

УДК 621.01

ВИПРОБУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

Коваленко І. В.,

Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків, Україна

У статті розглянуті питання можливості проведення прискорених випробувань установок для індукційного нагріву деталей під збирання-розбирання, на підставі яких було б можливо прогнозувати термін служби або спосіб руйнування обладнання.

Ключові слова: індукційний нагрів, прискорені випробування, статистичний аналіз, надійність систем

Постановка задачі. При розробці індукційного устаткування, для забезпечення його надійності, необхідно забезпечити надійність кожної деталі. Джерелами інформації про надійність можуть бути статистичні дані по експлуатації, аналітичні розрахунки і результати випробувань, у тому числі і прискорених.

Нормальні випробування характеризуються режимами, властивими даній машині. Прискорені випробування припускають максимально стислі терміни відтворення умов, відповідних ресурсу машини або регламентованому терміну експлуатації до першого капітального ремонту. Такі випробування можуть приблизно характеризувати надійність машини і значення параметрів в кінці ресурсу. Короткочасність прискорених ресурсних випробувань виключає вплив чинника часу, який у свою чергу, впливає на природне старіння, знос і інші чинники, які виявляються у втраті міцності і працездатності окремих вузлів.

Звично випробування індукційного устаткування проводять по методиках максимально наближених до умов роботи виробу. Проте, у ряді випадків необхідні прискорені випробування з метою якнайшвидшого виявлення наявних дефектів і економії виробничих площ, потрібних для проведення випробувань. Прискорені випробування часто застосовують для скорочення часу, з цією метою вироби випробовують в умовах, жорсткіших, ніж умови їх експлуатації. Для прискорення дії агресивного середовища, залежно від конкретних умов, підсилюють дію того або іншого чинника, що прискорює знос: продувають повітря, підвищують температуру і т.д.

Прискорені випробування великогабаритних об'єктів, до яких відносяться установки для індукційного нагріву під збирання-розбирання, вимагають великих витрат і дозволяють одержати дуже наближені показники надійності. При цьому прискорені випробування часто носять дуже складний характер, ймовірно, найскладнішим з них є циклічне випробування [4].

Найточніші дані вдається одержати при статистичному аналізі експлуатаційних показників устаткування. Відповідно до діючих методик, для експериментального визначення показників надійності необхідне накопичення великого статистичного матеріалу, що вимагає тривалих об'ємних випробувань. Це значно здорожує виробництво і подовжує терміни випуску виробу. Коли

проведення таких випробувань неможливе, то будують фізико-статистичну модель. В цьому випадку фізико-статистична модель повинна мати високу адекватність дійсним процесам, що відбуваються при експлуатації даного виробу.

Основна частина. Надійність систем, які реалізують технології, пов'язані з використанням інтенсивних енергетичних потоків (теплових, електромагнітних) набуває особливого значення, оскільки вони прискорюють процеси старіння. У технологічних системах індукційного нагріву під впливом теплових і електромагнітних потоків знаходиться індуктор – соленоїдна котушка. Котушки виготовляються з покритих ізоляцією мідного дроту або трубки різного перетину, намотуваних в декілька шарів. Вихід її з ладу відбувається унаслідок електричного замикання двох або більш рядом розташованих провідників (витків котушки) через втрату міцності ізоляції. Якщо замикаються витки, розташовані на периферії котушки, то прогорає її зовнішня ізоляція. Таким чином, відмова індуктора – це пробій ізоляційного шару між будь-якими двома витками токопровідника.

Ізоляційний шар є сумою двох ізоляцій витків токопровідника, що знаходяться в контакт, і додатковий прошарок ізоляційного матеріалу, який знаходиться між шарами витків. Відмова відбувається через втрату міцностних властивостей шару унаслідок механічних руйнувань (від вібрацій), викликаних змінним магнітним полем, нерівномірного і циклічного нагріву і охолодження всього індуктора при його не періодичному включенні. Відмова індуктора настає у момент досягнення ізоляційним шаром критичної величини h_k деякого малого майданчика ΔS , достатнього для електричного пробоя між деякими витками котушки [2].

Щоб знайти функцію надійності індукційного нагрівача пропонується використовувати віялову модель втрати міцності того або іншого елемента майданчика ΔS . Вона припускає, що швидкість втрати міцності V є випадкова величина, а набір m швидкостей відповідає кількості елементарних майданчиків ΔS_i , що містяться в ізоляції. Тоді час життя індуктора визначається найбільшою швидкістю втрати міцності майданчика, тобто робочий час життя τ котушки є час першого процесу $h_i(\tau) = V_{it}$ ($i=1,2 \dots m$) досягнення критичної величини h_k : $\tau = h_k / V_{max}$. Оскільки швидкості V_i позитивні і m достатньо велике, то з припущення, що всі V_i незалежні, витікає, що максимальна швидкість V_{max} має другий граничний розподіл

$$P(V_{max} < v) = F(v) = e^{-(\gamma/v)^\alpha},$$
$$V > 0; \gamma > 0; 0 < \alpha \leq 1,$$

де P – вірогідність;

γ - масштабний параметр; α - параметр форми.

Вибір розподілу визначає, як технологія виготовлення індукційної котушки, по якій ізоляція між витками провідників додатково просочується лаком, що обусловлює неоднорідність ізоляції, так і її робота, де за рахунок

вібрації відбувається неоднорідне руйнування ізоляційного шару. При цьому помітимо, що, вибираючи другий граничний розподіл, ми, тим самим, визначилися по гіршому варіанту надійності, що дуже важливе для відповідальних виробів. Звідси функція надійності $l(\tau)$ при $\tau = \min(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m) = h_k/V_{max}$

$$l(\tau) = P(h_k/V_{max} > \tau) = P(V_{max} < h_k/\tau) = e^{-(\gamma\tau/h_k)^{\frac{1}{\alpha}}} = e^{-(\tau/\beta)^{\frac{1}{\alpha}}},$$

де $\beta = h_k/\gamma > 0$ - параметр масштабу.

Функція надійності індукційної котушки має розподіл Вейбулла. Маємо математичну модель безвідмовності котушки індукційного нагрівача у вигляді

$$l(\tau) = e^{-(\tau/\beta)^{\frac{1}{\alpha}}},$$

де $\tau > 0$, $\beta > 0$ и $0 < \alpha \leq 1$.

Випробуванням необхідно піддавати лаковий прошарок ізоляційного матеріалу, який знаходиться між шарами витків. Прискорені випробування лакових покриттів виробів, призначених для експлуатації в районах з помірним кліматом, проводять на дослідних зразках. Після нанесення покриття зразки витримують не менше 7 діб в опалювальному приміщенні, а потім випробовують в камерах по спеціальному режиму [1].

Різкі перепади температур, особливо при нагріванні з'єднань під розбирання, викликають не тільки скорочення терміну служби ізоляції між витками провідників, але і самих провідників. Американське товариство по випробуванню матеріалів провело прискорені випробування [5] на стійкість різних дротів (у тому числі і мідних). Випробування полягали в циклічному нагріванні дроту (2 хв) і охолодженні (2 хв). Поперемінне нагрівання і охолодження помітно скорочує термін служби дроту в порівнянні з постійним нагрівом. Термін служби дроту в цих випробуваннях визначається часом до руйнування або часом до збільшення її електричного опору на 10 %. Відповідно до рівняння Арреніуса, залежність інтенсивності відмови дроту від температури має вигляд

$$\lambda(T) = A \exp\left(\frac{-E}{k_1 T}\right)$$

де A – константа;

k_1 – постійна Больцмана;

E – енергія активації.

Оскільки в індукційному устаткуванні для підвищення електричного КПД ($\cos\phi$) установки, паралельно котушці підключені косинусні конденсатори, то вони також повинні бути піддані випробуванням. Тому при плануванні

випробувань особливу увагу слід приділити конденсаторам. Тривалість роботи під навантаженням для конденсатора з органічним діелектриком залежить крім всього іншого від температури, що виникає в процесі роботи в гарячій зоні конденсатора. Узявши похідну від рівняння Арреніуса (що описує температурнозалежний процес старіння) може бути виведена функціональна залежність тривалості роботи під навантаженням при температурі в гарячій зоні трохи відмінної від максимального значення

$$t_{pt} = t_{mt} \cdot 2 (T_{HS} - T_{hs}) / k_a,$$

де: t_{pt} - тривалість роботи під навантаженням при робочій температурі;
 t_{mt} - тривалість роботи під навантаженням при максимальній температурі;
 T_{HS} - максимальна температура гарячої зони;
 T - робоча температура гарячої зони;
 k_a - коефіцієнт Арреніуса.

Тривалість роботи при робочих напругах може бути передбачена тільки в порівняно вузькому діапазоні напруг ($U=0.9...1.1 \cdot U_R$). Залежність тривалості роботи від робочої напруги може бути приблизно виражена у вигляді статичної функції

$$t_{pU} = t_U (U_R / U)^n,$$

де: t_{pU} - тривалість роботи при робочій напрузі;
 t_U - тривалість роботи при номінальній напрузі;
 U_R - номінальна напруга;
 U - робоча напруга;
 n - показник ступені.

Теплова перевірка заснована на припущенні, що тепло генерується в конденсаторі і передається в навколишнє середовище по поверхні. Можливий місцевий перегрів (погане з'єднання, гарячі компоненти по сусідству, роботи з гармоніками високих частот т.д.) може приводити до раптових відмов або зниження очікуваного терміну служби. У разі виникнення сумнівів повинні бути проведені спеціальні випробування за допомогою термопар, щоб переконатися, що температура гарячої точки не перевищує максимальну навіть для найкритичніших зовнішніх умов.

"Гаряча точка" або місце максимального локального перегріву виходить в результаті тепловиділення і обмеженої теплопровідності з внутрішньої області конденсатора на зовнішню поверхню корпусу. Через обмеження температури органічних діелектриків і прискореного старіння діелектрика із зростанням температури, конструкція довгоживучих конденсаторів розробляється такою, щоб забезпечити незначне перевищення максимальної температури гарячої точки.

Таким чином, ідеальним є, звичайно, випробування в «природному» середовищі, тобто в середовищі, що максимально наближається до експлуатаційного. Проте система лакових покриттів достатньо ефективно

виконує свої функції захисту, і період руйнування в цих умовах стає дуже тривалим. У зв'язку з цим виникає необхідність проводити прискорені випробування, безперервно підтримуючи режим максимальних механічних напруг, змінюючи температуру і вогкість. Хоча за допомогою цих засобів руйнування виникає значно швидше, прискорені випробування можуть викликати руйнування, відмінні від виникаючих в умовах експлуатації, через складний характер процесів нагріву. Таким чином, прогнозування терміну служби або способу руйнування на підставі результатів прискорених випробувань можна вважати обґрунтованим тільки після відповідних уточнень в ході ретельних натурних випробувань.

Висновки. Система випробувань надійності систем індукційного нагріву, що передбачує розробку нормативно-технологічної документації на методи і засоби випробувань, які визначаються основним видом руйнувань, а також на такі методи, як прискорені випробування і технічна діагностика установок припускає широке проведення робіт по уніфікації випробувального устаткування, що дозволить отримати можливість компонувати випробувальне устаткування з уніфікованих елементів агрегатними методами.

Література

1. ГОСТ 27711-88 Лаки пропиточные. Метод ускоренного испытания на нагревостойкость.
2. Коваленко И. В., Романов С. В. Надежность индукционно-нагревательного оборудования для критических технологий и его нормативное обеспечение. – Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький: Технологічний університет Поділля, 2003. – №2.- С.222-226.
3. Кубарев А. И. Надежность в машиностроении, 1977.- 264 с.
4. Олейник Н. В., Скляр С. Н. Ускоренные испытания на усталость. – Киев: Наукова думка, 1985.- 304 с.
5. <http://www.astm.org>

Коваленко И. В.

ИСПЫТАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

В статье рассмотрены вопросы возможности проведения ускоренных испытаний установок для индукционного нагрева деталей под сборку-разборку, на основании которых было бы возможно прогнозировать срок службы или способ разрушения оборудования.

Ключевые слова: индукционный нагрев, ускоренные испытания, статистический анализ, надежность систем

Kovalenko I.

TEST OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS OF INDUCTION HEATING

In the article the questions of possibility of leadthrough of speed-up tests of settings are considered for the induction heating of details under assembling or sorting out, on the basis of which it would be possible to forecast the term of service or method of destruction of equipment.

Keywords: induction heating, accelerated testing, statistical analysis, system reliability

Коваленко Ігор Віталійович

Українська інженерно-педагогічна академія (УІПА), Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Доцент кафедри «Інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва»

Кандидат технічних наук, 05.02.08 – технологія машинобудування. ВАК України, 2005р.

61003, м. Харків, УІПА, вул. Університетська, 16

61153, пр. 50 річчя ВЛКСМ, буд.42, кв. 80, м. Харків, Україна

тел. 733-28-78

igor_kov_2006@ukr.net