 793-19-11, эл. почта: [lyashuk52@gmail.com](mailto:lyashuk52@gmail.com)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ОБМОТКЕ ТЯГОВЫХ СУХИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Оценка фактического состояния силового электрооборудования по результатам диагностических изменений является на сегодняшний день сложной и актуальной задачей. Его значительная часть выработала свой ресурс, но продолжает эксплуатироваться из-за недостатка финансовых средств на его замену. Согласно с каждым годом растут расходы на проведение комплексных обследований и диагностики. Основными причинами отключений, связанных с внутренними КЗ, является недостаточная устойчивость обмоток при КЗ и пробоя внутренней изоляции.

В статье рассмотрены методы неразрушающего контроля состояния межвитковой изоляции обмоток тяговых сухих трансформаторов. Рассмотрена система исследования на основе одинарного индуктивного датчика и дифференциального индуктивного датчика.

Для предупреждения возникновения аварийной ситуации, что влечет за собой тяжелые повреждения обмоток трансформатора, желательны определять места нарушения изолирующих свойств обмотки. Это производится путем анализа информации получаемой из индуктивных датчиков при подаче напряжения прямоугольной формы на обмотку трансформатора.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, диагностирование, сухие трансформаторы, качество изоляции, индуктивные датчики, генератор звуковой частоты, резонанс напряжения.

Внутренний рецензент *Костин Н. А.*

Внешний рецензент *Танкевич Е. М.*

**UDC 621.316.97**

**V. M. LYASHUK, I. V. DEMYANYUK (DNURT)**

Department of Power supply of Railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Street, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 793-19-11, e-mail: [lyashuk52@gmail.com](mailto:lyashuk52@gmail.com)

## **RESEARCH METHODS FOR DIAGNOSING MIZHVYTKOVOYI WINDING INSULATION IN DRY-TYPE TRANSFORMERS TRACTION**

Assessment of the actual electrical power as a result Diagnostics is currently difficult and urgent task. He made much of his life, but continues to operate because of lack of funds for its replacement. Accordingly, every year rising costs of comprehensive examinations and diagnosis. The main causes of outages related to the internal circuit is lack of stability in the short-circuit windings and internal insulation breakdown.

The article deals with methods of non-destructive testing of inter winding insulation oil-less traction transformers. It was considered research system based on single and differential inductive sensor inductive sensor.

To prevent an emergency situation involving a serious injury transformer windings, it is desirable to determine a violation of winding insulating properties. This is done by analyzing information obtained from inductive sensors with rectangular voltage is applied to the winding of the transformer.

**Keywords:** non-destructive testing, diagnosis, transformers insulation quality, inductive sensors, audio frequency generator, resonance voltage.

Internal reviewer *Kostin M. O.*

External reviewer *Tankevich E. M.*