

## Глубина проникновения в изделие поля накладного вихретокового преобразователя

РЕУТОВ Ю.Я.

Магнитное поле, создаваемое намагничивающим витком накладного вихретокового преобразователя, существенно неоднородно как в окружающем пространстве, так и в проводящем объекте исследования. По этой причине понятие глубины проникновения магнитного поля в проводящий объект, введенное для случая плоской электромагнитной волны, падающей отвесно на проводящее полупространство, нуждается в уточнении. В предлагаемой статье посредством компьютерного моделирования исследуются особенности проникновения магнитного поля витка с током накладного вихревого преобразователя в проводящее полупространство в широком диапазоне частот. Показано, что на малых частотах убывание магнитного поля с глубиной непосредственно под проводником намагничивающего витка и в стороне от него существенно различно. Только на достаточно высоких частотах классическая формула глубины проникновения выполняется независимо от радиальной координаты точки наблюдения. Не обнаружено зависимости глубины проникновения от радиуса витка накладного преобразователя. Моделирование выполнено в программе ELCUT, использующей метод конечных элементов.

Ключевые слова: электромагнитное поле, глубина проникновения, вихретоковый преобразователь, электромагнитная волна, проводящее полупространство, программа ELCUT, метод конечных элементов, компьютерное моделирование

Электромагнитная волна [1, 2], падающая отвесно на плоское проводящее полупространство, затухает в  $e$  раз, проникнув на глубину

$$a = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \mu \sigma \omega}}, \tag{1}$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость материала полупространства;  $\sigma$  — его удельная электрическая проводимость;  $\omega$  — циклическая частота поля волны.

При этом векторы электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей ортогональны друг другу и вместе ортогональны направлению распространения волны  $\vec{S}$  (см. рис. 1), т.е. в нашем случае параллельны плоскости, отделяющей проводящее полупространство от непроводящего.

Поскольку по умолчанию волновое сопротивление проводящего полупространства постоянно и не зависит от координат, постольку на расстоянии от поверхности в  $a$  раз уменьшаются напряженности как магнитного, так и электрического полей.

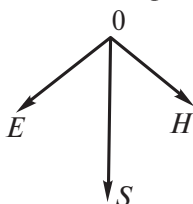


Рис. 1. Падение плоской электромагнитной волны на проводящее полупространство

Длина волны в проводящем полупространстве

$$\lambda = 2\pi a, \tag{2}$$

на таком расстоянии фаза колебания изменяется на  $360^\circ$ , а его амплитуда падает в 534 раза [1].

При анализе процессов в проходном вихретоковом преобразователе, представляющем собой бесконечно длинный соленоид с также бесконечным цилиндрическим проводящим телом радиусом  $R$  внутри, используется то обстоятельство, что при соблюдении условия

$$R \gg a \tag{3}$$

кривизной образующей цилиндрического проводящего тела можно пренебречь. В таком случае вполне корректно рассматривать проникновение магнитного поля соленоида в проводящий цилиндр как проникание плоской электромагнитной волны в полупространство [3] и глубину проникновения вычислять по (1).

Очевидно, в силу однородности намагничивающего поля (создаваемого соленоидом) и его круговой симметрии результирующее магнитное поле, проникающее в проводящий цилиндр, будет зависеть только от радиальной координаты и всегда будет параллельно продольной оси проходного преобразователя. Электрическая компонента волны будет перпендикулярна этой оси и параллельна касательной к образующей цилиндра.

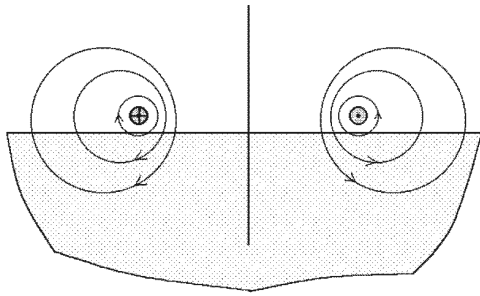


Рис. 2. Накладной вихретоковый преобразователь

То же самое происходит и при рассмотрении прохождения электрического тока по цилиндрическому проводнику [2]. Здесь электрическое поле направлено вдоль проводника, магнитное — вдоль окружности, а волна распространяется по радиусам.

Совсем иная картина должна иметь место в накладном вихретоковом преобразователе (см. рис. 2), в идеализированном случае представляющем собой круговой виток с переменным током над проводящим полупространством.

Виток накладного преобразователя создает изначально неоднородное магнитное поле, зависящее как от осевой, так и от радиальной координат точки наблюдения. В области проводящего полупространства, прилегающей к оси симметрии преобразователя, основная компонента намагничивающего поля направлена вертикально и принципиально не может являться частью волны, пришедшей из верхнего полупространства (рис. 1). Радиальная компонента намагничивающего поля является преобладающей лишь в узкой кольцевой зоне непосредственно под проводником витка преобразователя. Строго говоря, только в этой зоне и имело бы физический смысл выражение (1). Однако в указанной зоне радиальная компонента магнитного поля изначально резко неоднородна. Она убывает с глубиной по закону, близкому к гиперболическому, как от прямого проводника с током.

Если высота размещения витка преобразователя над полупространством много больше радиуса витка, радиальная компонента его магнитного поля вообще ничтожна. Возможно, именно по указанным причинам в работах по теории накладного преобразователя глубина проникновения поля в проводящее полупространство практически не рассматривалась [4–6].

В [7] на с. 414 (а также в [8], с. 60) делается попытка применить понятие глубины проникновения и к накладному преобразователю путем модификации формулы (1). Для этого в [7 и 8] используется общеизвестный безразмерный вихретоковый параметр

$$\beta = R\sqrt{\omega\mu_0\mu\sigma}. \quad (4)$$

Создав комбинацию символов

$$a = \frac{R\sqrt{2}}{\beta}, \quad (5)$$

где  $R$  — радиус витка преобразователя, авторы [7 и 8] утверждают, что в этой комбинации им удалось связать глубину проникновения с размерами преобразователя. Однако не составляет никакого труда установить тождественность выражений (1) и (5) с учетом (4).

По указанным причинам вопрос о глубине проникновения поля вихретокового преобразователя в проводящее изделие остается не вполне ясным.

Цель предлагаемой работы — изучить распределение магнитного поля на границе раздела проводящего полупространства под витком накладного преобразователя, т.е. на его поверхности, и убывание этого поля с глубиной на разных частотах.

Заметим, что в данном случае нас интересует лишь распределение магнитного поля намагничивающего витка в полупространстве под ним. Реакция полупространства на это поле, выражающаяся в изменении его топографии над проводящим полупространством, здесь не рассматривается. Частично она была уже рассмотрена в [9].

**Выбор метода исследования.** Со времён Ньютона в мировой науке определились два основных пути открытия и изучения законов природы: экспериментальный и аналитический. Экспериментальный путь традиционно считается наиболее объективным. Однако, как показывает практика [10], иногда некорректные постановка эксперимента и истолкование его результатов чреватые серьёзными ошибками в познании истины. Аналитический путь, сводящийся к чисто математическому описанию природных процессов с использованием ограниченного числа уравнений, связывающих между собой физические параметры (например, уравнений Максвелла), имеет свои ограничения. Они обусловлены как несовершенством используемого математического аппарата («не берущиеся интегралы», ряд вынужденных допущений и тому подобное), так и неполным набором учитываемых физических факторов (об этом см., например, в [9]).

Не так давно с появлением мощных вычислительных систем возник и интенсивно развивается путь программного численного моделирования физических процессов с использованием метода конечных элементов [11]. Разбиение (дискретизация) области пространства, в которой развивается изучаемый процесс, на конечное (до сотен миллионов) число ячеек с соблюдением в местах их соприкосновения друг с другом граничных условий Дирихле и Неймана позволяет при приемлемых затратах машинного времени вычислять характери-

стики физических полей, создаваемых моделируемыми объектами, геометрическая форма которых не поддается аналитическому описанию, порой с учётом нелинейностей, что в аналитических методах зачастую невозможно.

В отличие от результатов, получаемых аналитическим путём, результаты численного моделирования справедливы лишь для данного конкретного моделируемого объекта с конкретно заданными начальными и граничными характеристиками (форма, размеры, проводимость, проницаемость, используемая частота), и в этом они схожи с результатами, получаемыми при выполнении реального физического эксперимента.

Как известно, корректность аналитического описания какого-либо физического процесса проверяется совпадением результатов вычислений с данными, полученными экспериментальным путём, при использовании в эксперименте объекта, обладающего простейшей (с точки зрения математического описания) геометрической формой (шар, бесконечно длинный цилиндр, полупространство). Получение удовлетворительных совпадений в ряде таких «контрольных точек» вполне обоснованно считается доказательством корректности предлагаемого аналитического описания процесса (или, наоборот, выполненного эксперимента).

В настоящее время существует целый ряд сертифицированных программных пакетов численного моделирования физических процессов [11, 12], показывающих хорошее совпадение результатов их применения с полученными экспериментальным путём. В связи с этим можно считать, что наступила пора использования численного моделирования по таким программным пакетам вместо постановки реальных экспериментов в случаях, когда такие эксперименты сложны, дороги или реально невыполнимы. В качестве реального примера такого применения можно привести работу [9].

Разумеется, что такой путь исследования предполагает соблюдение определённой осторожности как в постановке задач, так и в трактовке полученных результатов. Однако пренебрежение им вряд ли будет оправданным.

В данном исследовании выполним численное моделирование работы накладного вихретокового преобразователя в программе ELCUT 5.1 [11, 12] методом конечных элементов. Как уже констатировалось ранее [9], указанный программный продукт, созданный с использованием базовых уравнений электродинамики (Максвелла, Лапласа, Пуассона и т.д.) с автоматическим учётом граничных условий Дирихле и Неймана на поверхностях изучаемых объектов и в сочетании с использованием встроенного современного вычислительного аппарата, позволяет осуществлять численное моделирование

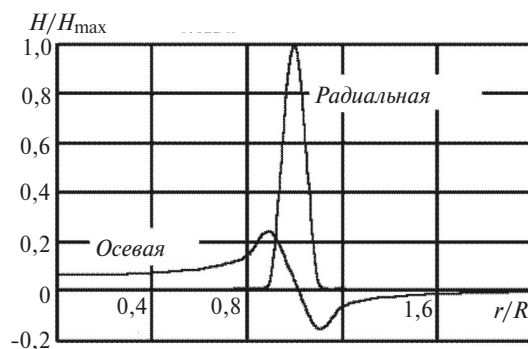
процессов намагничивания постоянными гармоническими переменными и импульсными магнитными полями двумерных и осесимметричных предметов.

Исследователю достаточно задать форму и размеры исследуемого объекта, размеры и форму области моделирования, а также электрические и магнитные свойства того и другого, и программа с высокой скоростью вычислит десятки электромагнитных параметров. Пользователю остаётся только выбрать из них интересующие его на данном этапе исследования.

**Параметры объекта моделирования.** Накладной преобразователь моделируем в виде проводящего кругового витка средним диаметром 100 мм сечением  $1 \times 1$  мм, размещенного на расстоянии 0,5 мм от торца проводящего короткого кругового цилиндра диаметром 1000 и высотой 450 мм. Сопоставление размеров проводящего цилиндра с размерами намагничивающего витка даёт нам право считать цилиндр аналогом проводящего полупространства. Амплитуда синусоидального тока в витке 1 А, удельная электропроводность цилиндра 10 млн См/м. Проницаемость цилиндра задаем равной единице (диамагнитный цилиндр) и считаем ее не зависящей от напряженности намагничивающего поля.

**Поле на границе проводящего полупространства.** На рис. 3 изображены зависимости радиальной и осевой компонент магнитного поля на поверхности торца проводящего цилиндра под витком преобразователя от радиальной компоненты точки наблюдения при нулевой рабочей частоте.

Из рисунка видно, что на поверхности при нулевой частоте преобладающей является радиальная компонента поля, но она сосредоточена в узком кольце внутренним радиусом  $0,95R$  и внешним  $1,05R$  (по убыванию в  $e$  раз), т.е. на площади  $0,628R^2$ . В то же время осевая компонента поля, составляющая около 0,08 радиальной, сосредоточена на площади, почти в пять раз большей (по тому же критерию).



**Рис. 3.** Компоненты магнитного поля на поверхности полупространства в статическом режиме: по горизонтали — радиальная координата точки наблюдения в единицах радиуса витка; по вертикали — напряженность компоненты магнитного поля, нормированная к максимуму радиальной компоненты

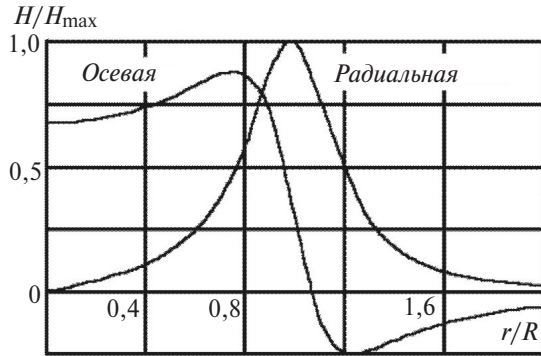


Рис. 4. Компоненты магнитного поля в статическом режиме на глубине 10 мм: по горизонтали – радиальная координата точки наблюдения в единицах радиуса витка; по вертикали – напряженность компоненты магнитного поля, нормированная к максимуму радиальной компоненты

На рис. 4 приведены аналогичные зависимости для компонент статического поля на глубине 10 мм (от поверхности). Из рисунка видно, что уже на расстоянии от плоскости витка, составляющем 20% его радиуса, аксиальная и радиальная компоненты поля становятся соизмеримы друг с другом. На большем удалении от плоскости витка преобладающей будет аксиальная компонента намагничивающего поля.

При переходе от статического поля к гармоническому переменному и аксиальная и радиальная компоненты намагничивающего поля в равной степени порождают в проводящем полупространстве кольцевые вихревые токи, параллельные плоскости раздела. Однако вектор электромагнитной волны, обусловленной аксиальной компонентой магнитного поля, должен распространяться не вглубь проводящего полупространства, а в стороны от витка в радиальных направлениях, параллельно плоскости раздела.

По мере повышения рабочей частоты совершается переход от статической картины проникновения поля в проводящее полупространство к чисто волновой. Очевидно, имеется определенный диапазон значений рабочей частоты, в котором обе эти картины сосуществуют (а, может быть, и конкурируют).

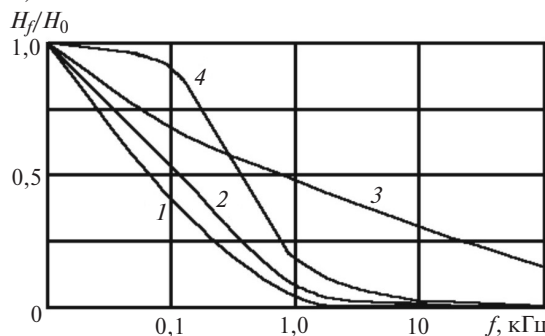


Рис. 5. Аксиальная компонента поля на поверхности раздела в зависимости от частоты при заданных координатах точки наблюдения: по горизонтали – частота намагничивающего поля; по вертикали – напряженность аксиальной компоненты, нормированная к её значению при нулевой частоте; 1 –  $r = 0,1R$ ; 2 –  $r = 0,5R$ ; 3 –  $r = R$ ; 4 –  $r = 1,5R$

На рис. 5 показано, как (по результатам моделирования) изменяется аксиальная компонента поля на поверхности раздела от его частоты на разных расстояниях  $r$  от оси симметрии преобразователя.

На рис. 6 показано, как с частотой намагничивающего поля меняется его радиальная компонента на поверхности раздела; обозначения те же, что и на рис. 5. Из рисунка видно, что в отличие от аксиальной, радиальная компонента поля на поверхности раздела в стороне от проводника витка может нарастать с частотой (в десятки раз). Имеется экстремум зависимости роста компоненты от частоты. При бесконечном нарастании рабочей частоты радиальная компонента на заданном радиусе стремится к значению, вдвое превышающему такое на нулевой частоте.

На рис. 7 показано, почему это происходит. Поле, создаваемое намагничивающим витком преобразователя, содержит аксиальную и радиальную компоненты. По законам зеркального отображения виртуальный виток вихревого тока в проводящем полупространстве, обусловленный полем намагничивающего витка, создает поле, аксиальная компонента которого при бесконечной частоте в точности скомпенсирует аксиальную компоненту поля намагничивающего витка. В то же время радиаль-

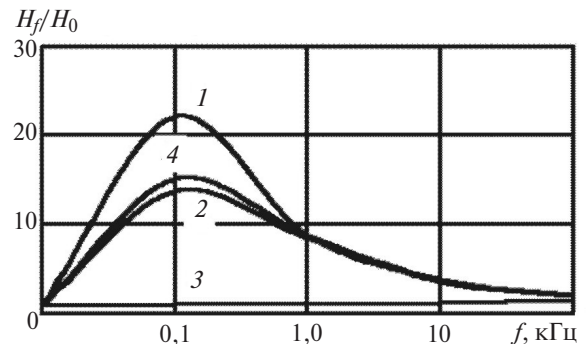


Рис. 6. Радиальная компонента поля на поверхности раздела в зависимости от частоты при заданных координатах точки наблюдения: по горизонтали – частота намагничивающего поля; по вертикали – напряженность радиальной компоненты, нормированная к её значению при нулевой частоте; 1 –  $r = 0,1R$ ; 2 –  $r = 0,5R$ ; 3 –  $r = R$ ; 4 –  $r = 1,5R$

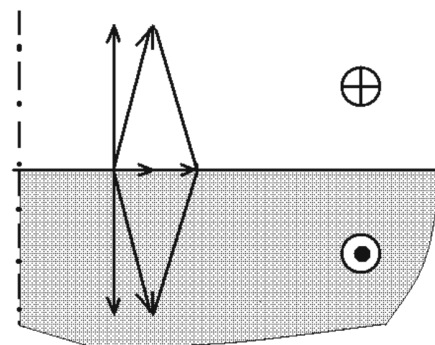


Рис. 7. Сложение полей реального и зеркально отображенного в проводящем полупространстве намагничивающих витков

ная компонента поля вихревого тока суммируется с радиальной компонентой поля намагничивающего витка и в пределе ее удваивает. Тот факт, что в некотором диапазоне рабочих частот радиальная компонента результирующего поля превышает первоначальную (статическую) в десятки раз (см. рис. 6), объясняется, по всей вероятности, изменением глубины расположения виртуального витка вихревого тока в проводящем полупространстве. С повышением рабочей частоты этот виток приближается к границе раздела.

Непосредственно под проводником витка преобразователя радиальная компонента на границе раздела монотонно нарастает с ростом частоты до удвоенного значения. Тот факт, что радиальная компонента поля с ростом частоты не становится меньше своего значения при нулевой частоте, в то время как аксиальная с ростом частоты стремится к нулю, свидетельствует о том, что с ростом частоты поле на поверхности «выстраивается» вдоль границы раздела и принимает радиальное направление.

Указанное обстоятельство можно интерпретировать и по-другому. Вернемся к выражению (2) длины электромагнитной волны в проводящем полупространстве. Как известно, длина волны связана со скоростью распространения волны  $V$  и частотой электромагнитных колебаний  $f$  выражением

$$V = \lambda f \quad (6)$$

или, учитывая  $\omega = 2\pi f$ ,

$$V = \frac{\omega \lambda}{2\pi}. \quad (7)$$

Тогда с учетом (1) и (2)

$$V = \sqrt{\frac{4\pi f}{\mu_0 \mu \sigma}}. \quad (8)$$

Ниже приведены рассчитанные по (8) значения скорости волны в полупространстве с  $\mu=1$  и  $\sigma=5,5 \cdot 10^7$  См/м (медь) при различных частотах:

частота	1 Гц	10 Гц	100 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц
скорость, м/с	0,43	1,35	4,3	13,5	43	135	430

Результаты расчета для ферромагнитного полупространства с  $\mu=200$  и  $\sigma=10^7$  См/м (сталь):

частота	1 Гц	10 Гц	100 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц
скорость, м/с	0,071	0,224	0,71	2,24	7,1	22,4	71

Из приведенных результатов расчета видно, что скорость распространения электромагнитной волны в проводящем полупространстве составляет от единицы до сотен метров в секунду и пренебрежи-

мо мала по сравнению со скоростью распространения волны в воздухе или вакууме. А в таком случае, как справедливо подмечено в [1], электромагнитная волна должна распространяться в проводящем полупространстве практически перпендикулярно плоскости раздела, независимо от угла ее падения. С другой стороны, практически одинаковый ход кривых изменения компонент поля на поверхности в зависимости от частоты (рис. 5 и 6) как для области  $r < R$ , так и для  $r > R$ , наводит на мысль, что радиус витка не должен существенно влиять на глубину проникновения поля, в особенности, когда она мала по сравнению с радиусом.

**Поле на глубине.** Возникают вопросы: что называть глубиной проникновения поля под накладным преобразователем? С чем сравнивать поле на глубине? Является ли зависимость убывания поля с глубиной экспоненциальной? И зависит ли глубина проникновения поля от радиуса витка преобразователя? Ведь рис. 3–5 показывают, что на самой поверхности раздела напряженность поля меняется гораздо больше, чем в  $e$  раз. В таком случае в числе возможных вариантов вполне резонно предложить в качестве глубины проникновения поля на данной частоте глубину, на которой индукция поля уменьшается в  $e$  раз по сравнению с ее значением при нулевой частоте.

Для поиска ответа на эти вопросы смоделируем проникновение магнитного поля в торец нашего цилиндра, а затем сравним результаты моделирования с рассчитанными по классической формуле (1).

На рис. 8 показано, как убывает модуль вектора магнитного поля с глубиной на частоте 100 Гц. Расчеты выполнялись на расстояниях от оси симметрии, равных 5, 25, 50 и 75 мм (при радиусе витка 50 мм).

Из рисунка видно, что наиболее интенсивно поле убывает с глубиной непосредственно под проводником витка преобразователя. Это и неудивительно, поскольку на малых частотах (и в статическом режиме) закон убывания поля близок к ги-

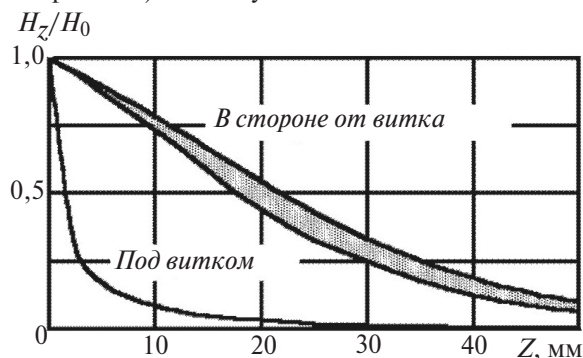


Рис. 8. Убывание модуля вектора магнитного поля с глубиной на частоте 100 Гц при вариациях радиальной координаты точки наблюдения: по горизонтали — расстояние от поверхности раздела (глубина); по вертикали — напряжённость поля, нормированная к её значению на поверхности

перболическому (как от прямого проводника с током), а на высоких частотах к этому убыванию прибавляется убывание по экспоненте от поверхностного эффекта [8]. В стороне от проводника витка (как во внутреннюю, так и во внешнюю стороны) поле убывает гораздо медленнее и практически одинаково. Непосредственно под проводником витка оно убывает в  $e$  раз на глубине 2,2 мм, а в стороне от него на глубине 25 мм.

Аналогичные зависимости были рассчитаны для частот 1, 10 и 100 кГц. Как и следовало ожидать, по мере повышения рабочей частоты кривые спада поля в стороне от проводника витка и непосредственно под ним сближаются и на частоте 100 кГц практически совпадают.

В табл. 1 приведены значения глубины проникновения, полученные по результатам моделирования (снижение поля в  $e$  раз) и рассчитанные по (1).

Таблица 1

Расчет	Значения глубины (мм) при частоте (кГц)			
	0,1	1	10	100
По классической формуле	15,8	5	1,58	0,5
Под проводником витка	2,2	1,8	1,2	0,55
В стороне от проводника	25	6	1,7	0,6

Из таблицы видно, что с рассчитанными по классической формуле лучше совпадают результаты моделирования поля в стороне от проводника витка преобразователя. Поле под проводником при малых частотах убывает с глубиной гораздо быстрее, чем это предсказывается классической формулой. Лишь на больших частотах графики проникновения поля вглубь изделия под проводником витка и в стороне от него сливаются в один.

На рис. 9 показано, как меняется поле непосредственно под проводником витка преобразова-

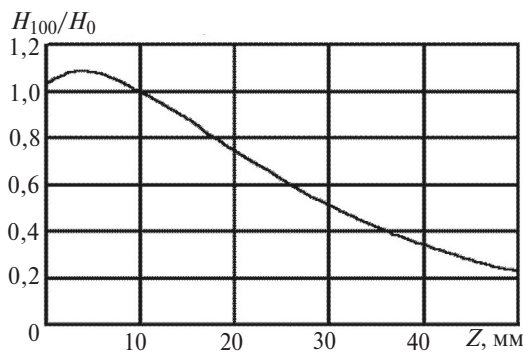


Рис. 9. Изменение модуля напряженности магнитного поля частотой 100 Гц под проводником намагничивающего витка накладного преобразователя от глубины точки наблюдения по сравнению с его значением в статическом режиме: по горизонтали — расстояние от поверхности (глубина); по вертикали — отношение напряженности поля на частоте 100 Гц к её значению при нулевой частоте

теля с глубиной на нулевой частоте и на частоте 100 Гц.

Из рисунка видно, что до глубины примерно 20 мм ход убывания поля на частоте 100 Гц практически совпадает с ходом убывания статического поля.

**Влияние радиуса намагничивающего витка преобразователя.** Для выяснения возможного влияния радиуса намагничивающего витка накладного преобразователя на проникновение его магнитного поля в проводящее полупространство, моделировались круговые витки средними радиусами 10, 20 и 50 мм, сечением  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup> на расстоянии 0,5 мм от торца описанного выше проводящего цилиндра. Ток в витке составлял 1 А. На рис. 10 показаны результаты моделирования при частоте 100 Гц.

На этом рисунке изображены кривые спада поля с глубиной непосредственно под проводником витка преобразователя для радиусов 10, 20 и 50 мм. Как видно из рисунка, все три кривые слились в одну. Такой результат вполне объясним, поскольку, как отмечалось ранее, закон убывания поля непосредственно под витком близок к закону убывания поля от прямого проводника с постоянным током. Точно такой же результат получен и на частоте 1 кГц.

На рис. 11–13 показано, как убывает поле с глубиной на расстояниях от оси симметрии преобразователя, равных половине радиуса витка. Графики рассчитаны для радиусов витка 10, 20 и 50 мм; рис. 11 рассчитан для рабочей частоты 10 Гц, рис. 12 и 13 — для частот 1 и 10 кГц соответственно.

Как видим, в режиме, близком к статическому (рис. 11), убывание поля с глубиной в стороне от проводника витка для преобразователей с разными радиусами соответствует законам геометрического подобия — чем меньше радиус витка, тем меньше глубина проникновения поля. С повышением же рабочей частоты четкой связи с радиусом витка не наблюдается. На частоте 10 кГц (рис. 13) происходит даже рост глубины проникновения с уменьшением радиуса витка. В целом же можно конста-

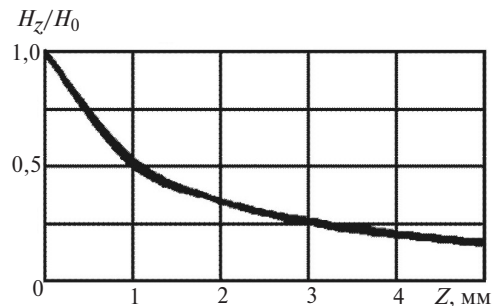


Рис. 10. Убывание поля с глубиной наблюдения непосредственно под проводником витка накладного преобразователя при радиусах витков 10, 20 и 50 мм: по горизонтали — расстояние от поверхности раздела (глубина); по вертикали — напряженность поля частотой 100 Гц, нормированная к напряженности на нулевой частоте

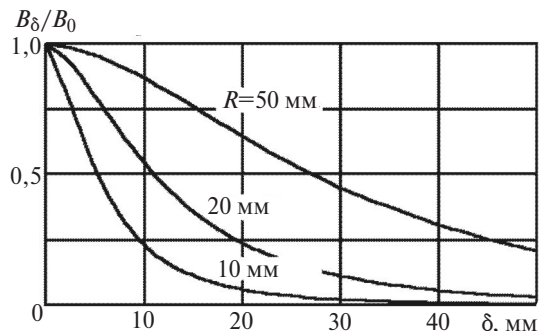


Рис. 11. Убывание индукции поля с глубиной при расстояниях точки наблюдения от оси симметрии, составляющих половину радиуса намагничивающего витка при частоте 10 Гц: по горизонтали — глубина расположения точки наблюдения; по вертикали — отношение индукции на данной глубине к её значению на поверхности

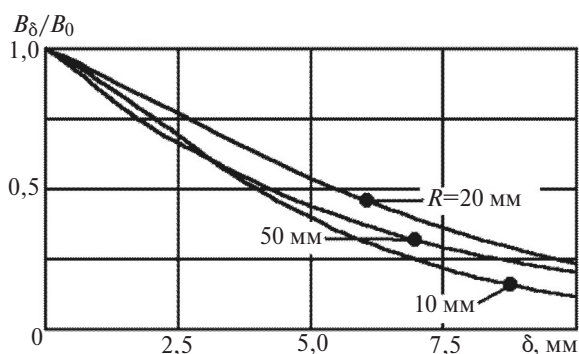


Рис. 12. Убывание индукции поля с глубиной при расстояниях точки наблюдения от оси симметрии, составляющих половину радиуса намагничивающего витка при частоте 1 кГц: по горизонтали — глубина расположения точки наблюдения; по вертикали — отношение индукции на данной глубине к её значению на поверхности

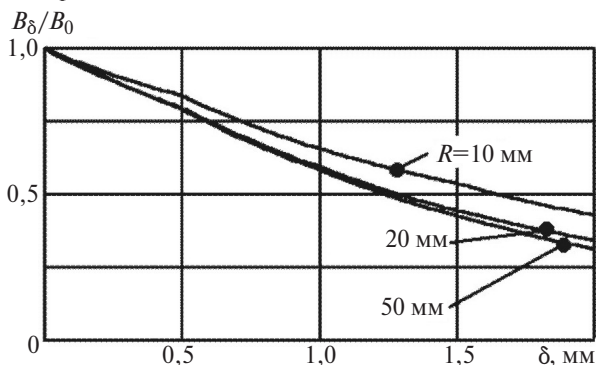


Рис. 13. Убывание индукции поля с глубиной при расстояниях точки наблюдения от оси симметрии, составляющих половину радиуса намагничивающего витка при частоте 10 кГц: по горизонтали — глубина расположения точки наблюдения; по вертикали — отношение индукции на данной глубине к её значению на поверхности

тировать, что при значениях частоты, на которых накладной преобразователь является действительно вихретоковым, зависимости глубины проникновения его поля в изделие от радиуса витка не выявлено.

**Проникновение поля удаленного витка.** Для случая, когда поле витка практически перпендикулярно плоскости намагничиваемого полупространства, выполнено моделирование для вышеописанного витка с током радиусом 50 мм, расположенного на

высоте 100 мм от поверхности изделия. В статическом режиме угол падения магнитного поля на изделие составлял от  $90^\circ$  на оси симметрии до  $52^\circ$  при удалении от неё на 75 мм.

В табл. 2 приведены результаты моделирования проникновения осевой и радиальной компонент магнитного поля, а также модуля его вектора в целом непосредственно под витком (на радиусе 50 мм). Там же приведены значения глубины проникновения, рассчитанные по классической формуле (1).

Таблица 2

Расчет	Значения глубины (мм) при частоте (кГц)			
	0,01	0,1	1	10
По классической формуле	50	15,8	5	1,58
Аксиальная компонента	36	14,7	4,8	1,5
Радиальная компонента	32,5	14,3	4,8	1,7
Вектор, мм	35	16	4,9	1,7

Из таблицы видно, что обе компоненты магнитного поля убывают с глубиной совершенно синхронно и в соответствии с классической формулой.

В табл. 3 представлены результаты расчетов убывания с глубиной вектора Умова—Пойнтинга. Поскольку этот вектор является произведением электрической компоненты волны на магнитную, а волновое сопротивление проводящего полупространства не зависит от координаты, постольку убывание напряженности магнитного поля в  $e$  раз соответствует убыванию вектора волны в  $e^2$  раз. Именно таким образом определялась глубина проникновения вектора Умова—Пойнтинга.

Таблица 3

Расчет	Значения глубины (мм) при частоте (кГц)			
	0,01	0,1	1	10
По классической формуле	50	15,8	5	1,58
Вектор Умова—Пойнтинга	38	16	5,5	1,9

При расчетах на удалениях от оси симметрии в 10, 20, 50 и 75 мм понижение значений вектора Умова—Пойнтинга оказалось одинаковым, а его направление с ошибкой не более  $\pm 3^\circ$  совпало с нормалью к границе раздела полупространства. Это означает, что вектор электромагнитной волны и в случае удаления намагничивающего витка от проводящего полупространства параллелен оси симметрии преобразователя, а фронт волны параллелен границе раздела.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорюфеев А.Л. Неразрушающие испытания методом вихревых токов. — М.: Оборонгиз, 1961, 158 с.
2. Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи. — М.; Л.: Энергия, 1967, 208 с.
3. Роди́гин Н.М., Коробейникова И.Е. Контроль качества изделий методом вихревых токов. — М.: Машгиз, 1958.
4. Шкарлет Ю.М. Некоторые вопросы теории метода вихревых токов и расчет накладных датчиков. В сб.: Неразрушающие методы контроля материалов и изделий/Под ред. проф. С.Т. Назарова. — М.: ОНТИПРИБОР, 1964, с. 382 — 396.
5. Дякин В.В., Сандовский В.А. Теория и расчет накладных вихревых преобразователей. — М.: Наука, 1981, 136 с.
6. Дякин В.В., Сандовский В.А. Задачи электродинамики в неразрушающем контроле. — Екатеринбург: УрО РАН, 2008, 390 с.
7. Неразрушающий контроль, т. 2/Под ред. В.В. Клюева, — М.: Машиностроение, 2005, 688 с.
8. Герасимов В.Г., Останин Ю.Я., Покровский А.Д. и др. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами. — М.: Энергия, 1978, 215 с.
9. Реутов Ю.Я. Обобщённый вихревой параметр, границы применимости. — Электричество, 2016, № 7, с. 42–50.
10. Реутов Ю.Я. Причины аномалий годографа вихревого преобразователя. — Дефектоскопия, 2015, № 12, с. 57–67.
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. Реутов Ю.Я., Гобов Ю.Л., Лоскутов В.Е. О возможностях использования программы ELCUT в расчётах по дефектоскопии. — Дефектоскопия, 2002, № 6, с. 34–40.

[28.11.2016]

*А в т о р: Реутов Юрий Яковлевич окончил в 1962 г. Уральский государственный университет им. А.М. Горького по специальности «физика магнитных явлений». В 1992 г. Защитил докторскую диссертацию. Ведущий научный сотрудник Института физики металлов УрО РАН, Екатеринбург.*

Elektrichestvo, 2018, No. 4, pp. 50–57

DOI:10.24160/0013-5380-2018-4-50-57

## Laid-on Eddy Current Transducer Field Penetration Depth into a Studied Object

REUTOV Yurii Ya. (Institute for Metal Physics of the Ural branch Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia) — Leading Scientific Researcher, Dr. Sci. (eng.)

*The magnetic field induced by the magnetizing turn of a laid-on eddy current transducer is essentially nonuniform both in the surrounding space and in the studied conducting object. In view of this circumstance, the notion of magnetic field penetration depth into a conducting object that has been introduced for the case of a flat electromagnetic wave normally striking a conducting half-space needs refinement. The article presents an investigation, by means of computer simulation, of the specific features pertinent to the way in which the magnetic field induced by a laid-on eddy current transducer's turn with a current through it penetrates into a conducting half-space in a wide frequency band. It is shown that at low frequencies, the patterns in which the magnetic field intensity decreases with depth directly under the magnetizing turn conductor and aside on it differ considerably from each other. The classic penetration depth formula holds independently on the observation point's radial coordinate only at sufficiently high frequencies. The investigation has not revealed any dependence of the penetration depth on the laid-on transducer's turn radius. The simulation was carried out in the ELCUT computer program, which uses the finite element method.*

**Key words:** *electromagnetic field, penetration depth, eddy current transducer, electromagnetic wave, conducting half-space, magnetic permeability, conductivity, ELCUT computer program, finite element method, computer simulation*

## REFERENCES

1. Dorofeyev A.L. *Nerazrushayushchiye ispytaniya metodom vikhrevykh tokov* (Non-destructive eddy current testing). Moscow, Publ. «Oborongiz», 1961, 158 p.
2. Lammeran, Shtaff' M. *Vikhrevye toki* (Eddy currents). Moscow; Leningrad, Publ. «Energia», 1967, 208 p.
3. Rodigin N.M., Korobeinikova I.Ye. *Kontrol' kachestva izdelii metodom vikhrevykh tokov* (Quality control of products by eddy current method). Moscow, Mashgiz, 1958.
4. Shkarlet Yu.M. *Sbornik «Nerazrushayushchiye metody kontrolya materialov i izdelii/Pod red. S.T. Nazarova* (The collection «Non-destructive testing of materials and products / Edit. by S. T. Nazarov). Moscow, Publ. ONTIPRIBOR, 1964, pp. 382 — 396.
5. Dyakin V.V., Sandovskii V.A. *Teoriya i raschet nakladnykh vikhretokovykh preobrazovatelei* (Theory and calculation of overhead eddy current converters). Moscow, Publ. «Nauka», 1981, 136 p.
6. Dyakin V.V., Sandovskii V.A. *Zadachi elektrodinamiki v nerazrushayushchem kontrole* (Problems of electrodynamics in non-destructive testing). Ekaterinburg, Ural branch of the Russian Academy of Sciences, 2008, 390 p.
7. *Nerazrushayushchii kontrol'. Spravochnik, tom 2/Pod red. V.V. Klyuyeva* (Nondestructive testing. Handbook, vol. 2/Edit. by V.V. Klyuyev). Moscow, Publ. «Mashinostroyeniye», 2005, 688 p.
8. Gerasimov V.G., Ostanin Yu.Ya., Pokrovskii A.D. *Nerazrushayushchii kontrol' kachestva izdelii elektromagnitnymi metodami* (Non-destructive quality control of products by electromagnetic methods). Moscow, Publ. «Energia», 1978, 215 p.
9. Reutov Yu.Ya. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 7, pp. 42–50.
10. Reutov Yu.Ya. *Defektoskopiya — in Russ. (Defectoscopy)*, 2015, No. 12, pp. 57 — 67.
11. Butyrin P.A., Dubitskii S.D., Korovkin N.V. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 10, pp. 66–71.
12. Reutov Yu.Ya., Gobov Yu.L., Loskutov V.Ye. *Defektoskopiya — in Russ. (Defectoscopy)*, 2002, No. 6, pp. 34–40.

[28.11.2016]