Научная статья

Original article

УДК 004.9.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФЕКТОСКОПИИ ИЗДЕЛИЙ РЕЛЬСОВЫХ ПЛЕТЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

FEATURES OF DEFECTOSCOPY OF PRODUCTS OF RAIL LASHES BY ELECTROMAGNETIC FIELDS

Халиков Абдульхак Абдульхаирович, Профессор кафедры «Радиоэлектронные устройства и системы» д-р техн. наук, Ташкентского государственного университета транспорта, Узбекистан, г. Ташкент

Ортиков Мироншох Содикович, и.о. доц. Кафедра "Радиоэлектронные устройства и системы" Ташкентского государственного университета транспорта, Узбекистан, г. Ташкент

Khalikov Abdulkhak Abdulkhairovich, xalikov_abdulxak@mail.ru

Mironshoh Ortiqov, xalikov_abdulxak@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются особенности дефектоскопия изделий рельсовых плетей при различных электромагнитных полях и типы обнаружения дефектов. На основании анализов рельсовых плетей определены причины их дефектов постоянными магнитами, переменными и импульсными электромагнитными полями.

Abstract. The article discusses the features of flaw detection of products of rail strings under various electromagnetic fields and the types of defects detection. On the basis of analyzes of rail strings, the causes of their defects with permanent magnets, alternating and pulsed electromagnetic fields are determined.

Ключевые слова: намагничивание, циркулярное движение, продольное, комбинированное, рельсовые плети.

Keywords: magnetization, circular motion, longitudinal, combined, rail lashes.

Детали и устройства могут намагничиваться постоянным магнитом, постоянным, переменным и импульсным током. Использование каждого из этих путей имеет свои положительные стороны. Применению постоянного тока способствует равномерное распределение магнитного потока вдоль внутреннего сечения деталей или изделий. С этой целью применяют генераторы с напряжением от 6 до 24В, при мощности аккумуляторных батарей от 8кВ·А до 20 кВ·А.[1] Иногда применяют выпрямленный переменный ток мощными полупроводниковыми диодами и селеновыми выпрямителями. При намагничивании переменным током магнитный поток распределяется у поверхности намагничиваемого изделия. Это возникает потому, что наблюдается так называемый скин-эффект, то есть изменение плотности тока по сечению проводника. С этой целью применяют трансформаторы с напряжением от 80 до 500В. Имеется много способов намагничивания изделий. Они показаны в табл.1 [2]. Табл.1.

Способы намагничивания изделий

Намагничивание	Способы
Циркулярное	Прохождение тока по всему сечению изделия
	Прохождение тока по определенной части изделия
	Прохождение тока по стержню, помешенному в отверстие изделия
	Индуцирование тока катушки, намотанной на изделие: от тороидальной обмотки, участка изделия
	Возбуждение тока в изделии
Продольное	Использование постоянного магнита
	Использование электромагнита
	Использование постоянного магнита с его перемещением

Комбинированное	Использования двух взаимно перпендикулярных токов через изделие
	Применение индуцированного тока в проводнике, помещенного в отверстие изделия
Во вращающемся магнитном поле	Применение катушек индуктивностей с вращающимся электромагнитным полем

Намагничивания бывают паразитные и с целью контроля. Паразитные намагничивания в рельсовых плетях возникают за счет обратного тягового тока: вращения колесных пар, применения электромагнитов при загрузке и выгрузке плетей рельсов, неоднородности рельсовых плетей, замыкания контактов на стыках, между постоянным и переменным током (железная стружка).

С целью контроля и обнаружения дефектов используют циркулярное, продольное и комбинированное намагничивание, как по всему объему, так и по частным сечениям изделия или плетей рельсов. Дефекты в рельсовых цепях обнаруживаются при направлениях перпендикулярно с намагничиванием.

Особенным предназначением намагничивания изделий и рельсовых плетей переменным электромагнитным полем являются исследования динамических характеристик нелинейной электромагнитной цепи. В этих цепях часть энергии электромагнитного поля тратится на тепло. Поэтому необходимо определять потери мощности.

Динамические процессы в соленоиде вызываются вихревыми токами. Ориентация магнитных доменов в электромагнитном поле определяет потери на гистерезисе. Магнитная индукция отстает от напряженности магнитного поля за счет влияния вихревых токов. Они препятствуют увеличению магнитной индукции, возникновению гистерезиса и вязкости. Угол между магнитной индукцией и напряженностью называется - углом магнитных потерь. Вихревые токи определяются вихревыми электродвижущими силами:

$$e_в = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

Вихревые токи могут циркулировать вдоль стального сердечника, препятствием им является активное сопротивления в сердечнике:

$$r_в = \rho \frac{2h}{ldx}, \quad (2)$$

где dx – элементарный слой толщиной сердечника, по которому протекает вихревой ток, ldx – поперечное сечение пути вихревого тока; ρ – удельное сопротивления материала, h – высота магнитной цепи вихревого тока [3].

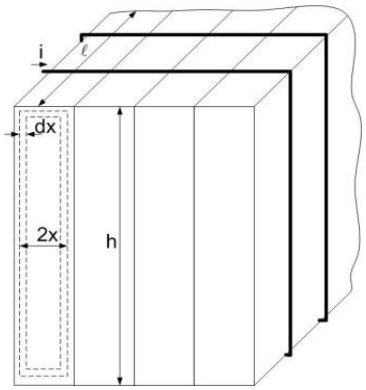


Рис.1. Элементарный участок магнитопровода из листовой стали катушки индуктивности

Элементарный участок магнит провода из листовой стали катушки индуктивности показан на рис.1.

Вихревые потери можно определить, если положить, что индукция распределена равномерно вдоль сечения магнит провода и равна:

$$B = B_m sin\omega t, \quad (3)$$

а ЭДС вихревых токов равны:

$$e_в = -h2x\frac{dB}{dt} = -h2x\omega B_m cos\omega t = -E_{вm} cos\omega t, \quad (4)$$

где $E_{вm} = 4hx\pi f B_m$.

Потери на вихревые токи определяться в виде мощности потерь на элементарном участке магнитопровода:

$$dp_в = \frac{E_в^2}{r_в} = \frac{(2\sqrt{2}\pi hxfB_m)^2 ldx}{\rho 2h} = \frac{4\pi^2 f^2 B_m^2 hlx^2 dx}{\rho}. \quad (5)$$

Мощность потерь в магнит проводе составляет:

$$P_в = \int_0^{a/2} dp_в = \frac{4\pi^2}{\rho} hlf^2 B_m^2 \left|\frac{x^3}{3}\right|_0^{a/2} = \frac{\pi^2}{6\rho} hla^3 f^2 B_m^2, \quad (6)$$

где a - толщина листа.

Полные удельные потери на вихревые токи равны:

$$p_в = \frac{P_в}{hla\gamma} = \frac{\pi^2}{6\rho\gamma} a^2 f^2 B_m^2 = \sigma_в f^2 B_m^2, \quad (7)$$

где γ – плотность материала магнитопровода; $\sigma_в$ - коэффициент, определяющий тип материала и толщину листа магнитопровода.

Потери, вызванные гистерезисом, равны:

$$p_г = (\sigma_{г1} B_m + \sigma_{г2} B_m^2) f, \quad (8)$$

где $\sigma_{г1}$ и $\sigma_{г2}$ – коэффициенты, определяющие тип материала магнитопровода. Существуют также дополнительные потери, связанные с рассеянием магнитного потока в сердечнике соленоида. Дополнительные потери определяются выражением: $p_д = p - (p_г + p_в)$. (9)

В нелинейном соленоиде с сердечником токи и напряжения являются несинусоидальными функциями, поэтому в расчетах используют метод эквивалентных синусоид. В этом случае, действующие значения токов и напряжений выбираются такими же, как и действующие значения несинусоидальной функции. При этом угол сдвига фаз находится из выражения: $\varphi = arccos \frac{P}{UI}$, (10)

где P – активная мощность (несинусоидальной функции).

Так как поток магнитной индукции синусиодален, то вихревые токи отстают на угол T/4 от магнитной индукции. Возникающая намагничивающая сила из-за вихревых токов компенсирует часть намагничивающей силы катушки индуктивности. Для динамической петли гистерезиса, представляемой эквивалентным эллипсом, можно записать и параметрические уравнения:

$$h = H_m sin\omega t, \quad (11)$$

$$b = B_m \sin(\omega t - \delta), \quad (12)$$

где h и b координаты параметрического уравнения.

Индукция B может быть разложена на две составляющие: на индукцию, совпадающую с напряженностью магнитного поля H, и индукцию B, отстающую от напряженности H на 90^0. Таким образом, получим:

$$B_{m1} = B_m cos\delta, \quad (13)$$

$$B_{m2} = B_m sin\delta. \quad (14)$$

Эти составлющие связаны энергетическими соотношениями процессов перемагничивания при переменном токе. Кроме тех магнитных проницамостей, которые были получены в предыдущем параграфе, для переменного тока вводятся понятия амплитудной магнитной проницаемости (полной) μ_n, упругой μ_1, проницаемость потерь μ_2 и комплексной магнитной проницаемости $\underline{\mu}$. Амплитудная магнитная проницаемость представляет собой амплитуду комплексного числа и равна:

$$\mu_n = \frac{1}{\mu_0}\frac{B_m}{H_m}. \quad (15)$$

Упругая проницаемость потерь представляет собой действительную часть комплексной величины и равна:

$$\mu_1 = \frac{1}{\mu_0}\frac{B_{m1}}{H_m}. \quad (16)$$

Проницаемость потерь представляет собой мнимую часть комплексной величины и равна:

$$\mu_2 = \frac{1}{\mu_0}\frac{B_{m2}}{H_m}. \quad (17)$$

Полная комплексная проницаемость определяет процессы намагничивания в переменном электромагнитном поле и равна:

$$\underline{\mu} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_m e^{j(\omega t-\delta)}}{H_m e^{j\omega t}} = \mu_n e^{-j\delta} = \mu_1 - j\mu_2. \quad (18)$$

Квазиупругая магнитная проницаемость μ_1 и поглощающая μ_2 указывают на неоднозначность кривой намагничивания. Эта неоднозначность определяется петлёй гистерезиса, ширина которой увеличивается с увеличением частоты электромагнитного поля. Расширение петли гистерезиса происходит за счет динамических потерь. При воздействии переменных магнитных полей основное внимание уделяется потерям на вихревые токи и гистерезис. Основополагающими величинами при рассмотрении переменных электромагнитных полей являются потери в стали, угол потерь и комплексная магнитная проницаемость. Кроме этого, приходится пользоваться

динамическими кривыми намагничивания и динамической петлёй гистерезиса. Все эти величины полностью не характеризуют всех процессов, происходящих в переменном магнитном поле, но по ним можно рассчитать параметры устройств [4].

Особенностью импульсного намагничивания является сочетание достоинств намагничивания постоянным и переменным электромагнитными полями. Существует несколько способов импульсного намагничивания. В этом случае происходит обмен энергией между накопителем и намагничивающими катушками. Такой способ позволяет получать кратковременные импульсы до десятков кА. Намагничивание деталей происходит стационарным или медленно меняющимся электромагнитным полем. Импульсное намагничивание является энерго- и ресурсосберегающей технологией.

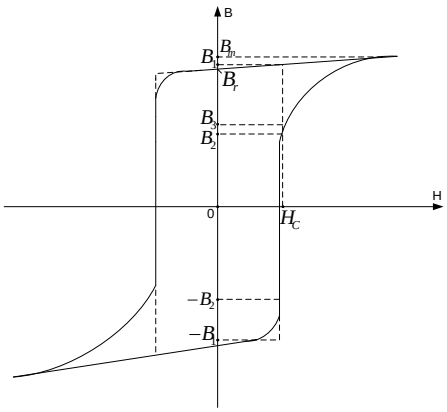


Рис.2. *B(H)* с прямоугольной петлёй гистерезиса

Наиболее подходящей кривой для импульсного намагничивания считается прямоугольная петля гистерезиса, показанная на рис.2.

Прямоугольная петля гиетерезиса отличается от той, которая применялась при намагничивании переменным током. Во - первых, она имеет большой наклон в режиме намагничивания и малый в режиме насыщения. Поэтому она может быть заменена на прямоугольник. Прямолинейность участков ограничена индукциями B_2, B_3 и B_1, B_4. Отношение остаточной индукции к амплитудному значению называют коэффициентом прямоугольности:

$$K_{пр} = \frac{B_r}{B_м}. \quad (19)$$

Коэффициент, определяющий отношение индукции при $-\frac{4}{6}H_c$ к индукции при $\frac{4}{3}H_c$ называется коэффициентом квадратности:

$$K_{кв} = \frac{B_{(-\frac{4}{6}H_c)}}{B_{(\frac{4}{3}H_c)}}. \quad (20)$$

Импульс, который направляется через катушки индуктивности, имеет, прямоугольную форму с периодом T больше, чем период перемагничивания, T_0. Эффект перемагничивания определяется напряженностью магнитного поля:

$$H = \frac{iw}{l_{ср}}, \quad (21)$$

где $l_{ср}$ - средняя длина магнитопровода; w – число витков соленоида.

Время перемагничивания сердечника равно приближенно:

$$T_0 = \frac{a}{H - H_к}, \quad (22)$$

где $a = 0{,}6 \div 1\ А \cdot сек/м$ определяет тип материала и диапазон температуры; $H_к = 50 \div 200 А/м$ зависит от материала и скорости перемагничивания.

Сердечник при перенамагничивании поглощает энергию:

$$W_n = \int_0^{T_0} iwS\frac{dB}{dt}dt = iwS(B_r + B_m) = H_m(B_r + B_m)l_{ср}S. \quad (23)$$

Энергия рассеивается, часть ее уходить на нагревания сердечника, другая часть - на увеличение потенциальной энергии. После прекращения действия импульса с периодом T_0 индукция магнитного поля уменьшается от B_m до B_r, то есть сердечник размагничивается. Энергия, которая возвращается соленоиду в результате перемагничивания равно:

$$W_0 = l_{ср}S\int_{B_r}^{B_m} HdB. \quad (24)$$

Учитывая участок петли гистерезиса между индукциями B_m - B_r как прямолинейный, мы получим:

$$W_0 = l_{ср}S\int_{B_r}^{B_m} B_m\frac{B - B_r}{B_m - B_r}dB = \frac{H_m}{2}(B_m - B_r)l_{ср}S. \quad (25)$$

Таким образом, наибольшее намагничивание изделий и рельсовых плетей достигается с максимальной остаточной индукцией B_r при прямоугольной петле гистерезиса. При этом динамические характеристики импульсного намагничивания зависят от свойств материла, размеров, формы и частоты импульсов.

При импульсном намагничивании важную роль играют не только динамические характеристики, но статические, по которым определяют коэрцитивные силы, остаточную индукцию и коэффициент прямоугольности. Состояние магнитного материала определяется несимметричной петлей магнитного гистерезиса, представленной на рис.3.

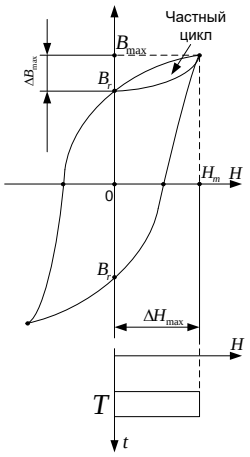


Рис.3. Несимметричная петля магнитного гистерезиса.

ΔB_{max} *и* ΔH_{max} – наибольшие приращения при намагничивании.

При импульсном намагничивании основными динамическими характеристиками являются: импульсная магнитная проницаемость, импульсная кривая намагничивания, удельные потери на перемагничивание, время перемагничивания, коэффициент перемагничивания, скорость перемагничивания.

Импульсной магнитной проницаемостью называется отношение наибольшего приращения индукции к наибольшему приращению напряженности намагничивающего поля:

$$\mu_{имп} = \frac{\Delta B_{max}}{\Delta H_{max}} = F_1(\Delta H_{max}). \quad (26)$$

Зависимость максимального приращения магнитной индукции от наибольшего приращения напряженности называется импульсной кривой намагничивания и кратко записывается в виде:

$$\Delta B_{max} = F_2(\Delta H_{max}). \quad (27)$$

Удельные потери на перемагничивание зависят от наибольших изменений магнитной индукции:

$$p = F_3(\Delta H_{max}). \quad (28)$$

Длительность импульса определяется на уровне 0,1 амплитуды импульса τ и его зависимости от амплитуды намагничивающего поля H_{max}:

$$\frac{1}{\tau} = F_4(H_{max}). \quad (29)$$

Обычно пользуются импульсной характеристикой, показанной на рис.3.

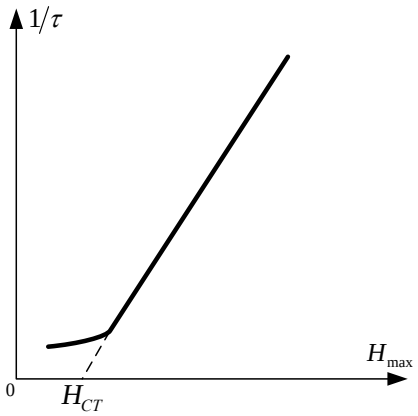


Рис.3. Импульная харатеристики намагничивания материала

Зависимость $1/\tau$ от амплитуды намагничивающего поля линейна, точка пересечения линейной части характеристики с осью абсцисс представляет собой точку H_{CT} старта (начало, трогание) резкого изменения магнитного потока намагничивающего материала.

Коэффиент перемагничивания определяется импульсным полем, необходимым для изменения состояния материала от $-B_r$ до $+B_m$, и представляется выражением:

$$S_w = \int_0^{\tau}(H_m - H_{CT})dt. \quad (30)$$

Для прямоугольного импульса:

$$S_w = (H_m - H_{CT})\tau. \quad (31)$$

Скорость перемагничивания тела, то есть скорость изменения магнитного потока, зависит от амплитуды напряженности намагничивающего поля:

$$\frac{dB}{dt} = F_5(H_m). \quad (32)$$

Заключение

Таким образом, картина состояния тела в режиме импульного намагничивания определяется частным динамическим несимметричным циклом с наибольшими приращениями индукции и напряженности электромагнитного поля.

Достоинством намагничивания постоянным полем является его стабильность и отсутствие вихревых токов.

Намагничивание пульсирующим током даёт возможность обеспечить намагниченность всего изделия или рельсовой плети и обеспечить их перемагничиванием.

На основании анализов рельсовых плетей определены причины их дефектов постоянными магнитами, переменными и импульсными электромагнитными полями.

Наиболее подходящей кривой для импульсного намагничивания считается прямоугольная петля гистерезиса, показанная на рис.2.

Литература

1. Халиков А.А., Колесников И.К., Курбанов Ж.Ф. Исследование и разработка единого пространственного электромагнитного поля и устройств на их основе. / Монография. Издательства «Фан ва технология», 2019. – С.238.
2. Халиков А.А., Курбанов Ж.Ф., Ортиков М.С. Устройства намагничивания и размагничивания рельсовых плетей и их сравнительный анализ. // UNIVERSUM Технические науки. Москва – 2019. №10 (67) – С.78-80. Электронный научный журнал tech@7universum.com .
3. Khalikov A.A. Analysis of methods for determining the characteristics of a single spatial electromagnetic field. // Индонезия. Icon Beat 2019. icon-

beat@umm.ac.id. International Conference on Bioinergy and Environmtntally Sustainable Agriculture Technology. (Международная конференция).

4. Халиков А.А., Ибрагимова О.А. Исследование устройств систем управления единым пространственным электромагнитным полем. Монография. /Под ред.проф. ХаликоваА.А. Ташкент–Тамбов: Консальтинговая компания Юком, 2020. 102с. https: //ukonf.com/doc/mon.2020.05.01.pdf. E-mail: mon@ukonf.com.

Literature

1. Khalikov A.A., Kolesnikov I.K., Kurbanov J.F. Research and development of a single spatial electromagnetic field and devices based on them. / Monograph. Publishers "Fan va Technology", 2019. – p.238.
2. Khalikov A.A., Kurbanov Zh.F., Ortikov M.S. Devices for magnetization and demagnetization of rail lashes and their comparative analysis.
1. // UNIVERSUM Technical Sciences. Moscow – 2019. No. 10 (67) – pp.78-80.
2. Electronic scientific journal tech@7universum.com .
3. Khalikov A.A. Analysis of methods for determining the characteristics of a single spatial electromagnetic field. // Indonesia. Icon Beat 2019. icon-beat@umm.ac.id. International Conference on Bioinergy and Environmtntally Sustainable Agriculture Technology. (International Conference).
4. Khalikov A.A., Ibragimova O.A. Investigation of devices of control systems of a single spatial electromagnetic field. Monograph. /Edited by Prof. Khalikovaa.A. Tashkent–Tambov: Yukom Consulting Company, 2020. 102c. https: //ukonf.com/doc/mon.2020.05.01.pdf . E-mail: mon@ukonf.com.

© Халиков А.А., Ортиков М.С., Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022.

Для цитирования: Халиков А.А., Ортиков М.С.ОСОБЕННОСТИ ДЕФЕКТОСКОПИИ ИЗДЕЛИЙ РЕЛЬСОВЫХ ПЛЕТЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ// Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022