

©Коваленко И.В., Романов С.В.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ИНДУКЦИОННО-НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ КРИТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

1. Постановка проблемы

При ремонте некоторых видов изделий, применяемых в гражданской и военной технике, необходимо осуществлять их разборку, сборку или расснаряжение с использованием индукционного нагрева. Если охватываемая деталь соединения – ферромагнетик, то нагрев может быть индукционным в индукционно-нагревательной установке (ИНУ) соленоидным индуктором.

Если установки работают в агрессивных средах или в контакте с взрыво- и пожароопасными веществами, т.е. в реализации критических технологий, то они должны обладать большим запасом надежности, чтобы выход их из строя не приводил к катастрофическим последствиям.

2. Анализ последних исследований

Способы повышения надежности можно разделить на аппаратные и профилактические. К аппаратным относятся избыточное резервирование заведомо слабых, с точки зрения надежности, узлов и блоков оборудования, использование специальной элементной базы с повышенными показателями надежности, введение блокировок в систему управления и элементов визуального контроля ее работы. К профилактическим способам относятся периодический контроль работоспособности оборудования и проведение регламентных работ на нем. Для оборудования критических технологий необходимо использовать оба способа.

Резервирование – очень эффективный способ, однако и дорогостоящий, поэтому, необходимо точно определять те узлы и блоки, надежность которых следует повышать. В некоторых случаях целесообразна полная замена элемента или блока после определенной наработки. К таким блокам относятся те, выход которых из строя приводит к разрушению всего оборудования до такой степени, что оно не подлежит восстановлению вообще, или восстановлению в условиях эксплуатации. Несколько условно такое оборудование объединяют понятием «невосстанавливаемый объект». По ГОСТ 13377-75 невосстанавливаемый объект – это «объект, работоспособность которого при отказе не подлежит восстановлению в рассматриваемой ситуации». Надежность блока должна быть выше всех других, хотя обычно стремятся к обеспечению одинаковой надежности всех элементов оборудования.

3. Основная часть

Исходя из этого, основной задачей обеспечения надежности индукционного оборудования, работающего в критических технологиях, является точное установление срока, в течение которого опасный блок будет находиться в работоспособном состоянии. Для

этого следует выделить некоторый основной тип отказа и рассматривать процесс эксплуатации, как наработку до момента первого отказа. При этом наработка рассматривается как реализация некоторой одномерной случайной величины.

При анализе надежности невосстанавливаемого объекта в части всех его элементов, кроме опасного необходимо рассматривать наработку до отказа. Тогда функция надежности будет определяться как вероятность отсутствия отказа от начала эксплуатации объекта до наработки до некоторого времени. Поскольку ИНУ не имеет механических узлов, то ее надежность в период эксплуатации, можно считать, подчиняется экспоненциальному закону, где интенсивность отказов постоянна и не зависит от величины нарастания. Тогда функцию надежности для каждого i -го элемента системы можно записать так:

$$l_i = e^{-\frac{\tau}{\rho_i}}, \quad (1)$$

где τ – время эксплуатации элемента;

ρ_i – среднее время работы.

Надежность системы, состоящей из последовательных и параллельных элементов:

$$l_c = \prod_{i=1}^n l_i [1 - \prod_{i=1}^k (1 - l_i)], \quad (2)$$

где n – число последовательных элементов системы; k – число элементов в параллельной структуре.

Для ответственных систем главным показателем надежности является не средний ресурс, а γ -процентный, то есть время в течении которого вероятность безотказной работы элемента или системы равняется 95% или 99%. Эта величина устанавливается от $\gamma=0,95$, до $\gamma=0,99$, а для очень ответственных и выше. Для индуктора основным показателем надежности является γ -процентный.

В соответствии с действующими методиками, для определения надежности с удовлетворительной степенью достоверности требуется накопление большого статистического материала. Катушки индукторов являются уникальными элементами и изготавливаются индивидуально. Статистическая информация по ним ограничена, поэтому необходимо построить физико-статистическую модель надежности изделия в условиях недостатка статистического материала.

Выход из строя катушки индуктора происходит вследствие электрического замыкания двух или более рядом расположенных проводников (витков катушки) из-за потери прочности изоляции. Если замкнуть витки, расположенные на периферии катушки, то прогорает ее наружная изоляция, что сопровождается вспышкой пламени. Под отказом индуктора будем понимать пробой изоляционного слоя между любыми двумя витками токопроводника.

Чтобы найти функцию надежности индукционного нагревателя воспользуемся веерной моделью потери прочности того или иного элемента. Она предполагает, что скорость потери прочности V есть случайная величина, а набор m скоростей соответствует количеству элементарных площадок ΔS_i , содержащихся в изоляции. Тогда время жизни индуктора определяется наибольшей

скоростью потери прочности площадки, т.е. рабочее время жизни τ катушки есть время первого процесса $h_i(\tau) = V_1 \tau (i = 1, 2, \dots, m)$ достижения критической величины h_k :

$$\tau = \frac{h_k}{V_{\max}}. \quad (3)$$

Так как скорости V_i положительны и m достаточно велики, то из предположения, что все V_i независимы, следует, что максимальная скорость V_{\max} имеет второе предельное распределение

$$P(X_{\max} < v) = F(x) = e^{-(\gamma/\tau)^\alpha}, \quad \tau > 0; \gamma \neq 0; 0 < \alpha \leq 1, \quad (4)$$

где P – вероятность;
 γ – параметр масштаба;
 α – параметр формы.

Выбор распределения обусловлен так же и технологией изготовления индукционной катушки по которой изоляция между слоями проводников дополнительно пропитывается лаком. Иными словами, существует неоднородность изоляции. Прогноз наибольших значений по второму предельному распределению превосходит прогноз по другим предельным распределениям, что очень важно в дальнейшем для получения функции надежности изделия. Отсюда функция надежности $l(\tau)$ при $\tau = \min(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) = \frac{h_k}{V_{\max}}$ имеет

вид

$$l(\tau) = P\left(\frac{h_k}{V_{\max}} > \tau\right) = P\left(V_{\max} < \frac{h_k}{\tau}\right) = e^{-(\gamma\tau/h)^\alpha} = e^{-(\tau/\beta)^\alpha}, \quad (5)$$

где $\beta = \frac{h_k}{\gamma} > 0$ – параметр масштаба.

То есть, функция надежности индукционной катушки имеет распределение Вейбулла. А так как распределение (5) имеет математическое ожидание $M(T) = \beta\Gamma(1+\alpha)$, и условием сходимости γ -функции $\Gamma(1+\alpha)$ является $0 < \alpha \leq 1$, то в физических задачах $0 < \alpha \leq 1$.

Математическая модель надежности катушки индукционного нагревателя имеет вид

$$l(\tau) = e^{-(\tau/\beta)^\alpha}, \quad (6)$$

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

Поскольку технологический процесс изготовления катушки ведется с контролем, а нагреватель работает в щадящем режиме, то скорость потери прочности изоляционного слоя ограничена сверху – потеря прочности не может произойти в момент начала работы. Отсюда из кинетической теории повреждений следует, что должен существовать нижний порог ресурса τ_0 . Тогда модель безотказности индуктора будет иметь вид

$$l(\tau) = e^{-\left(\frac{\tau - \tau_0}{\beta}\right)^\alpha}, \quad (7)$$

где $\tau \geq \tau_0, \beta > 0$ и $0 < \alpha \leq 1$.

Заметим, что распределение Вейбулла широко используется в теории надежности, однако применение его недостаточно обосновывается. Обычно обоснование сводится к описанию модели слабого звена, состоящего из n независимых однотипных элементов с индивидуальными функциями надежности $l_0(\tau)$.

Функция надежности системы в целом определяется выражением $l(\tau) = l_0^n(\tau) = \exp[-n \int_0^\tau \lambda_0(z) dz]$, где $\lambda_0(z)$ – интенсивность отказов.

Если функция распределения $F_0(\tau) = 1 - l_0(\tau)$ отдельного элемента n при малых τ ведет себя как степенная $\left(\frac{\tau - \tau_0}{\beta_0}\right)^{\frac{1}{\alpha}}$, то $l(\tau)$ с достаточной точностью для больших n можно представить в виде (7). Заметим так же, что для (7) существуют начальные моменты, всех порядков, которые легко выражаются через гамма-функцию $\mu_k = \beta^k \Gamma(1 + k\alpha) \mu_k$.

Коэффициент вариации, асимметрия и эксцесс не зависят от β . При $0 < \alpha \leq 1$ функция распределения ресурса унимодальна, мода равна $\beta(1/\alpha - 1)^\alpha$, а функция интенсивности отказов $\lambda(\tau) = \frac{(\tau - \tau_0)^{(1/\alpha) - 1}}{\alpha \beta^{1/\alpha}}$ не убывает.

Так как основным показателем надежности здесь является γ -процентный ресурс, а он определяется для значений ресурса намного меньших среднего, то построим модель безотказности катушки индукционного нагревателя при значениях ресурса намного меньших среднего. Ресурс τ_γ определяется как наработка, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах. Из определения следует, что для нахождения τ_γ необходимо решить уравнение $l(\tau) = \frac{\gamma}{100}$ или $l(\tau_\gamma) = 1 - \varepsilon$, где ε допустимая нормативная вероятность отказа объекта (уровень риска). Эмпирическая оценка τ_γ практически невозможна, так как, например, при $\varepsilon = 10^{(2 \dots 3)}$ потребовалось бы провести испытаний порядка $n = 10^{(3 \dots 4)}$, что в большинстве случаев нереально. Поэтому для оценки τ_γ необходимо иметь закон распределения долговечности, выбор которого должен быть обоснован физическим воздействием, которому подвергся объект.

Так как τ_γ определяется на левой части функции надежности, то построим физико-статистическую модель распределения ресурса индукционной катушки для значений ресурса меньших среднего. Рассмотрим изоляционный слой катушки. Предположим, что возможно следующее его разбиение: $S_k \ll \Delta S_i \ll S$, где S – вся площадь изоляционного слоя (или опасная для пробоя площадь), а S_k – некоторая критическая площадку (точка) которая может служить началом потери прочности изоляции на пробой. Пусть (x_i, y_i, z_i) координаты некоторой точки элементарной площадки ΔS_i . Тогда можно ввести плотность распределения $\rho(\tau/x_i, y_i, z_i; \Delta S_i)$ времени потери прочности на пробой. При этом физический механизм

потери прочности изоляции может быть как “врожденный”, так и “приобретенный”. Так как $\Delta S_i \gg S_k$, то все элементарные площадки изоляции можно считать статистически независимыми. Следовательно, функция надежности индукционной катушки определяется произведением $l(\tau) = \prod_{i=1}^n \int_{\tau}^{\infty} p(u/x_i, y_i, z_i; \Delta S_i) du$, которое после преобразований можно представить в виде

$$l(\tau) = \prod_{i=1}^n e^{\ln \int_{\tau}^{\infty} p(u/x_i, y_i, z_i; \Delta S_i) du} = e^{\sum_{i=1}^n \ln \left(\int_{\tau}^{\infty} p(u/x_i, y_i, z_i; \Delta S_i) du \right)} = e^{\sum_{i=1}^n \ln(1 - P_i(\tau/x_i, y_i, z_i; \Delta S_i))} = e^{\sum_{i=1}^n \ln[1 - P_i(\tau)]}, \quad (8)$$

где $P_i(\tau)$ – функция распределения элементарной площадки ΔS_i

$$P_i(\tau) = \int_0^{\tau} p(u/x_i, y_i, z_i; \Delta S_i) du. \quad (9)$$

Для времени τ , которое меньше среднего ресурса $\mu_l(t)$ можно принять $P_i(\tau) \ll 1$, так как ΔS_i имеет прочность на пробой намного больше, чем вся изоляция. Отсюда возможно

$$\text{упрощение } l(\tau) \approx e^{-\sum_{i=1}^n P_i(\tau)}.$$

Разобьем ΔS_i на равные две площадки $\Delta S_i/2$, и будем считать, что $\Delta S_i/2 \gg S_k$ и, следовательно, долговечности этих площадок независимы. Тогда

$$P_i(\tau) = 1 - [1 - P_i(\tau, \Delta S_i/2)]^2 = P_i(\tau, \Delta S_i/2)[2 - P_i(\tau, \Delta S_i/2)].$$

Так как $P_i(\tau, \Delta S_i/2) \ll 1$, если $\tau \ll \mu_l(t)$ и $\Delta S_i \ll S$, то $P_i(\tau, \Delta S_i/2) \approx 2P_i(\tau, \Delta S_i/2)$.

Из функционального уравнения вытекает, что $P_i(\tau) \approx \Phi_i(\tau) \Delta S_i$, и тогда

$$\sum_{i=1}^n P_i(\tau) \approx \sum_{i=1}^n \Phi(\tau/x_i, y_i, z_i) \Delta S_i \approx \iint_S \Phi(\tau/x, y, z) ds, \text{ поскольку число элементарных площадок } \Delta S_i$$

очень велико. Здесь $\iint_S \Phi(\tau/x, y, z) ds$ есть интеграл по поверхности S .

То есть, для неоднородной потери прочности изоляционного слоя катушки функция надежности $l(\tau)$ при значениях ресурса меньших среднего $\mu_l(t)$ имеет вид

$$l(\tau) \approx e^{-\iint_S \Phi(\tau/x, y, z) ds} \quad (10)$$

Найти функцию $\Phi(\tau/x, y, z)$ достаточно сложно. В качестве первого приближения примем ее в виде $\Phi(\tau/x, y, z) = [\tau/\beta_0(x, y, z)]^{1/\alpha}$.

Отсюда

$$l(\tau) = e^{-\iint_S [\tau/\beta_0(x, y, z)]^{1/\alpha} ds} = e^{-\tau^{1/\alpha} \iint_S [\beta_0(x, y, z)]^{-1/\alpha} ds} \quad (11)$$

Если изоляционный слой имеет однородную потерю прочности, т.е. в каждой точке слоя она постоянна, то

$$l(\tau) = e \tau^{-1/\alpha} (\beta_0)^{-1/\alpha} S = e^{-\left(\frac{\tau}{\beta}\right)^{1/\alpha}}, \quad (12)$$

где $\beta = \beta_0 / S^\alpha$.

Распределения (11) и (12) являются Вейбуловскими и понятно, что β зависит от величины площади изоляционного слоя S . Из вышесказанного следует, что при весьма общих условиях $\tau \ll \mu_1(\tau)$ функция надежности $l(\tau)$ определяется в общем виде по (10). Задавая различные представления функции $\Phi(\tau/x, y, z)$ можно получать различные функции надежности $l(\tau)$.

Таким образом, можно предложить следующую методику расчета ИНУ с соленоидной катушкой, в которую входят нормирующие параметры надежности:

1). Находят минимальное значение ресурса $\tau_{(1)}$, максимальное $\tau_{(n)}$, а также их среднее значение $\mu_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i$ по результатам испытаний.

2). По формуле $k(\alpha) = \frac{\tau_{(n)} - \tau_{(1)}}{\mu_1 - \tau_{(1)}}$ находят оценку параметра формы α

распределения долговечности индуктора.

3). Определяют весовые коэффициенты оптимальных линейных оценок параметра сдвига τ_0 и масштабного параметра β по α и известному n

$$\tau_0^* = \eta_1 \tau_{(1)} + \eta_2 \tau_{(2)} + \dots + \eta_n \tau_{(n)}; \quad \beta^* = \omega_1 \tau_{(1)} + \omega_2 \tau_{(2)} + \dots + \omega_n \tau_{(n)}.$$

4). По полученным оценкам τ_0^* , β_0^* и α заданной γ , по формуле $\hat{\tau}_\gamma^* = \tau_0^* + \beta^* (-\ln \gamma)^\alpha$, находят оценку γ -процентного ресурса τ_γ

5). Используя формулу $\hat{\sigma}[\tau_\gamma] = \{D[\tau_0] + 2(-\ln \gamma)^\alpha \text{cov}[\tau_0, \beta] + (-\ln \gamma)^{2\alpha} D[\beta]\}^{1/2}$,

б). (где дисперсия $D[\tau_0]$, $D[\beta]$ параметров τ_0 и β , и их ковариация $\text{cov}[\tau_0, \beta]$ находится из специально разработанных таблицы) при известном объеме испытаний n и найденном α , находят оценку ошибки $\hat{\sigma}[\tau_\gamma]$ полученного $\hat{\tau}_\gamma$.

7). При заданной оценке доверительной вероятности P и найденном параметре формы α , решая уравнение $1 - (1 - P)^{\frac{1}{n-1}} = n(\tau_{(1)} - \tau_0)^{1/\alpha} / \sum_{i=1}^n (\tau_{(i)} - \tau_0)^{1/\alpha}$,

относительно τ_0 , находят точную нижнюю доверительную границу нижнего порога ресурса τ_0 , которая при любом γ является нижней доверительной границей для гамма-процентного ресурса τ_γ .

Выводы

Предложенная методика расчета оценки γ -процентного ресурса τ_γ и его ошибки $\sigma[\tau_\gamma]$ при малых количествах испытаний $n \leq 10$, и при любых n нижней доверительной границы τ_0 может быть применима для любых изделий, у которых функция надежности имеет трехпараметрическое

распределение Вейбулла. Это дает основание реконструировать данную методику как основу создания нормативного документа по расчету надежности ответственных технических систем, у которых основным показателем надежности является γ -процентный ресурс.

Список использованных источников:

1. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення : ДСТУ 3433-96. – Чинний від 1997-12-5. – К. : Держстандарт України, 1998. – 42 с.
2. Вопросы технологической надежности. Вып. XI / Науч.-исслед. ин-т метрологии высш. учеб. заведений ; ред. И. В. Дудин-Барковский. – М. : Изд-во стандартов, 1974. – 163 с.
3. Статистические оценки нижних порогов ресурсов деталей машин / И. Л. Власенко, Ю. И. Созонов, В. А. Потиченко [и др.] // Машиноведение. – 1983. – № 6. – С. 83–87.
4. Созонов Ю. И. Теория «слабого звена» и возможности асимптотических оценок квантилей ресурса деталей машин / Ю. И. Созонов; Укр. заоч. политехн. ин-т. – Харьков, 1989. – 11 с. – Деп. в УкрНИИНТИ 13.12.89, № 2872-Ук 89.
5. Надежность изоляции электрических машин / А. И. Галушко, И. С. Максимова, Р. Г. Оснач, П. М. Хазановский. – М. : Энергия, 1979. – 176 с.

Коваленко И.В., Романов С.В. «Оценка надежности индукционно-нагревательного оборудования, применяемого для критических технологий».

В статье предложена методика расчета оценки γ -процентного ресурса и его ошибки при малых количествах испытаний, которая может быть применима для любых изделий, у которых функция надежности имеет трехпараметрическое распределение Вейбулла.

Ключевые слова: надежность, долговечность, индуктор, индукционный нагрев, технология.

Коваленко І.В., Романов С.В. «Оцінка надійності індукційно-нагрівального устаткування, що використовується для критичних технологій».

У статті запропонована методика розрахунку оцінки γ -процентного ресурсу і його помилки при малих кількостях випробувань, яка може бути застосовна для будь-яких виробів, в яких функція надійності має трьохпараметричний розподіл Вейбулла.

Ключові слова: надійність, довговічність, індуктор, індукційний нагрів, технологія.

Kovalenko I.V., Romanov S.V. “Estimation of reliability of induction-heater equipment applied for critical technologies”.

The method of calculation of estimation offered in the γ -percent resource and his error at a few of tests, which can be applicable for any wares at which the function of reliability has the three-self-reactance distributing of Veybull, is suggested.

Keywords: reliability, longevity, inductor, induction heating, technology.

Стаття надійшла до редакції 31 жовтня 2012 р.