

УДК 621.039

Е.А. Игуменцев, д-р техн. наук,
Е.А. Прокопенко, канд. техн. наук

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ДИАГНОСТИКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ

Аннотация. Посвящена совершенствованию бесконтактных методов электромагнитной диагностики электротехнического оборудования специального назначения для задачи непрерывного контроля напряженно-деформированного состояния шарообразных изделий. При разработке модели контролируемого изделия в виде вращающегося заряженного электричеством шара использовано прецессионное вращение. Для рассматриваемой модели значение момента импульса, полученное теоретически, соответствует экспериментальному.

Є. О. Ігуменцев, д-р техн. наук,
О. О. Прокопенко, канд. техн. наук

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ДІАГНОСТИКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БЕЗКОНТАКТНИМ МЕТОДОМ

Анотація. Присвячено вдосконаленню безконтактних методів електромагнітної діагностики електротехнічного устаткування спеціального призначення для задачі безперервного контролю напружено-деформованого стану кульових виробів. При розробці моделі контрольованого виробу у вигляді зарядженої електрикою кулі, що обертається, використано прецесію. Для даної моделі значення моменту імпульсу, яке отримане теоретично, відповідає експериментальному.

E. A. Igumencev, ScD,
E. A. Prokopenko, PhD

ELECTROMAGNETIC DIAGNOSIS OF STRESS-STRAIN STATE OF A NON-CONTACT METHOD

Abstract. This article is about improving of non-invasive methods of electromagnetic diagnostic of electrical engineering equipment of special use for putting continuous control of tense-deformed spherical items. During the developing process of the model in the form of rotating, electrically charged ball a processional rotation is used. For this model the value of moment of impulse calculated theoretically corresponds to the experimental.

Условия эксплуатации электротехнического оборудования в системах с резкопеременным характером нагрузки существенно отличаются от систем общего назначения. Такие режимы имеют место в приводах прокатных станков, преобразовательных и инверторных линиях электропередачи и вставок постоянного тока и др. отраслях промышленности. В электротехническом оборудовании имеют место нестационарные магнитные процессы, приводящие к большим добавочным потерям, перегревам деталей конструкции, потере электродинамической стойкости, изменению геометрических размеров и формы обмоток, проблемам в изоляции и др. Поэтому аварийность в системах резкопеременных нагрузок значительно превышает показатели в системах общего назначения [3].

В последние годы существенно возрос интерес к методам исследования электротехнических систем и устройств с использованием энергетических методов, базирующихся на представлении процессов преобразования энергии в форме уравнений баланса мгновенной мощности на элементах схемы замещения для всех компонент – ортогональных составляющих гармоник мгновенной мощности [6], которая в соответствии с традиционными представлениями равна произведению текущих значений напряжения и тока. Уравнения баланса такого рода строго соответствуют закону сохранения, чем обеспечивается по существу

высокое качество получаемых результатов. Однозначно установлено, что энергетические критерии в задачах идентификации параметров электротехнических систем дают наиболее приемлемые результаты.

Существующие методики диагностики электротехнического оборудования общего назначения не представляется возможным использовать в системах с резкопеременными нагрузками.

В работе предлагается методика электромагнитной диагностики электротехнического оборудования специального назначения для задачи непрерывного контроля напряженно-деформированного состояния цилиндрических и шарообразных изделий. При передаче механических усилий наибольшей деформации подвергаются поверхностные слои цилиндрического и шарообразного изделия [2], но и слои под поверхностью на глубине δ также испытывают значительные механические напряжения. В процессе эксплуатации желательнее контролировать предельную степень деформации изделия на соответствующей глубине. Для контроля механических напряжений, возникающих во вращающихся изделиях, существует достаточно много контактных и бесконтактных методов. Данная работа посвящена совершенствованию бесконтактных методов.

Идеальный шар при вращении ведет себя как обычный волчок, если обладает незначительным эксцентриситетом центра тяжести (т.е. центр жесткости и центр тяжести не совпадают). При вращении волчка

вокруг своей оси возникают прецессия и нутация в сочетании с постоянными и периодическими частотами вращения вокруг различных главных осей. Такие вращения и приводят к постоянным и периодическим механическим моментам импульсов электрона. В сочетании с магнитными моментами, обусловленными электрическим движением в представлении электрона как диполя, механические моменты импульсов создают резонансные режимы вращений. На резонансных режимах при линейных скоростях вращения электрона уже возможны значения момента импульса порядка (L).

В такой модели возникает необходимость использовать конечный радиус электрона, так как для точечной частицы энергия магнитного поля, как и электромагнитная масса, оказываются бесконечными. Понятие точечных и бесконечных значений для реальных физических величин вызывает недоумение. Представить, а тем более измерить бесконечные величины не представляется возможным в настоящее время. Чтобы преодолеть эту трудность — предположим, что элементарный заряд (электрон) на самом деле вовсе не точка, а небольшое зарядовое распределение шаровидной (или какой-либо другой) формы конечных размеров.

При вращении отдельных элементов электрических частей электрона, составляющих шар зарядовых распределений, вокруг своей оси возникает магнитное поле движущегося заряда, приводящее к магнитной индукции. Электрон ведет себя аналогично диполю (рамка с током), электрический момент которого, взаимодействуя с магнитной индукцией, создает крутящий момент и силу, направленную вдоль вектора магнитной индукции.

В представленной работе вычисляется магнитная индукция заряженного электричеством вращающегося магнитного шара, представляющего модель спина электрона. В статье рассмотрен лишь один аспект задачи спина: исследование магнитного поля движущегося заряда без связи с магнитными моментами и моментом импульса.

Если заряженный электрически шар раскрутить вокруг собственной оси, то элементарные заряженные частицы шара, вращаясь, создают токи по окружностям вращения, что приводит к появлению в окружающем пространстве магнитного поля. Электрический ток представляет собой упорядоченное движение электрических зарядов, поэтому можно сказать, что любой движущийся в вакууме или среде заряд создает вокруг себя магнитное поле. В результате обобщения опытных данных был установлен закон, определяющий поле \vec{B} точечного заряда Q , свободно движущегося с нерелятивистской скоростью \vec{v} ,

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mu Q [\vec{v} \cdot \vec{r}]}{r^3}, \quad (1)$$

где \vec{r} — радиус-вектор, проведенный от заряда Q к точке наблюдения M (рис.1); $\frac{\mu_0}{4\pi} = \frac{k_e}{c^2}$ — магнитная

постоянная; $k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ — коэффициент пропорциональности в системе единиц СИ; c — скорость света; ϵ_0 — электрическая постоянная; μ — магнитная проницаемость среды (в вакууме $\mu = 1$).

Под свободным движением заряда понимается его движение с постоянной скоростью.

Рассмотрим соотношение (1) в системе единиц, где $k_e = 9 \cdot 10^9$ м/Ф, а заряд находится в вакууме ($\mu = 1$). Согласно выражению (1) вектор \vec{B} направлен перпендикулярно плоскости, в которой расположены векторы \vec{v} и \vec{r} , т.е. его направление совпадает с направлением поступательного движения правого винта при его вращении от \vec{v} к \vec{r} . Вектор \vec{B} представляет собой псевдовектор.

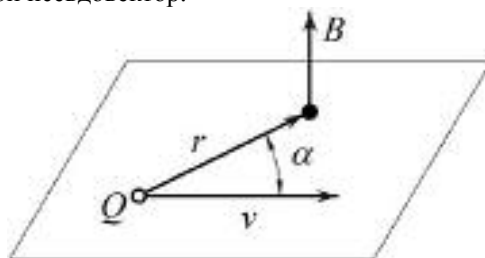


Рис.1. Магнитная индукция движущегося заряда

Известно [4,7], что движущийся заряд по своим магнитным свойствам эквивалентен элементу тока, а модуль магнитной индукции (1)

$$B = \frac{k_e}{c^2} \frac{Q \cdot v}{r^2} \sin \alpha, \quad (2)$$

где α — угол между векторами \vec{v} и \vec{r} (рис.1).

Приведенные закономерности (1) и (2) справедливы лишь для малых скоростей ($v < c$) движущихся зарядов, когда электрическое поле свободно движущегося заряда можно считать электростатическим, т.е. создаваемым неподвижным зарядом, находящимся в той точке, где в данный момент времени расположен движущийся заряд. Таким образом, предполагаем, что для шара (электрона) применение выражения (2) обеспечено условием ($v < c$).

В данной работе, исходя из соображений наглядности, привлекаются понятия классической физики и квантовой механики. Аналогичный результат для магнитного момента электрона можно получить на основе строгих квантово-механических рассуждений. При квантово-механических расчетах считается [1,5], что при своем движении электрон «размазан» в пространстве около ядра. Поэтому нужно вычислить не линейный, а объемный ток. При этом вычисления показывают [1], что ни вдоль радиуса, ни вдоль меридианов никакого тока нет. Это приводит к заключению, что ток течет только по широтам, как если бы мы имели дело с электроном, вращающимся в плоскости, перпендикулярной оси вращения. Таким образом, квантово-механические вычисления также приводят к выводу о круговом линейном токе.

Формула (1) определяет магнитную индукцию положительного заряда, движущегося со скоростью

v . Если движется отрицательный заряд, то Q надо заменить на $(-Q)$. Скорость v – относительная скорость, т.е. скорость относительно наблюдателя.

Вычислим магнитную индукцию поля, создаваемого элементарной частицей шара (электрона) $Q = \rho dV$, где ρ – плотность электрического заряда; dV – элементарный объем (рис.2). Поскольку шар (электрон) вращается с постоянной угловой скоростью ω вокруг главной оси, то скорость \vec{v} перпендикулярна радиус-вектору \vec{r}_1 ($\sin \alpha = 1$), а расстояние всех элементарных частей электрона до оси ω одинаково и равно r_1 (рис.2). Как уже ранее отмечалось, элементарная частица электрона Q создает круговой линейный ток. Здесь O_1 – центр вращения, O – центр электрически заряженного шара. Для магнитной индукции, создаваемой элементом шара (электрона),

$$dB = \frac{k_e \cdot Q \cdot V}{c^2 \cdot r^2} = \frac{k_e \cdot \rho \cdot dV \cdot r_1 \cdot \omega}{c^2 \cdot r^2}.$$

Из симметрии самой задачи следует, что наиболее подходящей координатной системой будет сферическая. Такая система изображена на рис.2, где сферическими координатами являются радиус-вектор \vec{r} , полярный угол θ и азимутный угол φ .

При вращении шара вокруг оси ω по часовой стрелке, если смотреть со стороны конца оси ω , проекция вектора магнитной индукции элемента шара Q в точке O направлена в положительную сторону оси ω , как это показано на рис.2: $dB_\omega = dB \sin \theta$.

С учетом того, что $r_1 = r \cdot \sin \theta$ (рис.2),

$$dB_\omega = \frac{k_e \cdot \rho \cdot \omega \cdot \sin^2 \theta \cdot dV}{c^2}. \quad (3)$$

Фактически элемент шара вращается вокруг центра O_1 . Вектор $d\vec{B}$ перпендикулярен r_1 и \vec{v} , в точке O_1 направлен вдоль оси ω (рис. 2):

$$dB = \frac{k_e \cdot \rho \cdot \omega \cdot \sin \theta \cdot dV}{c^2}. \quad (4)$$

Для магнитного поля справедлив принцип суперпозиции: вектор магнитной индукции результирующего поля, создаваемого несколькими движущимися зарядами, равен векторной сумме магнитных индукций складываемых полей, создаваемых каждым

движущимся зарядом в отдельности.

При интегрировании (суммировании) соотношения (4) вектор магнитной индукции \vec{B} направлен вдоль оси ω и не имеет единой точки приложения вектора индукции. Вектор \vec{B} является псевдовектором (носит относительный характер) и зависит как от времени, так и от положения точки наблюдения. Поэтому целесообразнее для магнитной индукции использовать соотношение (3), так как в этом случае есть единая точка наблюдения O для всех токов, участвующих в суммировании.

Выразим элементарный объем dV через криволинейные координаты $dV = dl_1 \cdot dl_2 \cdot dr$ (рис.2). Связь между криволинейными и сферическими координатами позволяет записать $dV = r \cdot d\theta \cdot r_1 \cdot d\varphi \cdot dr$. Заменим $r_1 = r \cdot \sin \theta$, подставим в соотношение (3) выражения для r_1 и dV :

$$dB = \frac{k_e \cdot \rho \cdot \omega \cdot \sin^3 \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \cdot dr}{c^2}. \quad (5)$$

Как следует из рис. 2, все элементы шара, совершающие круговые движения, создают в центрах (точек O и O_1) магнитное поле одинакового направления в положительную сторону оси ω . Поэтому сложение векторов $d\vec{B}_\omega$ и $d\vec{B}$ заменим сложением их модулей. Следовательно, суммарную магнитную индукцию шара (электрона) в направлении оси ω можно представить

$$B_\omega = \frac{k_e \cdot \rho \cdot \omega}{c^2} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \sin^3 \theta d\theta \int_0^R r dr. \quad (6)$$

Вычисляя интегралы в (6) по координатам φ и θ , получим магнитную индукцию шарового слоя радиуса r и толщиной dr (рис.3), а выражение суммарной магнитной индукции

$$B_\omega = \frac{8 \cdot k_e \cdot \pi \cdot \rho \cdot \omega}{3c^2} \int_0^R r dr. \quad (7)$$

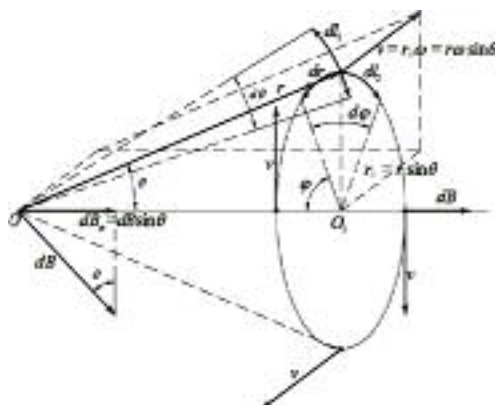


Рис.2. Расчетная схема определения магнитной индукции вращающегося шара

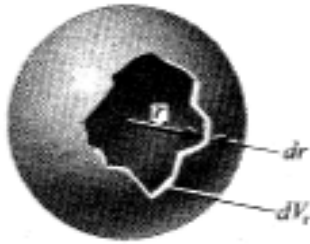


Рис.3. Радиальный заряженный слой сферы

С учетом того, что заряд электрона равен $e = \rho \cdot V$, где объем электрона равен $V = 4\pi R^3/3$, после интегрирования по r соотношения для слоя электрона получим суммарную магнитную индукцию всего электрона

$$B_{\omega} = \frac{k_{\epsilon} \cdot e \cdot \omega}{c^2 \cdot R}. \quad (8)$$

Вектор индукции магнитного поля \vec{B}_{ω} электрона направлен вдоль оси ω и состоит из проекций, распределенных по поверхности электрона. Здесь направление вектора магнитной индукции охватывает всю поверхность электрона, а максимальное значение направлено согласно с осью вращения ω . Проекция вектора \vec{B}_{ω} на ось, ортогональную ω , равна нулю. Таким образом, проекция вектора \vec{B}_{ω} на ось ω и является суммарным мгновенным вектором магнитной индукции.

Для определения численных значений \vec{B}_{ω} по формуле (8) необходимо знать, прежде всего, для шара частоту вращения ω . Для электрона значения всех величин, входящих в формулу (8), кроме ω , известны в физике. Вычисление ω представляет другой аспект задачи о спине электрона и в данной статье не рассматривается. Однако, заметим, что в рамках рассматриваемой модели шара $\vec{B}_{\omega} = 0,45 \cdot 10^9$ Тл. Такое огромное значение магнитной индукции намного превышает орбитальное $\vec{B}_0 = 0,45$ Тл в атоме водорода. В дальнейших публикациях будет показан механизм определения постоянной составляющей \vec{B}_{ω} , величина которой значительно меньше её мгновенного значения.

Список использованной литературы

1. Акоста В., Кн. Основы современной физики / Акоста В., Кован Б., Грэн Б.- М.: «Просвещение», 1981. – 495 с.
2. Горкунов Б.М. Вихретоковый контроль поверхностных и подповерхностных деформаций структуры цилиндрических валов. / Горкунов Б.М., Скопенко В.В., Тюпа И.В. // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2010. - № 28. – С. 538-539.

3. Зиновкин В.В. Трехуровневая система электромагнитной диагностики трансформаторного оборудования специального назначения/ Зиновкин В.В., Бондаренко В.И. // Сб. научн. тр. Днепродзержинского госуд. техн. ун-та (техн. науки). Тематич. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика»/ Днепродзержинск: ДГТУ. – 2007. – С. 481-482.
4. Киттель Ч., Механика / Ч Киттель У, Найт, М Рудерман – М.: Наука, 1971. – Том 1. – 479 с.
5. Парселл Э. Электричество и магнетизм./ Парселл Э. – М.: Наука, 1972.— Т. 2.— 439 с.
6. Родькин Д.И. Мгновенная мощность нелинейных элементов электрической цепи/ Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В. // Сб. научн. тр. Днепродзержинского госуд. техн. ун-та (техн. науки). Тематич. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика»/ Днепродзержинск: ДГТУ. – 2007. – С. 501-506.
7. Трофимова Т.И. Курс физики: Учебное пособие для ВУЗов / Т.И Трофимова. – М.: Изд-во «Академия», 2008. – 560 с.

Получено 10.07.2011



Игуменцев
 Евгений Александрович,
 д-р техн. наук,
 зав. каф. СУТП и О
 Украинск. инженерно-
 педагогич. акад.,
 61003, г. Харьков,
 ул. Университетская, 16,
 т. (057) 706-12-45



Прокопенко
 Елена Александровна,
 канд. техн. наук, доц. каф.
 СУТП и О Украинск. инже-
 нерно-педагогич. акад.,
 61003, г. Харьков,
 ул. Университетская 16,
 т. (057) 733-79-59