

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSIS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 621.313.821

DOI 10.20535/1813-5420.3.2021.251208

В.В. Чумак, канд.тех.наук, доц., ORCID 0000-0001-8401-7931

А.С. Стулішенко, аспірант, ORCID 0000-0001-9982-9246

С.С. Цивінський, канд.тех.наук., ORCID 0000-0002-2800-6709

В.О. Ігнат'єв, магістр, ORCID 0000-0002-2787-6040

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДІАГНОСТИКА ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН З ВИКОРИСТАННЯМ КОМУТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

Ізоляція електричних машин є найбільш вразливою ділянкою в надійності функціонування та експлуатації електричних машин. Існуючі методи діагностики ізоляції не забезпечують якісної перевірки міжжиткової ізоляції обмоток. Існуючий нормативний метод передбачає перевищення номінальної напруги лише на 30%, що може виявити тільки багатозамкнені виткові групи, тому передбачається імпульсний процес в якості розриву постійного струму, що живить обмотку в процесі випробувань і потім аналіз перехідного процесу який свідчить про рівень дефектності, а також створення діагностично-системного модулю, який може забезпечити систему планово-попереджувальних ремонтів.

Ключові слова: електричні машини, комутаційний процес, виткова ізоляція, діагностика обмотки

Вступ. Протягом кількох попередніх десятиліть електромашинобудування розвивалося в напрямку підвищення використання машин, збільшення навантажень активних матеріалів і зниження маси машини на одиницю потужності. Паралельно з цим розроблялися та впроваджувалися нові типи активних, конструкційних та ізоляційних матеріалів, покращувалася вентиляція, з'явилися більш інтенсивні методи охолодження машин. Однак запас міцності, а разом з тим і стійкість до перевантажень поступово знижувалися. В результаті з'явилася тенденція загального зниження надійності електричних машин.

Проблема надійності технічних систем за останні два-три десятиліття різко загострилася, що пояснюється такими об'єктивними причинами:

- різким збільшенням складності технічних систем, що включають сотні тисяч і навіть мільйони окремих вузлів та елементів;
- екстремальністю умов, у яких експлуатується виріб (високі швидкості, значні прискорення, високі температури та тиски, вібрація, підвищена радіація тощо);
- інтенсивністю режимів роботи системи або окремих вузлів (при високих температурах, частотах обертання, тисках, щільності струму тощо);
- підвищенням вимог до якості роботи (висока точність, ефективність тощо);
- збільшенням відповідальності функцій, що виконуються системою, високою економічною та технічною ціною відмови;
- повною чи частковою автоматизацією і, як наслідок, виключенням безпосереднього контролю людиною функціонування системи та її елементів.[1]

Відмови електричних машин можна розділити на конструкційні, технологічні (виробничі) та експлуатаційні. Конструкційні відмови виникають через недосконалість (незнання) або порушення правил проектування та конструювання електричної машини, технологічні - через порушення процесу виробництва або ремонту, експлуатаційні - через неправильне застосування, відсутність захисту,

порушення умов експлуатації електричних машин. Відмови електричних машин можуть бути обумовлені старінням матеріалів та зносом вузлів, а також випадковою концентрацією навантаження, передбачати яку практично неможливо.

Відмови асинхронних двигунів відбуваються через пошкодження обмоток і розподіляються таким чином: перевантаження або перегрів статора електродвигуна - 31%, міжвиткове замикання - 15%, пошкодження підшипників - 12%, пошкодження обмоток статора чи ізоляції - 11%, нерівномірний повітряний зазор між статором і ротором - 9% та ін. [2]



Рисунок 1 - Джерела розвитку пошкоджень в електричних машинах

Причини відмов електродвигунів можна диференціювати так: технологічні - близько 35%; експлуатаційні (головним чином незадовільний захист електродвигунів) - 50% і конструкційні - 15%.

Ушкодження асинхронних двигунів в залежності від потужності показують, що в двигунах:

- невеликої потужності (0,75-50 кВт) найчастіше відбуваються дефекти ротора та підшипників;
- середньої потужності (понад 50 і до 200 кВт) – дефекти статора і ротора;
- для всіх асинхронних двигунів потужністю більше 200 кВт пошкодження статора становлять у середньому 45-55% всіх ушкоджень. [3]

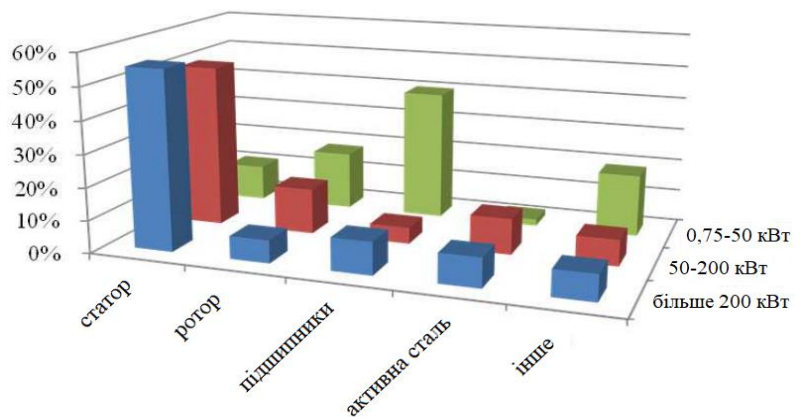


Рисунок 2 - Пошкодження асинхронних двигунів залежно від потужності

Обмотки є найбільш важливою та складною за умовами роботи частиною електричних машин та апаратів. Вихід обмоток з ладу здебільшого обумовлений ушкодженнями ізоляції.

На обмотки і особливо на їх ізоляцію у процесі експлуатації діють електромагнітні сили, вібрація, температура довкілля та інші чинники. Спільна дія перерахованих вище факторів призводить до незворотних процесів зміни структури та хімічного складу ізоляції, тобто до старіння ізоляції. Крім того, в ізоляції можуть бути дефекти, що виникають як у процесі виготовлення матеріалів, з яких складається ізоляційна конструкція електричної машини або апарату, так і при виготовленні самої ізоляційної конструкції. Особливо часто при укладанні обмоток ушкоджується виткова ізоляція, що значно скорочує термін їх служби.

Розвиток дефектів зазвичай призводить до пошкоджень ізоляційних конструкцій в перший період роботи після введення електричних машин в експлуатацію. Як правило, такі ушкодження виникають у вигляді пробоя міжвиткової ізоляції. На надійність роботи обмоток негативно впливає розтяг проводів

при намотуванні котушкових груп на намотувальних верстатах. Цей розтяг може досягати 5-7% довжини проводу. [4]

У процесі роботи на обмотки електричних машин впливають електродинамічні та механічні зусилля, що досягають великих значень при пусках та реверсуванні. Так, пускові струми коротко замкнутих електродвигунів перевищують номінальні в 5-7 разів, в зв'язку з чим на обмотки діють значні електродинамічні сили, значення яких пропорційні квадрату струмів. Під впливом цих зусиль в ізоляції виникають тріщини, і навіть механічні ушкодження.

До зносу виткової ізоляції може призводити тертя між витками і витками об корпусну ізоляцію, що виникає в електричних машинах через різні коефіцієнти теплового розширення міді в обмотках і активної сталі сердечників. Зазвичай таке тертя відбувається під час пуску і роботи, а також при охолодженні після зняття навантаження.

Великий вплив на прискорення процесу старіння ізоляції дає волога. Зазвичай проникнення вологи в ізоляцію обмоток електричних машин відбувається в неробочі періоди, особливо при охолодженні машин, коли тиск у порах та капілярах ізоляції трохи нижче атмосферного. Проникнення вологи викликає гідролітичне руйнування ізоляційних матеріалів, особливо тих що мають волокнисту структуру. Періодичне проникнення вологи в ізоляцію та її видалення підсушуванням під час роботи електричних машин сприяє розвитку пор в ізоляції. При цьому просочення обмоток компаундуєними лаками лише уповільнює процес зволоження та підсушування ізоляції, а не виключає його. Зволоження є однією з головних причин пробою ізоляції обмоток електричних машин, особливо намотаних дротами з бавовняним обплетенням. Волога, що проникає в пори і тріщини, значно знижує електричну міцність ізоляції. Небезпечним є також зволоження забруднених обмоток. При зволоженні різко знижується напруга пробою в місцях дефектів і цим самим створюються умови виникнення дугових розрядів при порівняно низьких значеннях перенапруг. Експериментальні дослідження показали, що при зволоженні обмоток з дефектами в ізоляції, опір ізоляції знижується в кілька десятків разів і при цьому різко збільшуються струми витоків через ізоляцію. У цих випадках через дефекти в ізоляції під дією напруги проходить струм, що руйнує ізоляцію, внаслідок чого виникає коротке замикання між витками обмоток або замикання обмоток на землю. Електричні машини, що мають такі дефекти ізоляції, вимагають заміни обмоток, тобто, капітального ремонту. [5]

Якщо ізоляція не має технологічних дефектів, то під дією температури, вібрації, зволоження, зовнішнього середовища та інших факторів, протягом часу відбувається поступове старіння ізоляції, що виражається в її усиханні, випаровуванні летючих компонентів, втраті еластичності, виникненні пор та тріщин. У найбільш «слабких» місцях ізоляції виникають дефекти, що мають низьке значення напруги пробою. У моменти перенапруг (атмосферних або комутаційних) у місці дефекту виникають іскрові розряди, які повторюються при кожній наступній перенапрузі, значення якої перевищує напругу пробою місця дефекту. Внаслідок дії розрядів пробивна напруга поступово зменшується до того часу, коли у місці дефекту починає виникати дуговий розряд від робочої напруги між витками. У цьому випадку відбувається повне міжвиткове замикання та обмотка електродвигуна виходить з ладу. У зв'язку з тим, що пробивна напруга в місці дефекту після першого пробою досить велика, а перенапруги в витках обмоток досягають значення пробивної напруги не часто, з моменту виникнення дефекту в ізоляції до повного виткового замикання проходить певний час.

Метою даної статті є дослідження комутаційних процесів в обмотках електричних машин для виявлення дефектів в ізоляції обмоток та створення реальної діагностичної системи оцінки якості обмоток.

Матеріали та результати досліджень.

Для проведення досліджень якості ізоляції обмоток електричних машин створено математичну модель в програмному середовищі матлаб-симулінк. Структурна схема створеної моделі представлена на рис.4. Вхідні дані моделі наступні:

Приведені досліди ХХ і КЗ по схемі:

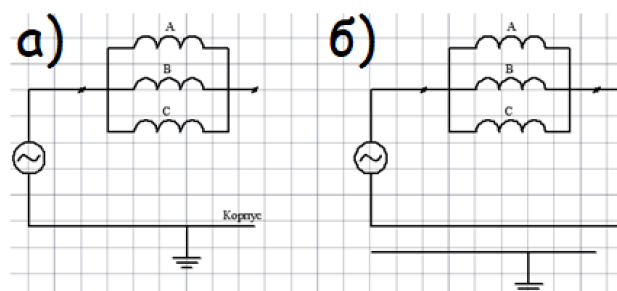


Рисунок 3 – а) схема заміщення для дослідження холостого ходу б) схема заміщення для дослідження короткого замикання

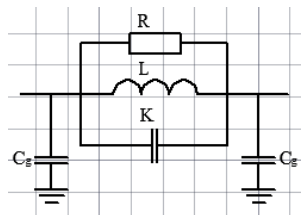


Рисунок 4 - Схема заміщення трьох обмоток:

1) З досліду XX на частоті 1-10 кГц в схемі заміщення по рис. 4 двигун представляє собою ємність $2C_g$. По даним вимірів при $f = 10^4$ Гц $Z_{XX} = 7272$ Ом. Звідси $2C_g = \frac{1}{\omega Z_{XX}} = 2,2$ нФ або $C_g = 1,1$ нФ.

2) З досліду КЗ в точці резонансу $f_0 = 70$ кГц величина $Z_{K3/f_0} \approx R$. $Z_{K3/f_0} = 8750$ Ом звідси $R = 8750$ Ом.

3) Для того щоб визначити K і L знімаєм АЧХ з досліду КЗ по схемі рис. 3(б) з додатковою ємністю $C_{\text{дод}} = 0,1$ мкФ по схемі зображеній на рис. 5

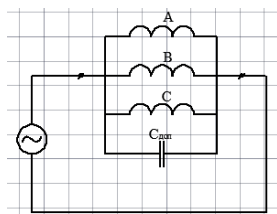


Рисунок 5 – схема заміщення з додатковою ємністю

В випадку без додаткової ємності частота резонансу $f_0 = 70$ кГц. З додатковою ємністю частота резонансу $f_0^{(1)} = 5$ кГц. Звідси отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L(0,5C_g + K)}} \\ 2\pi f_0^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{L(0,5C_g + K + C_{\text{дод}})}} \end{cases}$$

Після вирішення даної системи отримуємо:

$$L = 0,01 \text{ Гн і } 0,5C_g + K = 0,51 \text{ нФ}$$

Так як $C_g = 1,1$ нФ то звідси слідує $K \ll C_g$ і $C_g = 2 * 0,51 = 1$ нФ.

Отримуємо наступні параметри:

$$C_g = 1 \text{ нФ}; R = 8750 \text{ Ом}; L = 0,01 \text{ Гн.}$$

Це результати для трьох обмоток включених паралельно. Для однієї фазної обмотки отримаєм:

$$C_{g\phi} = \frac{C_g}{3} = 0,33 \text{ нФ}$$

$$R_\phi = 3R = 2,64 * 10^4 \text{ Ом}$$

$$L_\phi = 3L = 0,03 \text{ Гн}$$

Вихідні данні

$N=8$; число секцій

$L1=10.4e-3/N$; повздовжні параметри

$R1=16.74e+3/N$; повздовжні параметри

$C1=0.763e-9/N$; поперечні параметри

$RC1=0.0926e6*N$; поперечні параметри

$K=1.452e-9*N$; повздовжні параметри

$tv=1e-6$;

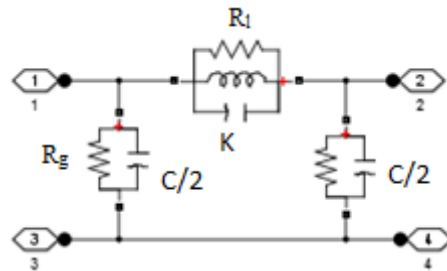


Рисунок 6 - Структура однієї секції обмотки

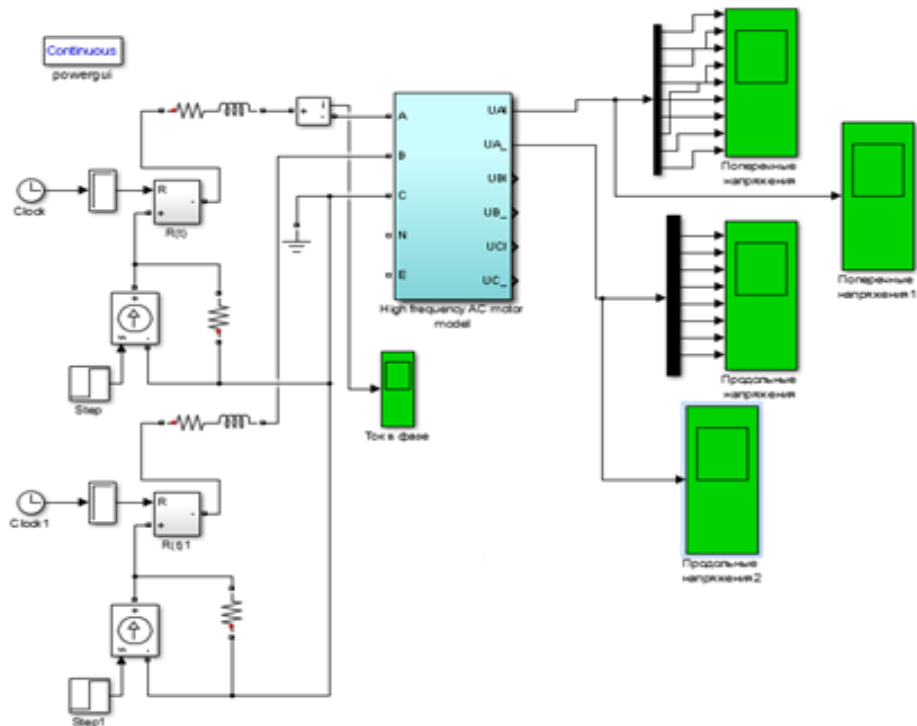


Рисунок 7 - Simulink-модель для дослідження хвилових процесів в асинхронному двигуні

За результатами моделювання отримані осцилограми продемонстровані на рис.8-11.

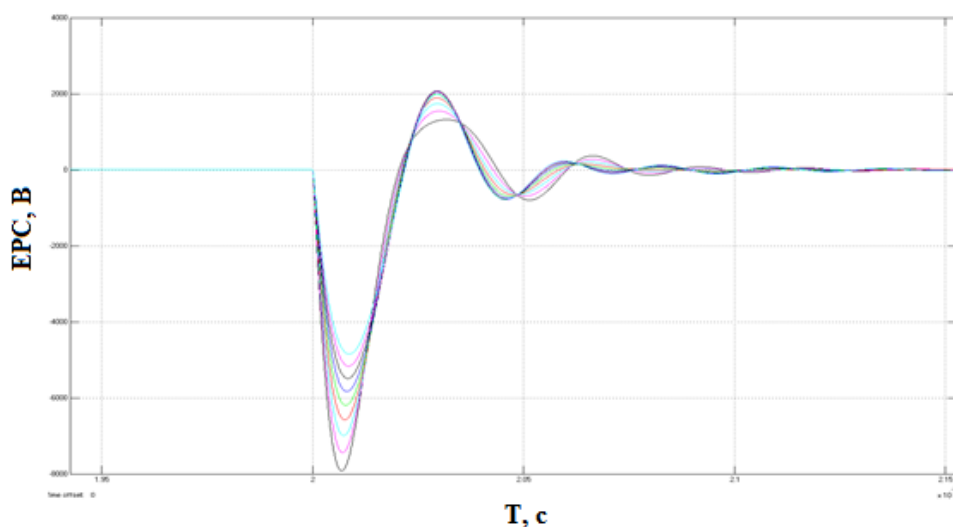


Рисунок 8 – Розподіл у часі поперечних напруг на секціях обмоток

Поперечні напруги свідчать про стан ізоляційної системи через аналіз енергетичних витоків в резонансному колі індуктивності та ємності в обмотці.

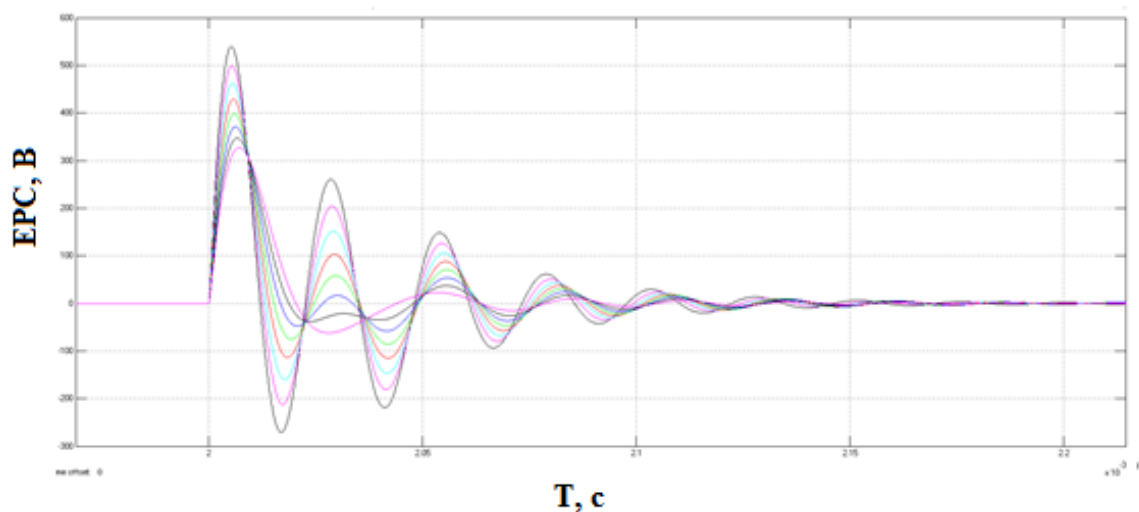


Рисунок 9 - Розподіл у часі повздовжніх напруг на секціях обмоток

Розподіл перенапруг по довжині обмотки свідчить про те, що перехідний процес відбувається в коливальному стані загасанням від початку збудження до периферії. Амплітуда перехідного процесу зменшується від першої ланки до восьмої, що фізично є правильним, тому що розподіл енергії в часі відбувається таким чином, що енергія магнітного кола зменшується до резонансної частоти при взаємодії з енергією електричного кола. [6]

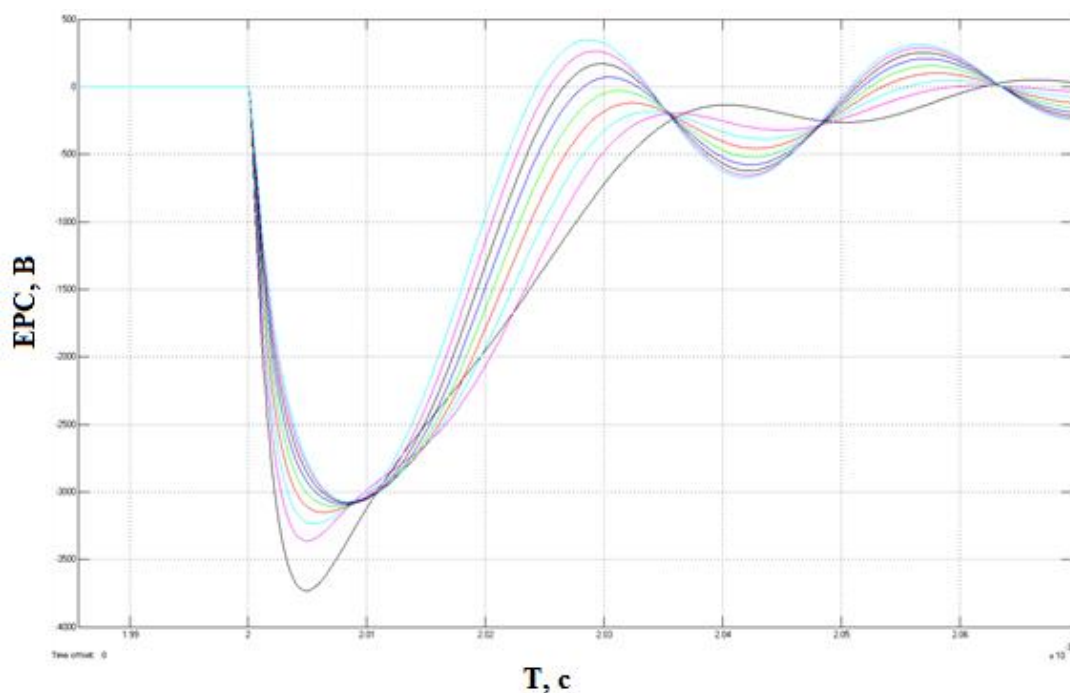


Рисунок 10 - Поперечні напруги. Поперечний опір першої секції зменшено у 100 раз

Зменшення на два порядки поперечної напруги відповідає нормативним вимогам про стан ізоляції але воно не може зменшуватись до значення 0.5 кОм. Цим графіком показано наближення цього стану до нормативної небезпеки.

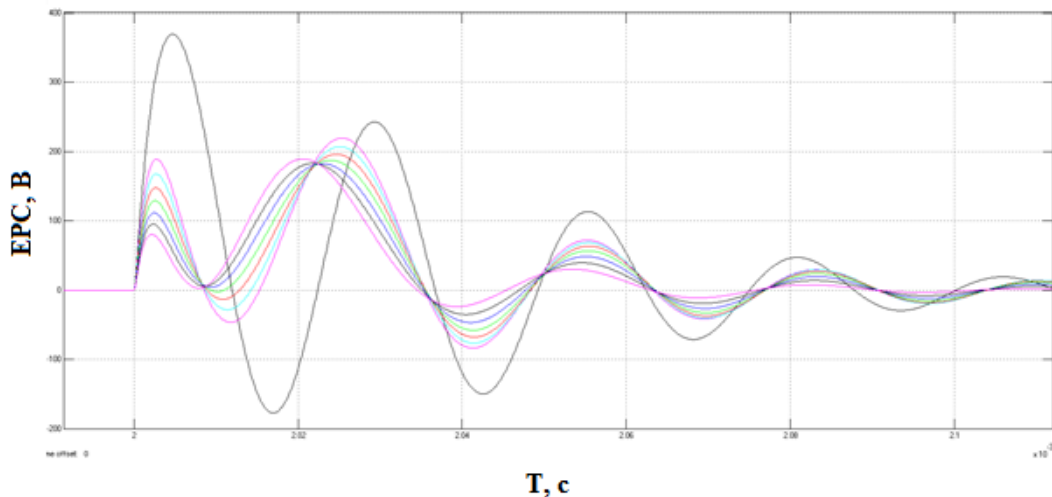


Рисунок 11 - Повздовжні напруги. Поперечний опір першої секції зменшено у 100 раз

Даний графік свідчить про те, що поперечні напруги приходяться більшою частиною на перші витки ізоляції і тому вони є найбільш вразливими тому необхідне таке поняття як координація ізоляції яка передбачає підсилення початкових витків.

Аналізуючи різницю між рис.8 та рис.10 можна зробити наступні висновки що поперечні перенапруги залежать від співвідношення індуктивних та ємнісних залежностей обмоток при цьому вони мають можливість відповідати критеріям діагностики.

Аналіз порівняння повздовжніх характеристик (рис.9 та рис.11) на окремих ділянках обмоток електричних машин при раптовій зміні струму показує характер коливального процесу що залежить від довжини просування хвилі в глибину обмотки. Хвиля зменшується по величині і збільшується по амплитуді коливального процесу. [7]

Висновки. Проаналізовано основні чинники що впливають на якість ізоляції обмоток електричних машин. На базі створеної математичної моделі комутаційних процесів в обмотках електричних машин запропоновано діагностичну систему оцінки якості ізоляції обмоток на базі використання мультифізичних процесів які відбуваються при розриві струму в обмотках електричних машин.

Список використаної літератури

1. Белассел М. Волновые параметры и перенапряжения в различных типах обмоток асинхронных двигателей, питаемых от ШИМ — преобразователей / М. Белассел, В. Я. Беспалов // *Электротехника*. 2006. - №3. - С. 56-63.
2. Воронцов А.Г. Высокочастотные электромагнитные процессы в электрических машинах при широтно-импульсной модуляции напряжения / А.Г. Воронцов, Доан Ань Туан, Ю.П. Коськин и др. // *Электротехника*. 2008. - №3. - С. 36-44.
3. Геллер Б. Импульсные процессы в электрических машинах / Б. Геллер, А. Веверка. -М.: Энергия, 1973. 440 с.
4. Каганов З.Г. Емкостные параметры электрических машин переменного тока / З.Г. Каганов // *Труды ЛПИ им. Калинина*. Л., 1960. - №209. - С. 227-240.
5. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы / З.Г. Каганов. М.: Энергоатомиздат, 1990. - 248 с.
6. A.Boglietti, E.Carpaneto. An Accurate Induction Motor High-Frequency Model for Electromagnetic Compatibility Analysis. *Electric power components and systems*, 2001, V. 29, pp.191-209.
7. Moreira A. F. High-frequency modeling for cable and induction motor overvoltage studies in long cable drives / A.F. Moreira, T.A. Lipo, G. Venkataramanan, S. Bernet // *IEEE Trans. Ind. Appl.*- 2002. Vol.38. - №5. - P. 1297-1306.

V.V. Chumak, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, ORCID 0000-0001-8401-7931

A.S. Stulishenko, graduate student, ORCID 0000-0001-9982-9246

S.S. Tsyvinsky, Candidate of Technical Sciences, ORCID 0000-0002-2800-6709

V.O. Ignatiev, Master, ORCID 0000-0002-2787-6040

National Technical University of Ukraine

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

DIAGNOSIS OF INSULATION OF ELECTRIC MACHINES USING SWITCHING PROCESSES

Insulation of electric machines is the most vulnerable area in the reliability of operation and use of electric machines. Existing methods of insulation diagnostics do not provide quality testing of winding insulation of windings. The existing normative method provides for exceeding the rated voltage by only 30%, which can detect only multi-closed groups, so the pulse process is provided as a DC break that feeds the winding during testing and then analysis of the transient process indicating the level of defect and diagnostic system module, which can provide a system of planned and preventive repairs.

Key words: *electric machines, switching process, winding insulation, winding diagnostics*

References

1. Belassel M. Wave parameters and overvoltages in different types of windings of induction motors powered by PWM - converters / M. Belassel, V. Ya. Bepalov // *Electrical Engineering*. 2006. - №3. - P. 56-63.
2. Vorontsov AG High-frequency electromagnetic processes in electric machines with pulse-width modulation of voltage / A.G. Vorontsov, Doan An Tuan, Yu.P. Koskin et al. // *Electrical Engineering*. 2008. - №3. - P. 36-44.
3. Geller B. Impulse processes in electric machines / B. Geller, A. Squirrel. -M.: Energy, 1973. 440 p.
4. Kaganov ZG Capacitive parameters of electric machines of alternating current / Z.G. Kaganov // *Proceedings of the LPI. Kalinin. L.*, 1960. - №209. - P. 227-240.
5. Kaganov ZG Electrical circuits with distributed parameters and circuit circuits / Z.G. Kaganov. M.: Energoatomizdat, 1990. - 248 p.
6. A.Boglietti, E.Carpaneto. An Accurate Induction Motor High-Frequency Model for Electromagnetic Compatibility Analysis. *Electric power components and systems*, 2001, V. 29, pp.191-209.
7. Moreira A. F. High-frequency modeling for cable and induction motor overvoltage studies in long cable drives / A.F. Moreira, T.A. Lipo, G. Venkataramanan, S. Burnett // *IEEE Trans. Ind. Appl.*- 2002. Vol.38. - №5. - P. 1297-1306.

Надійшла 12.9.2021

Received 12.9.2021