

4. Patent RF No. RU 2501027 C2 G01R2702. *Ustroistvo dlya izmereniya soprotivleniya elektricheskoi izolyatsii* (An apparatus measuring electric insulation resistance)/A.S. Serebryakov, D.A. Semenov. — Bulletin of inventions, 2013, No. 34.

5. Serebryakov A.S. *Transformatory* (Transformers). Moscow, Publ. House of Moscow Power Engineering Institute, 2014, 360 p.

6. Serebryakov A.S., Semenov D.A. *Elektro — in Russ. (Electro)*, 2013, No. 1, pp. 47–51.

7. Serebryakov A.S., Semenov D.A. *Elektrotehnika — in Russ. (Electrical Engineering)*, 2013, No. 6,

8. Patent RF No. RU 2 52 30 75 G01 R 27/18. *Ustroistvo kontrolya kachestva elektricheskoi izolyatsii* (Quality control device

electrical insulation)/A.S. Serebryakov, D.A. Semenov. — Bulletin of inventions, 2014, No. 20.

9. Patent RF No. RU 251 66 13 C2 G01R 31/12. *Sposob otsenki ostavshegosya sroka sluzhby vysokovol'noi izolyatsii* (A method of estimating the remaining life of high voltage insulation)/A.S. Serebryakov, D.A. Semenov. — Bulletin of inventions, 2014, No. 14.

10. Alekseyev B.A. *Kontrol' sostoyaniya (diagnostika) krupnykh silovykh transformatorov* (Monitoring of state (diagnostics) of large power transformers). Moscow, Publ. «ENAS», 2002, 216 p.

11. Svi P.M. *Metody i sredstva diagnostiki oborudovaniya vysokogo napryazheniya* (Methods and tools for diagnosis of high voltage equipment). Moscow, Energoatomizdat, 1992, 240 p.

Электричество, 2016, № 7, с. 42–50.

Обобщенный вихретоковый параметр, границы применимости¹

РЕУТОВ Ю.Я.

Обсуждается использование обобщенного (вихретокового) параметра при рассмотрении электромагнитных процессов в проводящих телах. Параметр представляет собой произведение геометрической характеристики проводящего предмета, относительной магнитной проницаемости материала предмета и его удельной электропроводности, а также частоты перемещающегося поля. Знание вихревого параметра предмета позволяет однозначно предсказать поведение этого предмета в переменном магнитном поле и, наоборот, по поведению предмета в переменном поле определить некоторые его геометрические или физические характеристики. Посредством компьютерного моделирования показывается, что применение вихретокового параметра корректно только по отношению к проводящим телам, не имеющим магнитных полюсов. В случае разомкнутых проводящих ферромагнитных тел (с магнитными полюсами) электромагнитные процессы в них могут протекать со значительными вариациями при неизменном значении вихретокового параметра.

Ключевые слова: электромагнетизм, проводящие тела, вихретоковый параметр, обобщенный параметр, глубина проникновения, вихревой ток, частота перемещения, магнитная индукция, проницаемость, электропроводность

Одним из важнейших последствий опубликования в XIX в. уравнений Дж. К. Максвелла явилось развитие теоретических основ прикладного электромагнетизма и, в частности, появление теории проникновения переменного магнитного поля в металлы. Имевшиеся в то время средства вычислительной техники позволяли составить математическое описание лишь узко ограниченного круга вариантов взаимодействия электромагнитного поля с проводящей средой, что, тем не менее, не помешало выявить основные закономерности такого взаимодействия, ставшие со временем классическими. Вместе с тем, некоторые постулаты, понятия и обобщения, вполне уместные и справедливые при рассмотрении и решении в те времена конкретных задач, в дальнейшем стали использоваться и там, где целесообразность и правомерность их применения вызывает сомнения. Одним из таких понятий, по мнению автора, является обобщенный (вихретоковый) параметр [1–3].

Часто он записывается в виде:

$$k^2 = j\omega\mu_0\mu\sigma, \quad (1)$$

где ω — угловая частота переменного поля; μ_0 — магнитная постоянная; μ — относительная магнитная проницаемость материала; σ — удельная электропроводность материала, связывается с глубиной проникновения электромагнитной волны в проводящее полупространство [5]:

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\mu\sigma}}. \quad (2)$$

При вычислении взаимодействия бесконечно длинного проводящего цилиндра радиуса r с продольным синусоидальным магнитным полем формула для обобщенного параметра приводится ([8], стр. 374) к виду:

$$\beta = r\sqrt{\omega\mu_0\mu\sigma}. \quad (3)$$

В любом случае в выражение для обобщенного (вихретокового) параметра неотъемлемой частью входит произведение относительной проницаемо-

¹ Работа выполнена по бюджетной теме «Диагностика» № 01201463329.

сти материала изделия на его удельную электропроводность $\mu\sigma$, т.е. предполагается, что эти две физические характеристики материала в равной степени влияют на проникновение поля в проводник и на функционирование вихретокового преобразователя.

Цель предлагаемой статьи — обратить внимание на ограниченность круга задач, при решении которых применение обобщенного (вихретокового) параметра справедливо и целесообразно, а также на ошибки и несуразности, к которым приводит неоправданное расширение области его использования.

В качестве доказательств справедливости выкладок и рассуждений автора в статье приводятся результаты численного моделирования по сертифицированной программе ELCUT, предназначенной для решения двумерных и осесимметричных задач вихревых токов [6, 11]. Программа разработана и распространяется с 1998 г. научно-производственным кооперативом TOP (электронный адрес www.top.ru) и позволяет моделировать двумерные поля методом конечных элементов. Программа базируется на решении уравнений Пуассона и Лапласа при соблюдении на границах физических сред условий Дирихле и Неймана. Ввиду общности физических законов, лежащих в основе самых разнообразных процессов, программа ELCUT позволяет моделировать не только электромагнитные явления (электростатика, магнитостатика, нестационарное магнитное поле, магнитное поле переменных токов), но и решать задачи теплопередачи и теории упругости.

При использовании программы ELCUT в численном эксперименте автором настоящей работы были приняты все меры для получения наиболее адекватных результатов: с целью детализации картины убывания поля и индукции с частотой густота сетки конечных элементов увеличивалась вблизи поверхности проводящего ферромагнетика, а границы области моделирования были удалены от объектов моделирования на расстояния, многократно превышающие их размеры.

Все вычисления и выкладки выполнены для линейного случая.

Прходной вихретоковый преобразователь (рис. 1) представляет собой бесконечно длинный намагничивающий соленоид, внутри которого по-

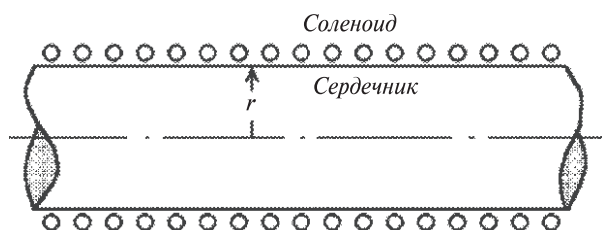


Рис. 1. Прходной вихретоковый преобразователь

мещен также бесконечно длинный металлический сердечник из неферромагнитного или ферромагнитного материала [1, 2, 8]. По соленоиду пропускается синусоидальный переменный ток с круговой частотой ω . Преобразователь может также содержать соосную с намагничивающим соленоидом цилиндрическую измерительную (приёмную) катушку, с которой снимается ЭДС. Если преобразователь содержит такую катушку, он называется трансформаторным, если же её функции выполняет намагничивающий соленоид, то преобразователь называется параметрическим [8]. Очевидно, такое разделение не является принципиальным.

Если измерять (или вычислять) поток индукции через поперечное сечение соленоида при вариациях частоты намагничивающего тока (поля), то можно изучать процессы намагничивания этим полем металлического сердечника и тем самым получать информацию о некоторых его физических свойствах.

В нашей модели радиус r металлического сердечника составлял 20 мм, внутренний радиус соленоида 22 мм, а внешний 24 мм. Амплитудное значение тока в соленоиде равнялось 1000 А/м. Первая из решаемых задач — показать, что проницаемость материала и его проводимость в случае бесконечно длинного стержня равнозначны. Поскольку случай с проницаемостью, равной единице, резко выделяется на общем фоне, мы его не рассматриваем.

На рис. 2 показано, как изменяется поле в теле цилиндра в зависимости от глубины на разных частотах. По оси абсцисс отложено расстояние точки наблюдения от поверхности цилиндра (глубина), по оси ординат — отношение поля на заданной глубине к полю на поверхности.

Вычисления выполнялись при сохранении неизменным произведения проницаемости материала цилиндра μ на его удельную проводимость σ в трех вариантах: $\mu = 10, \sigma = 10$ млн См/м; $\mu = 100, \sigma = 1$ млн См/м; $\mu = 1000, \sigma = 100$ тыс. См/м.

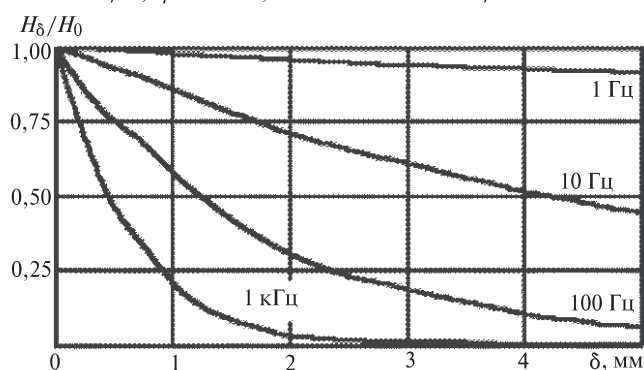


Рис. 2. Убывание магнитного поля при проникновении вглубь проводящего цилиндра: по горизонтали — расстояние от поверхности (глубина); по вертикали — отношение напряженности поля на глубине к полю на поверхности

Результаты вычислений по всем вариантам в данном случае полностью совпадают.

Из рис. 2 видно, что при данном значении произведения глубина проникновения поля в бесконечно длинный цилиндр на частотах 100 и 1000 Гц составляет соответственно 5 и 1,5 мм (округленно).

Далее вычислялся магнитный поток через поперечное сечение нашего сердечника диаметром 40 мм, а именно, его синфазная с намагничивающим полем Φ_c и квадратурная по отношению к нему $\Phi_{кв}$ составляющие на фазовой плоскости.

На рис. 3 приводятся результаты расчета действительной (синфазной с намагничивающим полем), а на рис. 4 – мнимой (квадратурной по отношению к намагничивающему полю) составляющих потока через поперечное сечение сердечника. Обе нормированы к статической магнитной проницаемости материала сердечника. Из действительной составляющей вычтен поток намагничивающей обмотки.

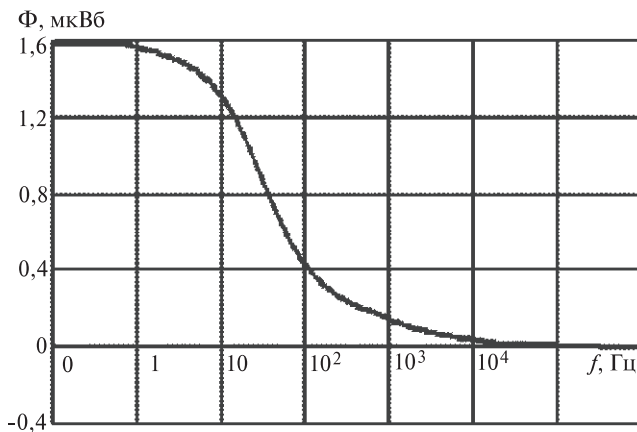


Рис. 3. Синфазная с намагничивающим полем составляющая потока цилиндрического изделия в функции частоты этого поля: по горизонтали – частота намагничивающего поля; по вертикали – синфазная составляющая магнитного потока

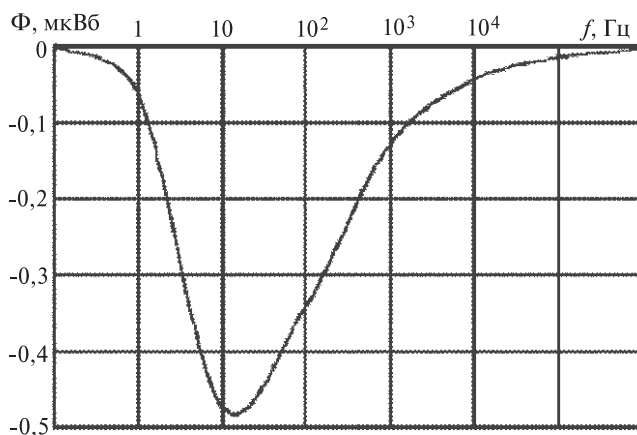


Рис. 4. Квадратурная по отношению к намагничивающему полю составляющая потока цилиндрического изделия в функции частоты этого поля: по горизонтали – частота намагничивающего поля; по вертикали – квадратурная составляющая магнитного потока

Следует заметить, что в литературе, посвященной изучению намагничивания в переменном поле, зависимости фазовых составляющих потока индукции от частоты обычно приводятся в виде годографов [13]. Здесь эти зависимости приведены в виде отдельных графиков для каждой составляющей, что представляется более наглядным.

Как и в случае, отраженном на рис. 2, вычисления выполнялись при тех же трех комбинациях значений проницаемости материала и его удельной проводимости с сохранением постоянства их произведения, т.е. вихрекового параметра. Из рисунка видно, что частотные зависимости синфазной с намагничивающим током и квадратурной по отношению к нему составляющих магнитного потока определяются только значением вихрекового параметра, независимо от соотношения входящих в него сомножителей.

Это означает, что нормированные зависимости составляющих потока сердечника зависят только от произведения $\mu\sigma$, входящего в выражение для вихрекового параметра, и использование его в данном случае вполне обосновано.

Это свидетельствует также о корректной работе программы численного моделирования.

Шар. Теперь заменим бесконечно длинный цилиндрический сердечник шаром того же диаметра, размещенным в центре преобразователя. Как известно [9], проницаемость формы шара μ_ϕ равна трем, и его проницаемость тела μ_T определяется выражением:

$$\mu_T = \frac{\mu_\phi \mu}{\mu_\phi + \mu - 1} = \frac{3\mu}{2 + \mu}. \quad (4)$$

Это означает, что если проницаемость материала шара гораздо больше трех, то его проницаемость тела близка к трем и очень слабо зависит от проницаемости материала.

Выражение (4) выведено для статического (или квазистатического) режима намагничивания, когда поверхностный эффект отсутствует или слабо выражен. Однако в [12] экспериментально и аналитически показано, что оно приближенно справедливо и в динамическом режиме.

На рис. 5 показано изменение поля внутри шара от глубины на частоте 1 кГц (по аналогии с рис. 2). Поле вычислялось в экваториальном сечении шара плоскостью, перпендикулярной оси соленоида. Вычисления выполнялись также для трех вышеуказанных сочетаний значений проницаемости материала шара и его удельной проводимости. Результаты вычислений по всем трем вариантам также совпали, глубина проникновения поля в шар составила (как видно из рисунка) также около

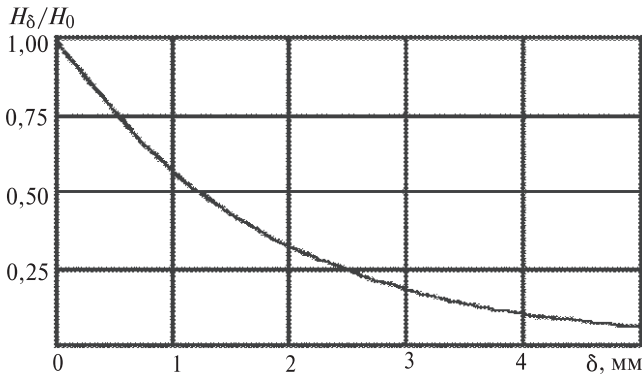


Рис. 5. Уменьшение магнитного поля при проникновении вглубь проводящего шара в экваториальном сечении: по горизонтали – расстояние от поверхности (глубина); по вертикали – отношение напряженности поля на глубине к полю на поверхности

1,5 мм (как и в случае бесконечно длинного цилиндра).

На рис. 6 показано изменение с глубиной проникновения амплитуды поля внутри шара на частоте 1 кГц при двух значениях проницаемости материала 10 и 100 и удельной проводимости, соответственно, 10 млн и 1 млн См/м.

Из рисунка видно, что при неизменной глубине проникновения амплитуда внутреннего поля при $\mu=10$ в несколько раз больше, чем при $\mu=100$. Это и неудивительно, поскольку внутреннее поле в шаре равно разности внешнего поля и размагничивающего поля полюсов, а размагничивающее поле тем больше, чем больше проницаемость материала шара.

На рис. 7 показаны результаты расчета модуля индукции в теле шара при частоте 1 кГц на разной глубине при трех значениях проницаемости материала и неизменности произведения $\mu\sigma$.

Из рисунка видно, что в отличие от внутреннего поля индукция в теле шара больше при большем значении проницаемости материала, хотя глубина проникновения индукции при вариациях проницаемости остается неизменной. Видно также, что возрастание проницаемости материала со 100 до

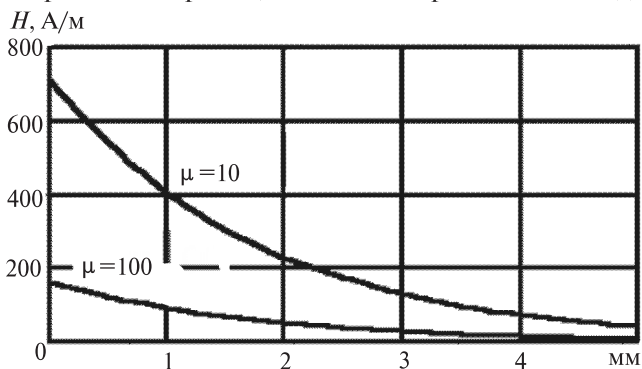


Рис. 6. Изменение амплитуды поля внутри шара в экваториальном сечении на частоте 1 кГц при двух значениях проницаемости материала и неизменном вихрековом параметре: по горизонтали – расстояние от поверхности (глубина); по вертикали – амплитуда внутреннего поля при неизменном значении амплитуды намагничивающего тока

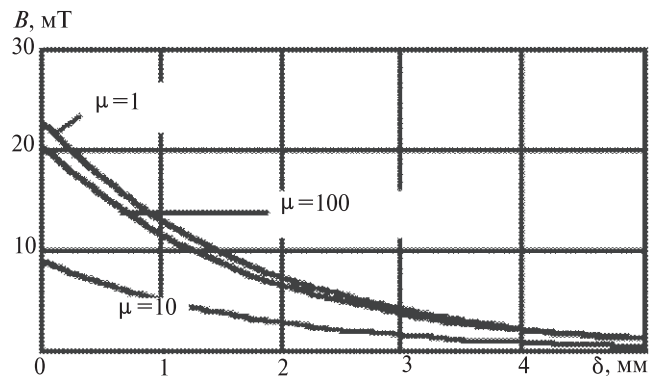


Рис. 7. Значения модуля индукции в теле шара при частоте 1 кГц на разной глубине при трех значениях проницаемости материала и неизменности произведения $\mu\sigma$: по горизонтали – расстояние от поверхности (глубина); по вертикали – модуль индукции при неизменной амплитуде намагничивающего тока

1000 (в 10 раз) вызвало, в полном соответствии с (4), незначительный прирост индукции поля в шаре.

На рис. 8 приведены результаты вычисления плотности вихревых токов в теле шара на разной глубине при частоте 1 кГц и двух значениях проницаемости материала при неизменности произведения $\mu\sigma$.

Из рисунка видно, что плотность вихревых токов в теле шара больше при меньших значениях проницаемости материала. Это означает, что на развитие вихревых токов в шаре преобладающее влияние оказывает удельная проводимость материала, которая при $\mu=10$ на порядок больше, чем при $\mu=100$. Очевидно, указанное обстоятельство не может не оказать существенного влияния на частотные зависимости действительной и мнимой составляющих потока проводящего ферромагнитного шара.

На рис. 9 приведены результаты расчета действительной, а на рис. 10 мнимой составляющих потока через центральное сечение шара. Обе нормированы к проницаемости тела шара. Из действительной составляющей вычтен поток намагничивающей обмотки.

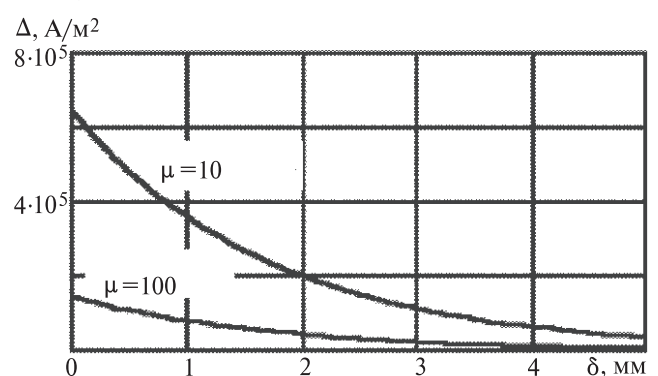


Рис. 8. Плотность вихревых токов в теле шара на разной глубине (в экваториальной плоскости) при частоте 1 кГц и двух значениях проницаемости материала при неизменности произведения $\mu\sigma$: по горизонтали – расстояние от поверхности (глубина); по вертикали – плотность вихревых токов

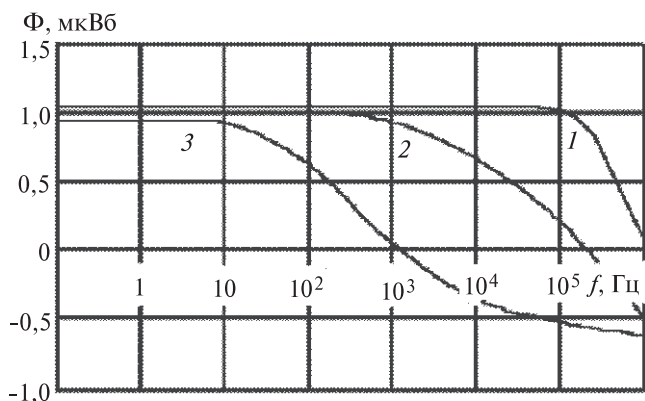


Рис. 9. Действительная (синфазная) составляющая магнитного потока через экваториальное сечение шара в функции частоты намагничивающего поля: по горизонтали — частота поля; по вертикали — синфазная составляющая потока

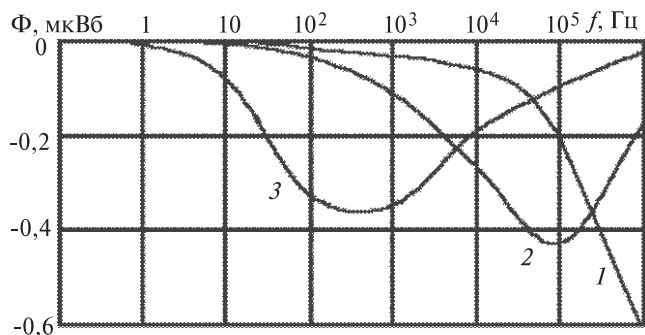


Рис. 10. Мнимая (квадратурная) составляющая магнитного потока через экваториальное сечение шара в функции частоты намагничивающего поля: по горизонтали — частота поля; по вертикали — квадратурная составляющая потока

На рис. 9 и 10 кривые 1 и 2 относятся к шарам из материалов с $\mu=1$ тыс. и $\sigma=100$ тыс. См/м и с $\mu=100$ и $\sigma=1$ млн См/м соответственно; кривая 3 относится к шару из материала с $\mu=10$ и $\sigma=10$ млн См/м.

Из рисунков видно, что в случае шара, несмотря на сохранение неизменным произведения проницаемости материала на его проводимость, ход кривых значительно различается. Частоты характерных изломов на кривых различаются на несколько порядков. Превалирующую роль начинает играть проводимость материала, в то время как его магнитная проницаемость сказывается очень слабо. Это и неудивительно, поскольку проницаемость формы шара сглаживает влияние проницаемости материала на проницаемость тела не только в статике, но и в динамике.

В связи с этим возникает соблазн рассматривать ферромагнитный проводящий шар в проходном преобразователе как бесконечно длинный стержень с проницаемостью материала, равной проницаемости тела шара.

На рис. 11 и 12 приведены результаты моделирования частотных зависимостей действительной и мнимой составляющих потока для шара и беско-

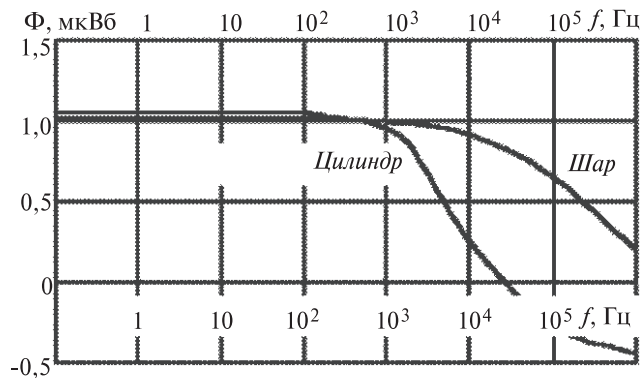


Рис. 11. Сравнение синфазных составляющих магнитного потока шара и цилиндра: по горизонтали — частота намагничивающего поля; по вертикали — синфазная составляющая магнитного потока

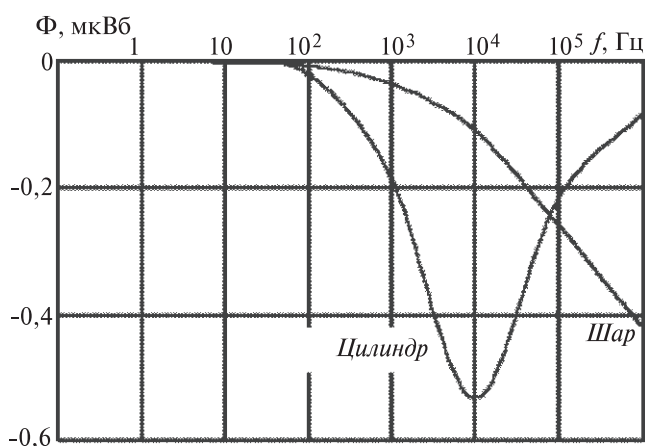


Рис. 12. Сравнение квадратурных составляющих магнитного потока шара и цилиндра: по горизонтали — частота намагничивающего поля; по вертикали — квадратурная составляющая магнитного потока

нечно длинного цилиндра диаметром 40 мм, изготовленных из материалов с удельной проводимостью 100 тыс. См/м и с проницаемостью материала шара, равной 1000, а проницаемостью материала цилиндра, равной трем. В обоих случаях в статическом режиме проницаемости тела шара и цилиндра были одинаковы. Из рисунков видно, что частотные характеристики этих тел различаются очень существенно, в особенности для мнимой составляющей потока (рис. 12).

Аналогичные, хотя и не столь впечатляющие, результаты получены при сравнительном моделировании эллипсоида и бесконечно длинного цилиндра, но для краткости изложения они здесь не приводятся.

Накладной преобразователь. Классический накладной вихретоковый преобразователь [4, 7, 8] представляет собой плоский круговой виток (или катушку), размещенный над проводящим полупространством параллельно плоскости раздела (рис. 13).

Применительно к практике полупространством можно считать изучаемый объект, размеры которо-

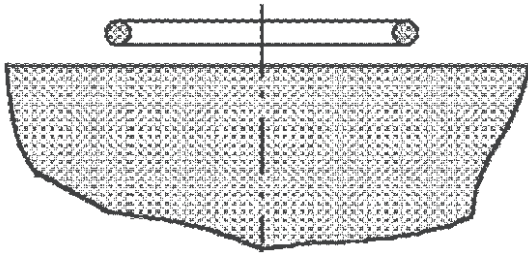


Рис. 13. Накладной вихрековый преобразователь

го велики по сравнению с размерами витка. В виток (или катушку) подается синусоидальный переменный ток, вызывающий в полупространстве вихревые токи и тем самым обуславливающий изменения магнитного потока через виток преобразователя. Эти изменения улавливаются электронной схемой, присоединенной к витку преобразователя, и несут информацию об электромагнитных свойствах полупространства под этим витком.

Если проводящее полупространство (контролируемое изделие) является неферромагнитным, то при поднесении к нему витка преобразователя излучаемое им переменное магнитное поле обусловит появление в полупространстве вихревых токов, магнитное поле которых будет в той или иной степени компенсировать воздействие поля витка. Если виток вплотную прилегает к изделию и первоначальный магнитный поток через его сечение $\vec{\Phi}_0$, то при их соприкосновении результирующий поток через сечение будет равен:

$$\vec{\Phi} = \vec{\Phi}_0 - \vec{\Phi}_{\text{изд}}, \quad (5)$$

где $\vec{\Phi}_{\text{изд}}$ – поток, обусловленный вихревыми токами в изделии.

При малых частотах зондирующего поля, когда индуктивным сопротивлением толщи изделия вихревым токам можно пренебречь, поток $\vec{\Phi}_{\text{изд}}$ сдвинут по фазе относительно потока витка $\vec{\Phi}_0$ на четверть периода. По мере возрастания рабочей частоты сопротивление толщи изделия становится преимущественно индуктивным и сдвиг фазы $\vec{\Phi}_{\text{изд}}$ относительно $\vec{\Phi}_0$ стремится к 180° , т.е. эти потоки компенсируют друг друга. При достаточно большой частоте

$$|\vec{\Phi}_{\text{изд}}| \approx |\vec{\Phi}_0|. \quad (6)$$

Таким образом, в предельном случае во всем диапазоне частот

$$-\vec{\Phi}_0 \leq \vec{\Phi}_{\text{изд}} \leq 0. \quad (7)$$

Если контролируемое изделие является ферромагнитным и частота зондирующего поля близка к нулю, то при поднесении к нему витка преобразователя поток через сечение этого витка возрастает по сравнению с первоначальным. В предельном

случае, когда магнитная проницаемость материала изделия очень велика, результирующий поток может вдвое превысить первоначальный [4, 7]:

$$\Phi \geq 2\Phi_0 = \Phi_0 + \Phi_{\text{изд}}. \quad (8)$$

Это означает, что в классическом накладном вихрековом преобразователе при любой проницаемости материала изделия поток через сечение витка преобразователя, обусловленный намагничиванием изделия от этого витка, не может стать больше Φ_0 .

При неограниченном возрастании частоты зондирующего поля вихревые токи в изделии создадут собственный магнитный поток, который полностью скомпенсирует поток витка преобразователя.

Таким образом, в классическом накладном преобразователе выполняется условие (7).

Условие (8) означает, что проницаемость формы μ_Φ системы «виток накладного преобразователя – полупространство» равна двум. В таком случае проницаемость тела этой системы в статическом режиме

$$\mu_T = \frac{2\mu}{\mu + 1}. \quad (9)$$

Функциональная зависимость (9) иллюстрируется [10] графиком на рис. 14.

Из рис. 14 видно, что при изменении проницаемости материала изделия в 9 раз поток через виток накладного преобразователя изменится лишь на 3,5%, а в области значений проницаемости материала от 200 до 400 – всего на 0,5%.

Отсюда следует, что если проницаемость материала контролируемого изделия (полупространства) существенно больше двух, то ее изменения в значительных пределах практически не повлияют

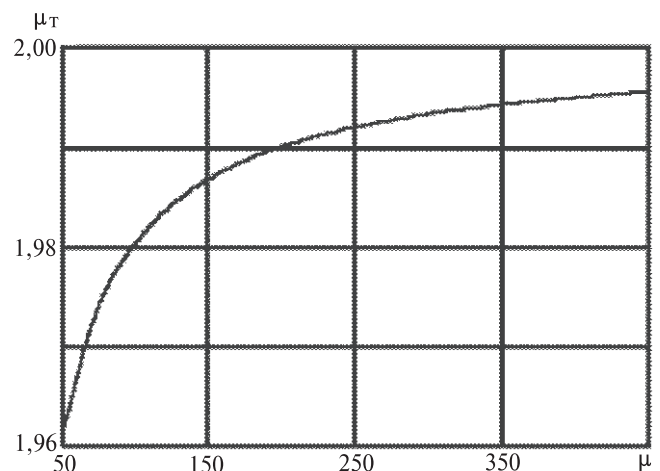


Рис. 14. Проницаемость тела системы «накладной преобразователь – проводящее полупространство» в функции проницаемости полупространства: по горизонтали – проницаемость материала полупространства; по вертикали – проницаемость системы

на работу классического накладного преобразователя, а значит, и не могут им контролироваться.

В нашей расчетной модели классического накладного преобразователя плоский круговой виток с током (средний диаметр 40 мм, сечение проводника $1 \times 1 \text{ мм}^2$) размещался на оси симметрии над круглым проводящим цилиндром диаметром 400 и высотой 100 мм. Расстояние между витком и торцом цилиндра составляло 0,5 мм. Ток через виток 1000 А. Рассчитывались синфазная с намагничивающим полем и квадратурная (сдвинутая по фазе на четверть периода) по отношению к нему составляющие потока вихревых токов изделия $\Phi_{\text{изд}}$ через сечение витка диаметром 40 мм в зависимости от частоты зондирующего поля при заданных значениях удельной проводимости σ и проницаемости μ материала изделия.

Поскольку ставилась задача выяснить равнозначность (или неравнозначность) значений σ и μ , входящих сомножителями в вихретоковый параметр, то расчеты выполнялись при сохранении неизменным произведения $\sigma\mu$.

На рис. 15 приведены результаты расчета действительной (синфазной), а на рис. 16 – мнимой (квадратурной) составляющих потока через виток преобразователя при частотах до 1 МГц*. На рисунках (как и на всех других подобных в данной работе) кривая 1 соответствует $\mu=1000$ и $\sigma=100$ тыс. См/м, кривая 2 – $\mu=100$ и $\sigma=1$ млн См/м и кривая 3 – $\mu=10$ и $\sigma=10$ млн См/м.

В связи с тем, что, как уже указывалось, проницаемость тела системы «виток–изделие» в статическом режиме была практически неизменной (около двух), результаты расчета на проницаемость в данном случае не делились.

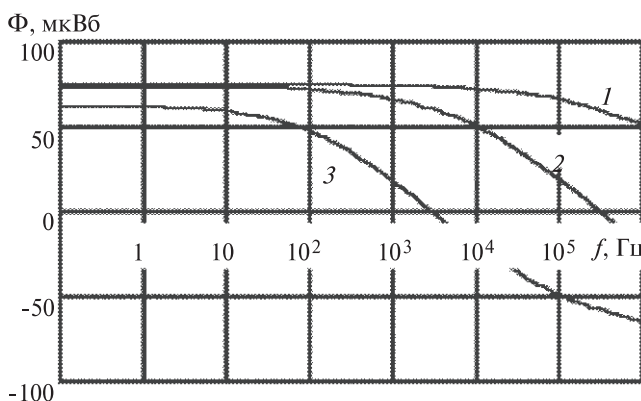


Рис. 15. Синфазная составляющая магнитного потока через виток накладного преобразователя в функции частоты намагничивающего тока: по горизонтали – частота намагничивающего тока; по вертикали – синфазная составляющая потока через виток

* Значения частоты выше 1 МГц не применялись, поскольку в этом случае глубина проникновения поля становилась соизмеримой с размерами ячеек сетки конечных элементов и в результатах моделирования могли появиться ошибки.

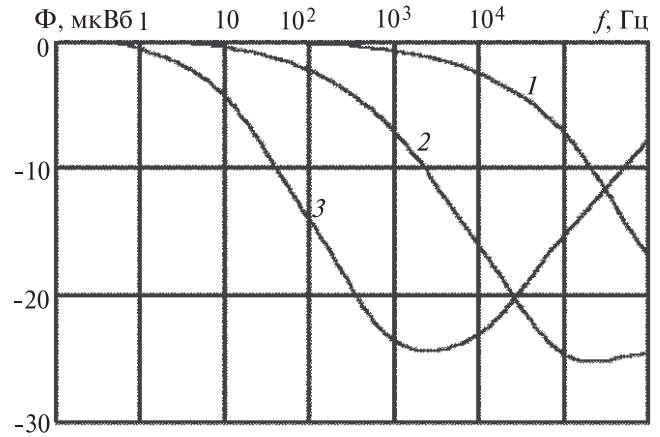


Рис. 16. Квадратурная составляющая магнитного потока через виток накладного преобразователя в функции частоты намагничивающего тока: по горизонтали – частота намагничивающего тока; по вертикали – квадратурная составляющая потока через виток

Из рисунков видно, что несмотря на сохранение неизменным произведения $\sigma\mu$ (вихретокового параметра), наблюдаются значительные различия в ходе частотных зависимостей составляющих потоков (почти на два порядка). Как и следовало ожидать, превалирующую роль при этом играет удельная электропроводность материала, а его проницаемость практически не сказывается.

Чувствительность накладного вихретокового преобразователя к проницаемости материала изделия можно повысить, уменьшив размагничивающий коэффициент системы, для чего необходимо снабдить его полуброневым сердечником из магнитомягкого материала, например феррита, как это показано на рисунке 17.

Предельным случаем такой модификации преобразователя является помещение его витка непосредственно в толщу контролируемого изделия, т.е. в проводящее пространство («погружной преобразователь»). В таком случае силовые линии потока витка полностью замыкаются в материале изделия и размагничивающий фактор отсутствует. Очевид-

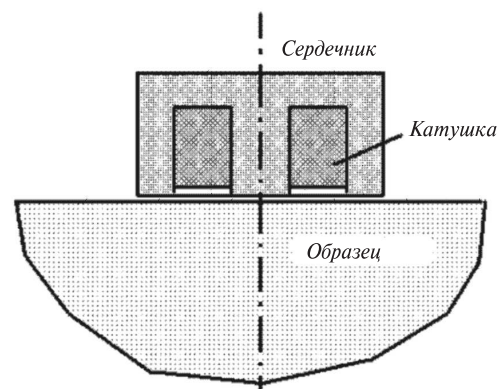


Рис. 17. Накладной преобразователь с замыканием магнитного потока

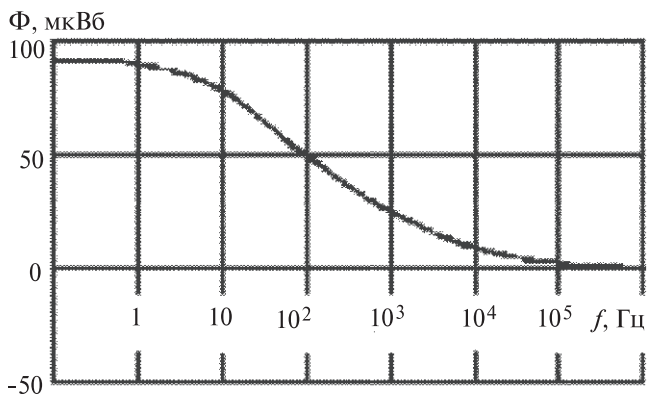


Рис. 18. Синфазная с намагничивающим током составляющая магнитного потока через виток погружного вихретокового преобразователя в функции частоты намагничивающего тока: по горизонтали – частота намагничивающего тока; по вертикали – синфазная составляющая потока через виток

но, при этом магнитная проницаемость материала и его электропроводность снова становятся равнозначными, что и иллюстрируется результатами моделирования на рис. 18 и 19.

Расчеты выполнялись для витка, размеры которого указаны ранее. На обоих рисунках значения потоков приведены к единичной проницаемости.

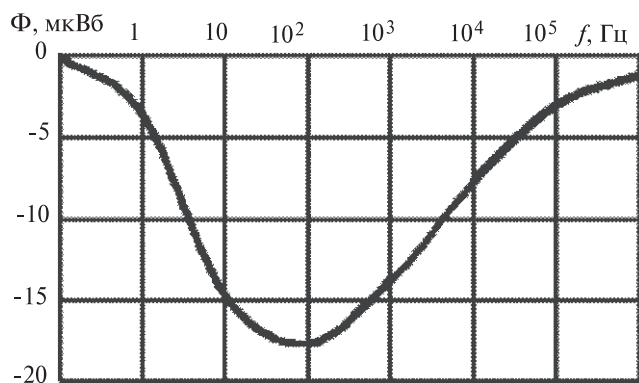


Рис. 19. Квадратурная относительно намагничивающего тока составляющая магнитного потока через виток погружного вихретокового преобразователя в функции частоты намагничивающего тока: по горизонтали – частота намагничивающего тока; по вертикали – квадратурная составляющая потока через виток

Для обеих компонент потока кривые 1, 2 и 3 (в вышеуказанном смысле) слились в одну.

Выводы. 1. Показано, что широко используемый обобщенный (вихретоковый) параметр соответствует своему первоначальному физическому смыслу лишь при отсутствии размагничивающего фактора в магнитной цепи вихретокового преобразователя (как проходного, так и накладного).

2. При наличии разрывов в магнитной цепи (появлении размагничивающего фактора) использование обобщенного (вихретокового) параметра может привести к катастрофическим погрешностям в оценке деталей электромагнитных процессов, происходящих в контролируемом изделии.

3. Широко используемый в электромагнитных расчетах обобщенный (вихретоковый) параметр следует применять лишь в тех случаях, когда это физически оправдано. Во избежание ошибок и недоразумений лучше выполнять компьютерное моделирование процессов по программам, в которые основные параметры процесса (проницаемость, электропроводность и т. п.) вводятся не через указанный параметр, а непосредственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родигин Н.М. Индукционный нагрев стальных изделий токами нормальной частоты. – М.: ГНТТИ, 1950, 250 с.
2. Родигин Н.М., Коробейникова И.Е. Контроль качества изделий методом вихревых токов. – М.: Машгиз, 1958.
3. Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964, 272 с.
4. Шкарлет Ю.М. Некоторые вопросы метода вихревых токов и расчет накладных датчиков. – Сб. «Не разрушающие методы контроля материалов и изделий»/Под ред. проф. С.Т. Назарова. – М.: ОНТИПРИБОР, 1964, с. 382 – 396.
5. Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи. – М.; Л.: Энергия, 1967, 208 с.
6. Реутов Ю.Я., Гобов Ю.Л., Лоскутов В.Е. О возможностях использования программы ELCUT в расчетах по дефектоскопии. – Дефектоскопия, 2002, № 6, с. 34 – 40.
7. Дякин В.В., Сандовский В.А. Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. – М.: Наука, 1981, 136 с.
8. Не разрушающий контроль и диагностика/Под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2003, 656 с.
9. Аркадьев В.К. Электромагнитные процессы в металлах, ч. 1. – М.: НКТП, 1934, 231 с.
10. Реутов Ю.Я., Щербинин В.Е. О комплексной магнитной проницаемости в вихретоковой дефектоскопии. – Дефектоскопия, 2012, № 12, с. 40–48.
11. Бутырин П.А., Дубицкий С.Д., Коровкин Н.В. Использование компьютерного моделирования в преподавании теории электромагнитного поля. – Электричество, 2014, № 10, с. 66–71.
12. Бурцев Г.А. К динамике перемагничивания ферромагнитных стержней конечной длины в слабых магнитных полях. – Дефектоскопия, 1973, № 5, с. 34–42.
13. Реутов Ю.Я. Причины аномалий голографа вихретокового преобразователя. – Дефектоскопия, 2015, № 12, с. 57–67.

[09.09.15]

Автор: Реутов Юрий Яковлевич окончил Уральский государственный университет в 1962 г. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию, посвященную разработке научных основ конструирования индукционных устройств селективного обнаружения оружия. Ведущий научный сотрудник Института физики металлов Уральского отделения РАН (г. Екатеринбург).

A Generalized Eddy Current Parameter: Applicability Boundaries

REUTOV Yurii Yakovlevich (*Institute of Metal Physics, the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia*) – *Leading scientific researcher*

Application of a generalized (eddy-current) parameter in considering electromagnetic processes in conducting bodies is discussed. This parameter is defined as the product of the conducting body's geometrical characteristic, the body's material relative magnetic permeability and its electrical conductivity, and the remagnetization field frequency. Knowing a body's eddy-current parameter one can unequivocally predict how this body will behave in an alternating magnetic field; and vice versa, if the body's behavior in an alternating magnetic field is known, some of its geometrical or physical characteristics can be determined. It is shown by means of computer modeling that application of the eddy-current parameter is correct only with respect to conducting bodies that do not have magnetic poles. In case of open-loop conducting ferromagnetic bodies (with magnetic poles), electromagnetic processes in them can take place with significant variations with the eddy-current parameter remaining unchanged.

Key words: *electromagnetism, conducting bodies, eddy-current parameter, generalized parameter, penetration depth, eddy current, remagnetization frequency, magnetic induction, permeability, electric conductivity*

REFERENCES

1. **Rodigin N.M.** *Induktsyonnyi nagrev stal'nykh izdelii tokami normal'noi chastoty* (Induction heating of steel products normal frequency currents). Moscow, State Scientific-Technical Publ. Hous, 1950, 250 p.
2. **Rodigin N.M., Korobeinikova I.E.** *Kontrol' kachestva izdelii metodom vikhrevykh tokov* (Product quality control eddy current). Moscow, Publ. «Mashgiz», 1958.
3. **Shimoni K.** *Teoreticheskaya elektrotehnika* (Theoretical electrical engineering). Moscow, Publ. «Mir», 1964, 272 p.
4. **Shkarlet Yu.M.** *Sbornik «Nerazrushayushchiye metody kontrolya materialov i izdelii»/Pod red. S.T. Nazarova* (Collection «Non-destructive methods of control of materials and products»/Edit. by S.T. Nazarov). Moscow, Publ. «ONTIPRIBOR», 1964, pp. 382–396.
5. **Lammeraner I., Shtaffl' M.** *Vikhrevye toki* (Eddy currents). Moscow, Leningrad, Publ. «Energiya», 1967, 208 p.
6. **Reutov Yu.Ya., Gbov Yu.L., Loskutov V.E.** *Defektoskopiya – in Russ. (Fault Detection)*, 2002, No. 6, pp. 34–40.
7. **Dyakin V.V., Sandovskii V.A.** *Teoriya i raschet nakladnykh vikhretokovykh preobrazovatelei* (Theory and calculating of overhead eddy converters). Moscow, Publ. «Nauka», 1981, 136 p.
8. **Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika/Pod red. V.V. Klyuyeva** (Non-destructive testing and diagnostic/Edit. by V.V. Klyuyev). Moscow, Publ. «Mashinostroyeniye», 2003, 656 p.
9. **Arkad'yev V.K.** *Elektromagnitnye protsessy v metallakh, ch. 1* (Electromagnetic processes in metals, part 1). Moscow, Publ. «NKTP», 1934, 231 p.
10. **Reutov Yu.Ya., Shcherbinin V.E.** *Defektoskopiya – in Russ. (Fault Detection)*, 2012, No. 12, pp. 40–48.
11. **Butyrin P.A., Dubitskii S.D., Korovkin N.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 10, pp. 66–71.
12. **Burtsev G.A.** *Defektoskopiya – in Russ. (Fault Detection)*, 1973, No. 5, pp. 34–42.
13. **Reutov Yu.Ya.** *Defektoskopiya – in Russ. (Fault Detection)*, 2015, No. 12, pp. 57–67.

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать (желательно и на английском языке):

- полные имена и отчества всех авторов;
- какой факультет, какого вуза и когда закончил;
- когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;
- место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять реферат (не менее 100 слов) на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.