



МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ МІЖВИТКОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН З БАГАТОВИТКОВИМИ КОТУШКАМИ

У даній статті запропоновано алгоритм реалізації способу виявлення короткозамкнених витків в обмотках електричних машин за допомогою частотних методів і оцінки величини вхідного опору на резонансній частоті. Показано, що резонансні явища при відсутності та наявності дефекту у вигляді КЗ витка однієї з трьох фаз обмотки електричної машини мають різний характер при створенні в обмотці штучних резонансів на більш низьких або більш високих частотах порівняно з природним резонансом.

К л ю ч о в і с л о в а: вхідні опори, частотні характеристики, резонансні частоти, дефекти міжвиткової ізоляції, багатовиткові котушки.

Проблема надійності міжвиткової ізоляції обмоток електричних машин є актуальною та потребує створення засобів та апаратури діагностування обмоток, зокрема це стосується обмоток електричних машин з великою кількістю витків там де виявлення одного або декількох КЗ витків є складною задачею і потребує створення і використання чутливої апаратури [1].

Аналіз чутливості до міжвиткових замикань і достовірності контролю міжвиткової ізоляції різноманітних схем підключення обмоток асинхронних двигунів і відомих з літературних джерел і розроблених приладів для контролю міжвиткової ізоляції обмоток електричних машин показує, що найбільш ефективними є методи і прилади, які ґрунтуються на співставленні вхідних активно-індуктивних параметрів обмоток. Найбільш чутливими до міжвиткових замикань є мостові схеми підключення обмоток до джерела дослідної напруги з подальшою обробкою отриманого діагностичного сигналу.

На основі аналізу впливу КЗ витка на активно-індуктивні параметри фаз обмоток асинхронних двигунів і мікродвигунів було запропоновано:

- виявлення КЗ витків слід робити по зміні

добротностей фаз $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{1/L\omega^2}} = \omega \frac{R}{L}$,

оскільки $\omega = 1/\sqrt{LC}$ за рахунок КЗВ на оптимальній частоті $f_{\text{опт}}$, яка відповідає найбільшому впливу КЗВ на активний опір цієї фази. На цій частоті добротність обмотки має максимальне значення, а активні втрати в міді обмотки дорівнюють активним втратам в сталі [2];

- Для отримання максимальної чутливості до міжвиткових замикань дві або три фази обмотки по схемі моста підключаються в коло автогенератора (Рис. 3) і послідовно з індуктивністю L кожної з фаз підключається додатково ємність C такої величини, щоб на частоті $f_{\text{опт}}$ створювався режим резонансу $f_o = f_{\text{опт}} = 1/(2\pi\sqrt{LC})$;

- При підключенні обмоток асинхронних двигунів по схемі моста згідно Рис. 2 на напругу розбалансу моста U_{12} впливає технологічна асиметрія параметрів фаз, при чому основною причиною асиметрії являється ємнісна асиметрія, яка виражається в різниці міжфазних ємностей між вузлами І-3 і 2-3 Рис. 1, а, досягаються в обмотках мікродвигунів до 20%, і яка несе систематичний характер [2]. Тоді якщо міжфазні ємності між вказаними вище вузлами рис. 1а відрізняються на величину ΔC (параметри R_ϕ і L_ϕ визначені з урахуванням міжфазних ємностей при відсутності асиметрії), шляхом еквівалентних перетворень на частоті f_o від схеми Рис. 1, а можна перейти до схеми Рис. 1, б, в якій для еквівалентних значень R і L :

$$\frac{\Delta R}{R} = 6 \frac{\Delta C}{C} \left(1 - \frac{\Delta C}{C} \left(\frac{1}{Q} + \frac{1}{Q^2} \right) \right)$$

Випробування проводилися на такому двигуні: 4А80А4 УЗ; потужність (P) – 1.1 кВт; ковзання s – 6.7%; ККД – 75%; $\cos \phi = 0,81$; $M_{\text{макс}} = 2,2$; $M_{\text{п}} = 2$; $M_{\text{мін}} = 1,6$; $I_{\text{п}} = 5$; ємність між фазою і корпусом (K) – 0,25 нФ; індуктивність обмотки (L') – 31 мГн; опір створений вихровими струмами (r) – 17,49 Ом; опір обмотки – 7,8 Ом;

На Рис. 4 і 5 показані графіки залежності повного опору від частоти вхідної напруги. На Рис. 4 показаний графік залежності повного опору від частоти при включенні двигуна за схемою ХХ, резонанс спостерігається при частоті 72 кГц. На Рис. 5 дослід проведений з дефектом, одним заколюченим витком, відповідно резонанс спостерігається при частоті 78 кГц. Різниця частот між обмоткою без дефекту і обмоткою з КЗ витком складає 6 кГц що є вагомою величиною, яку достатньо просто зафіксувати за допомогою звичайної апаратури. Вхідний опір на резонансній частоті в першому випадку складає 2892,71 Ом а в другому випадку 2447,67 Ом відносна різниця між величинами складає 18.2%, що теж достатньо

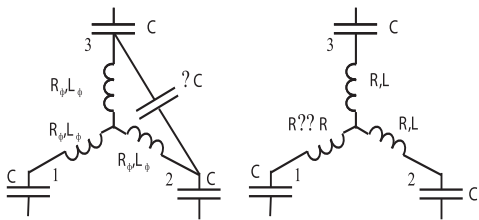


Рис. 1. Схеми заміщення обмотки електричної машини: а – вихідна з ємнісною асиметрією, б – еквівалентна

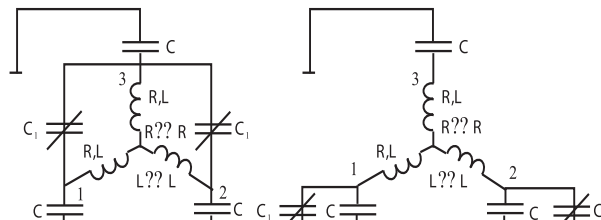


Рис. 2. Схеми компенсації технологічної асиметрії фаз

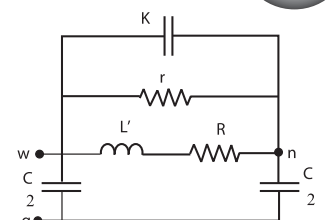


Рис. 3. Запропонована схема кола фази високої частоти

просто визначити за допомогою звичайних пристроїв.

Графіки зображені на (Рис. 4, в, з) також показують залежність $Z(f)$ при вклученні на ХХ, але вже з підключеною на корпус ємністю 4700 мкФ з метою зсуву резонансної частоти в область більш низьких частот. В данному випадку резонансні частоти складають 38 кГц для досліду без дефекту (Рис. 4, в) і 40 кГц для досліду з дефектом (Рис. 4, з), одним закороченим витком. Різниця частот між обмоткою без дефекту і обмоткою з КЗ витком складає 2 кГц, що вже не так помітно, як в наведених вище дослідах. Вхідний опір на резонансній частоті в першому випадку складає 9358,766 Ом а в другому випадку 8838,835 Ом – відносна різниця між величинами складає 5,9%. Отже підключення ємності на корпус не є корисним для визначення дефектів в обмотці.

Наступні досліди були проведені для підключення додаткової ємності 4700 мкФ паралельно до фази двигуна, що дозволило здійснити зсув резонансної частоти в область більш високих частот. Для даного випадку резонансна частота дорівнює 117 кГц для досліду без дефекту і 120 кГц для досліду з КЗ витком, різниця частот також невелика, як і в попередньому досліді, всього 3 кГц. Вхідний опір на резонансній частоті для досліду без дефекту рівний 1223,839 Ом а для досліду з КЗ витком 1178,511 Ом – відносна різниця між величинами складає 3,8%.

Згідно з літературними джерелами встановлено, що до частоти, яка відповідає максимуму

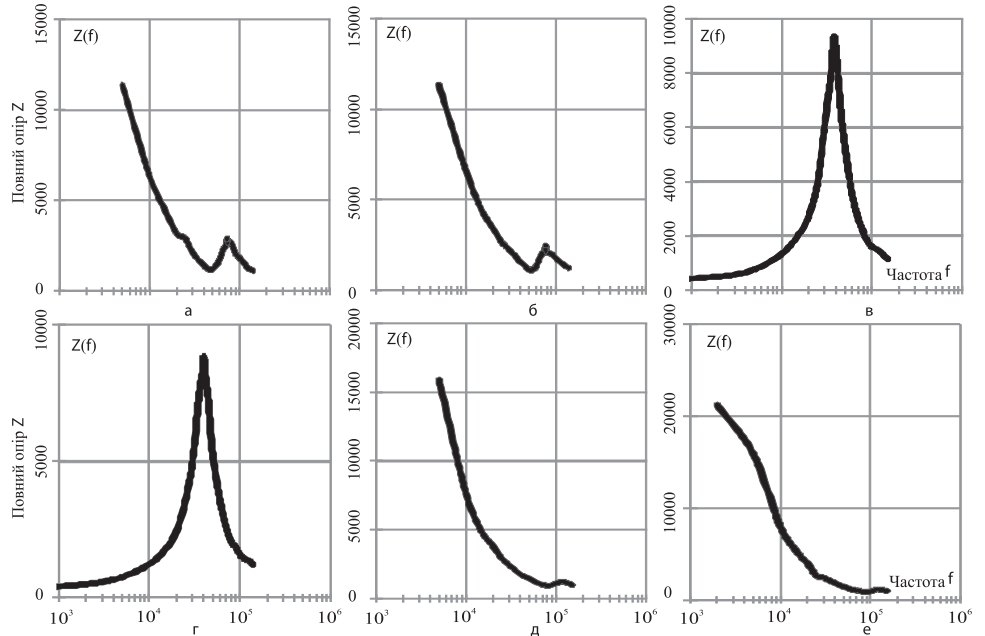


Рис. 4. Графік залежності $Z(f)$ при схемі підключення на ХХ: а – резонанс при частоті 72 000 Гц; б – з дефектом (один виток закорочений), резонанс при частоті 78 000 Гц; в – з додатковим підключенням ємності 4700 мкФ на корпус, резонанс при частоті 38 000 Гц; г – з додатковим підключенням ємності 4700 мкФ на корпус і дефектом (один виток закорочений), резонанс при частоті 40 000 Гц; д – з додатковим підключенням ємності 4700 мкФ паралельно фазі, резонанс при частоті 117 000 Гц; е – з додатковим підключенням ємності 4700 мкФ паралельно фазі і дефектом (один виток закорочений), резонанс при частоті 120 000 Гц

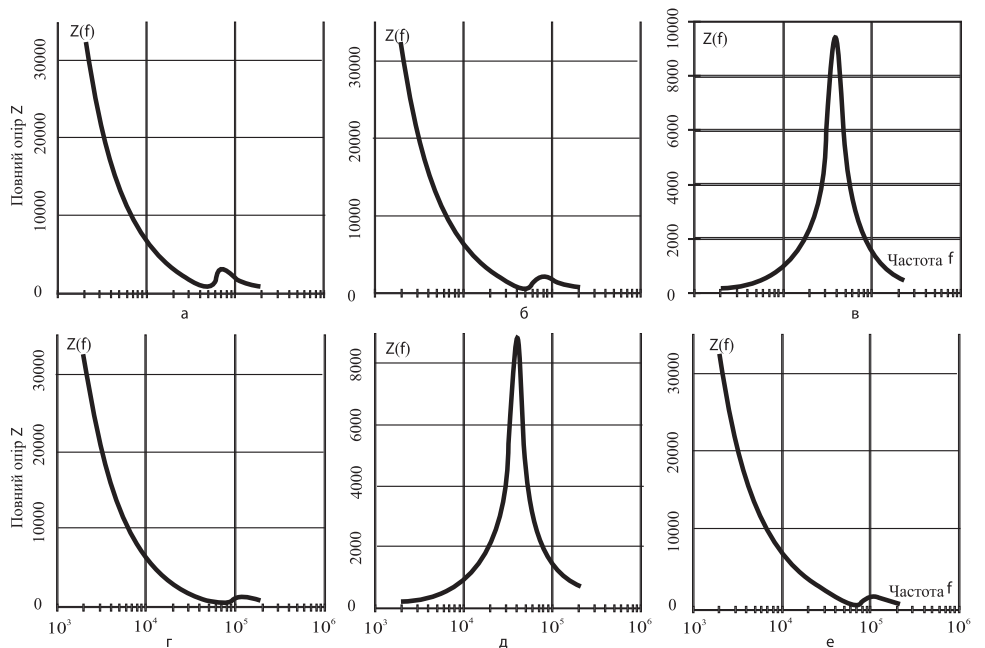


Рис. 5. Змодельований в matlab графік залежності $Z(f)$ при схемі підключення на ХХ: а – змодельований в matlab резонанс при частоті 72000 Гц; б – з дефектом (один виток закорочений), резонанс при частоті 78 000 Гц; в – з додатковим підключенням ємності 4700 мкФ на корпус, резонанс при частоті 38000 Гц; г – з додатковим підключенням ємності 4700 мкФ паралельно фазі, резонанс при частоті 117000 Гц; д – з додатковим підключенням ємності 4700 мкФ на корпус і дефектом (один виток закорочений), резонанс при частоті 40000 Гц; е – з додатковим підключенням ємності 4700 мкФ паралельно фазі і дефектом (один виток закорочений), резонанс при частоті 120 000 Гц.

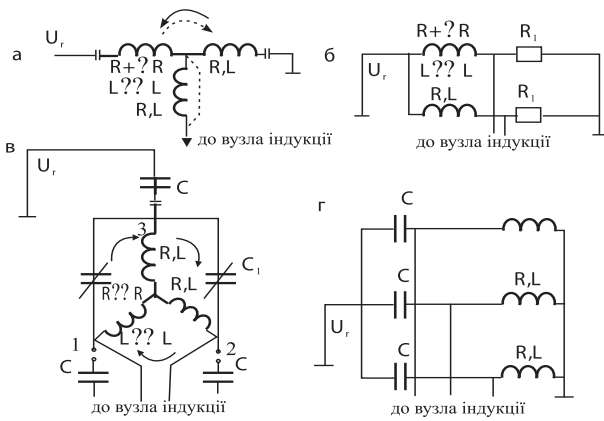


Рис. 6. Схеми виявлення КЗ

добротності, активний опір обмотки в основному визначається активними втратами в міді, а при більш високих частотах — активними втратами в сталі магнітопроводу. Далі було встановлено, що при міжвитковому замиканні за рахунок струму в короткозамкненому витку різко зростають активні втрати в міді витка, що призводить до збільшення загальних втрат в міді обмотки. Одночасно за рахунок розмагнічуючої дії струму в короткозамкненому витку зменшується потік взаємоіндукції між витком і котушкою, що приводить до зменшення індуктивності і активних втрат в сталі магнітопроводу. Проведені дослідження по зміні високочастотних параметрів обмотки при наявності КЗ витка в котушці асинхронного двигуна 4А80А4 УЗ показали, що зменшення індуктивності на 5% і збільшення активних втрат в сталі на 5% відповідають розрахунку високочастотного процесу приведеному на Рис. 5, б, г, д.

Використання частотних характеристик з метою контролю ізоляції багатовиткових котушок електричних машин можливо наступними способами:

- 1) Встановлення резонансної частоти для трьох фаз обмоток і порівняння їх між собою.
- 2) Полягає у встановленні величини вхідного опору кожної з фаз і також в порівнянні їх між собою.

Технологічна асиметрія, викликана недомоткою або перемоткою фази, призводить до приблизно однакової зміни $\Delta R/R$ і $\Delta L/L$. Через це шляхом підключення додаткових ємностей C_1 і C_2 і їх підлаштуванню по схемі Рис. 2, а можна повністю зкомпенсувати ємнісну асиметрію обмотки і тільки частково активно-індуктивну. А при підключенні ємностей по схемі Рис. 2, б активно-індуктивна асиметрія може бути скомпенсована повністю, ємнісна асиметрія лише частково.

На основі аналізу чутливості до міжвиткових замикань і достовірності контролю було встановлено, що апарати типу ЕЛ-І основані на співставленні двох кривих напруг на фазах обмотки двигуна при її комутації по схемі Рис. 6, а, мало чутливі так як до міжвиткових замикань, так і до технологічної асиметрії фаз обмоток.

В відомих з літературних джерел приладах, основаних на мостовому методі контролю виткової ізоляції обмоток через підключення в плечі моста резисторів R згідно Рис. 6, б і використання джерела імпульсної напруги, не забезпечується режим виявлення міжвиткових замикань на оптимальній частоті. Через це чутливість цих приладів до міжвиткових замикань також низька.

Висока чутливість і достовірність контролю виткової ізоляції до відсутності металічних міжвиткових замикань практично в обмотках всіх асинхронних мікродвигунів досягнуті в представленому реєстрі міжвиткових замикань РВЗ-2 і в установках виявлення виткових замикань автоматичною УСКЗВ-5А, працюючих по схемі підключення обмоток, показаних на Рис. 6, в. В цих установках, працюючих в режимі автогенератора за допомогою індуктивності L та ємності C створюється режим резонансу на оптимальній частоті $f_{\text{опт}}$.

Висновок. Досліди показали, що резонансні явища при відсутності та наявності дефекту у вигляді КЗ витка однієї з трьох фаз обмотки двигуна впливають по різному при зсуві резонансної частоти в область низьких частот від природньої резонансної частоти і при зсуві в область високих частот відповідно. Вхідні опори фаз в області частот нижчих від природнього резонансу більше при відсутності дефектів, а при частотах вищих від природнього резонансу менші при відсутності дефектів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. Москва энергоатомиздат 1990. — С 123—128.
2. Горбунов Ю.К. Выхсокочастотная диагностика изоляции обмоток электрических машин : автореферат — Новосибирск, 199. — С 21—25.
3. Boglietti A., Carpaneto E. (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. — С 192—195
4. Boglietti A., Cavagnino A., Lazzari M. (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. — С 23—29.

