

ПОЛНОЕ УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЦЕПЕЙ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ – ВЕЛИЧИНА КОМПЛЕКСНАЯ

Вербовой А.П., к.т.н., Вербовой П.Ф., д.т.н.
Институт электродинамики Национальной академии наук Украины
Украина, 03680, Киев-57, пр-кт Победы, 56
тел. (044) 441-25-75, E-mail: podol @ eld.Kiev.ua

На основі даних, які отримані при експериментальних дослідженнях котушок з мідного і ферромагнітного дротів, а також порівняння результатів визначення питомого електричного опору по традиційній формулі і по формулі закону Ома для густини змінного струму встановлено, що повний питомий опір (в формулі Ома) складається з активної та індуктивної складових, тобто є величиною комплексною.

На основе данных, полученных при экспериментальных исследованиях катушек из медного и ферромагнитного проводов, а также сравнения результатов определения удельного электрического сопротивления по традиционной формуле и по формуле закона Ома для плотности переменного тока установлено, что полное удельное сопротивление (в формуле Ома) состоит из активной и индуктивной составляющих, то есть является величиной комплексной.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Материал статьи получен в результате исследований, выполненных в ИЭД НАН Украины в соответствии с государственными планами НИР по естественным и научно-техническим темам. Одной из наиболее сложных задач в электротехнике является задача по определению электромагнитных параметров. Они входят в уравнения электромагнитного равновесия в роли коэффициентов и требуется их определение до решения уравнений. Без достаточно точного определения электромагнитных параметров нельзя рассчитать характеристики, спроектировать и исследовать процессы любого электротехнического и электромеханического преобразования энергии.

Целью статьи является информирование широкого круга специалистов о новых результатах по дальнейшему развитию методов расчета и способов экспериментального определения электромагнитных параметров электромагнитных преобразователей энергии.

Ниже мы будем ссылаться на закон Ома для плотности тока ($\mathbf{J} = \mathbf{E}/\rho$). Известно, что он нарушается при больших плотностях тока. Единственной причиной этого может быть изменение ρ . И если это справедливо для любых металлических проводников, то тем более это будет характерным для ферромагнитных проводников, поскольку \mathbf{E} – это внешняя причина, обусловленная величиной подводимого напряжения, \mathbf{J} – результат, вызванный причиной, а ρ – свойство. Под действием электромагнитного поля меняются свойства металлов и более явно это выражено для ферромагнетиков.

Дальнейшее изложение материала строиться таким образом, чтобы достаточно объективно разобраться в сделанных рецензентами замечаниях и максимально прокомментировать свои суждения и доводы.

ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА

Для экспериментальных исследований изготовлена катушка из отожженной железной проволоки диаметром $d = 6$ мм, предварительно изолированной

стеклотканью. Радиальное сечение катушки показано на рис. 1. Геометрические параметры катушки с числом витков $w = 55$ имеют следующие значения:

внутренний диаметр $d_{\hat{a}} = 200$ мм;

наружный диаметр $d_{\hat{a}} = 360$ мм;

средний диаметр $d_{\hat{n}\delta} = 280$ мм;

толщина $\hat{a} = 50$ мм;

радиальный размер $\hat{a} = 80$ мм;

сечение витка $q = \frac{\pi d^2}{4} = 2,8274 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$;

длина провода катушки $\ell = \pi d_{\hat{n}\delta} w = 48,38$ м;

периметр поперечного сечения проволоки

$u = \pi d = 1,8849 \cdot 10^{-2}$ м;

коэффициент заполнения окна катушки проводом $k_{\zeta} = \frac{\pi d^2 w}{4(a \times b)} = 0,3887$.

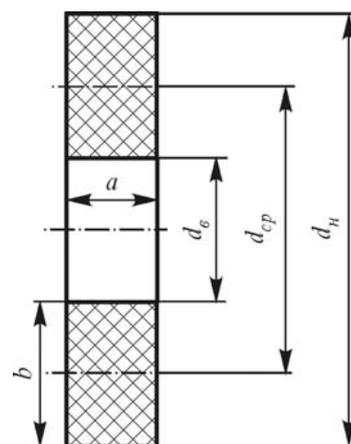


Рис. 1. Форма и размеры катушки

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментально измеренное на постоянном токе значение активного сопротивления катушки со-

ставляет $r_{\Sigma} = 0,3$ Ом. В этом случае удельное активное сопротивление материала катушки можно определить из соотношения

$$\rho_{\Sigma} = r_{\Sigma} q / \ell = 0,1753 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}. \quad (1)$$

Сравнивая полученное значение ρ_{Σ} с его значением для стали Ст.3 ($\rho_{\text{Ст.3}} = 0,1023 \cdot 10^{-6}$) устанавливаем, что оно больше ($\rho_{\Sigma} > \rho_{\text{Ст.3}}$) в 1,7138 раза. При этом значении ρ_{Σ} расчетные значения активного сопротивления катушки при двух значениях температуры составляют

$$r_{20} = \rho_{20} \ell / q = 0,3 \text{ Ом}, \quad (2)$$

$$r_{115} = \rho_{20} (1 + \alpha_r + \beta_r) \ell / q = 0,5024 \text{ Ом}. \quad (3)$$

В процессе эксперимента подвергались непосредственному измерению напряжение, ток и потребляемая активная мощность. По построенным кривым $I(U)$ и $P(U)$ при трех значениях напряжения определены их значения и занесены в таблицу. Эксперименты выполнялись в лабораторных условиях при температуре окружающего воздуха (и, следовательно, температуре катушки) порядка 23°C , то есть при исходном состоянии температурный коэффициент был равен примерно единице ($k_{\theta} \cong 1$). В процессе эксперимента температура катушки не измерялась, но несомненно она увеличивалась и, следовательно, температурный коэффициент становился больше единицы ($k_{\theta} > 1$). Поэтому и активное сопротивление катушки по идее тоже должно было бы расти.

Поскольку катушка выполнена из провода круглого сечения и питалась переменным с синусоидальной формой кривой напряжением с частотой $f = 50$ Гц, то дополнительные потери в проводниках, отдельных слоях и рядах не должны составлять существенное значение. Если это не так, то это привело бы к росту коэффициента, обусловленного эффектами вытеснения и близости ($k_r > 1$) и соответствующего роста активного сопротивления. Однако, как будет показано ниже, все электромагнитные параметры катушки при увеличении напряжения уменьшаются (рис. 2,а).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

По экспериментальным данным действующих значений токов и напряжений определены коэффициент мощности

$$\cos \varphi = P / UI, \quad (4)$$

полное сопротивление катушки

$$z = U / I, \quad (5)$$

его активная и индуктивная составляющие

$$r = z \cos \varphi = P / I^2, \quad (6)$$

$$x = z \sin \varphi = \sqrt{z^2 - r^2}, \quad (7)$$

значения которых сведены в таблицу, а также в виде зависимостей их от напряжения приведены на рис. 2,а.

Видно, что значения активного сопротивления проводников из ферромагнитного материала на переменном токе больше таковых на постоянном токе ($\rho_{\sim} > \rho_{\Sigma}$).

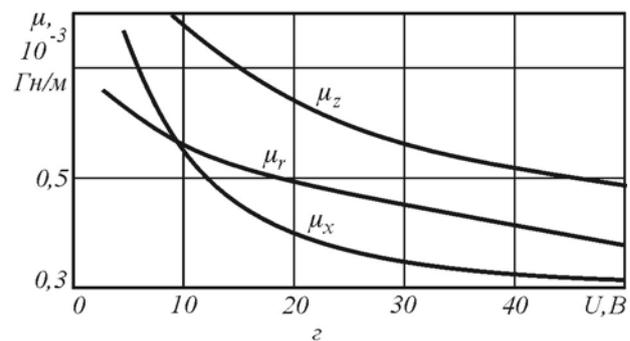
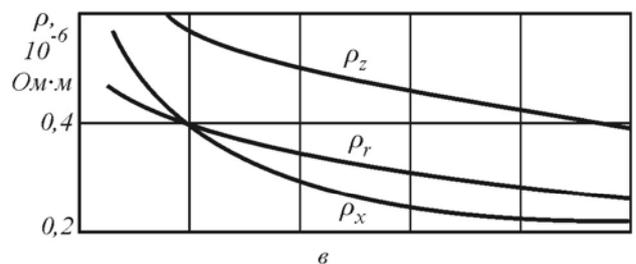
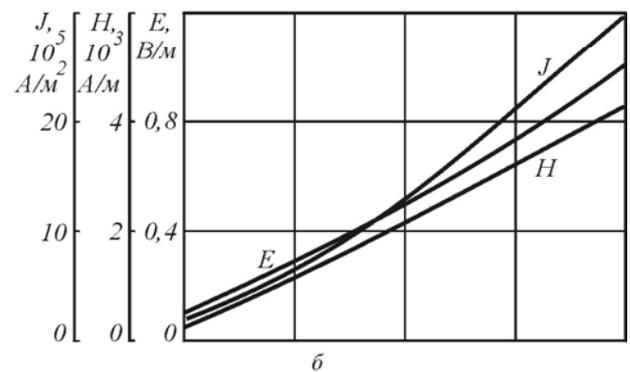
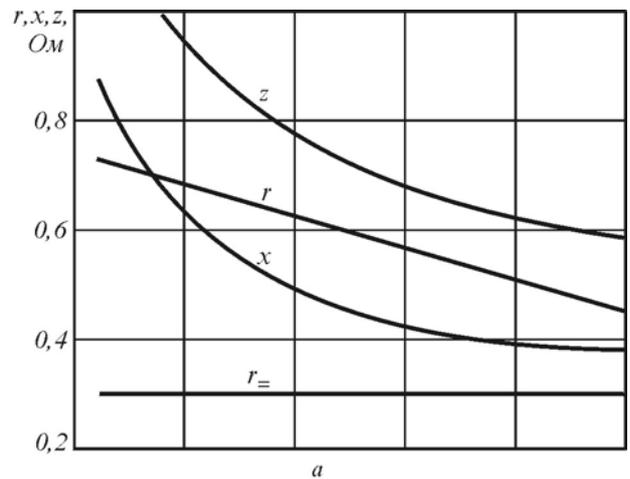


Рис. 2. Зависимости электромагнитных параметров и других величин от напряжения для катушки из ферромагнитной проволоки

Новым для нас оказалось то, что при увеличении напряжения и тока в ферромагнитном проводнике (катушке) активное сопротивление не увеличивается в связи с возможным увеличением коэффициентов k_{θ} и k_r , а уменьшается. Еще никто и никогда (во всяком случае нам не известно) не объяснял скин-эффект изменением магнитной проницаемости и тем более не

принимал значение коэффициента меньше единицы ($k_r < 1$). Если рассматривать формулы (2) и (3) и считать их верными для всех проводниковых материалов, а коэффициенты k_0 и k_r не могут принимать значения меньше единицы (противоречит их трактовке), то причиной уменьшения активного сопротивления в рассматриваемом случае является уменьшение удельного электрического сопротивления ферромагнетика.

По значениям активного сопротивления при переменном токе (см. п.6 таблицы) с использованием формулы (1) определены значения удельного электрического сопротивления реального ферромагнитного проводника с конкретными размерами, которые сведены в таблицу под п.12. Видно, что с ростом напряжения удельное электрическое сопротивление уменьшается.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

При изучении переменного электромагнитного поля в прямолинейном проводнике круглого сечения и определении активного и внутреннего индуктивного сопротивлений его в учебниках по теоретическим основам электротехники приводится формула

$$z = r + jx_a = \frac{\ell \dot{E}_m}{u \dot{H}_m}, \quad (8)$$

где \dot{E}_m и \dot{H}_m - комплексные значения амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей в поверхностном слое проводника.

Таким образом, для определения электромагнитных параметров проводника нужно найти напряженности электрического и магнитного полей. Задача решается с помощью использования функций Бесселя или с использованием значения вектора Пойтинга. Для проводов из ферромагнитных материалов приводится формула

$$r = \frac{\ell}{u} \sqrt{\omega \mu r} \quad \text{и} \quad x = 0,6r. \quad (9)$$

То есть для определения электромагнитных параметров проводников из ферромагнитных материалов нужно знать электромагнитные свойства их. Формула (9) показывает наглядную зависимость активного сопротивления от частоты, магнитной проницаемости и удельного электрического сопротивления проводника. И если с частотой ($\omega = 2\pi f$) и магнитной проницаемостью ($\mu = B/H$) все понятно, то с удельным электрическим сопротивлением не совсем. Попробуем разобраться с этим.

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ

По действующим значениям приложенного к катушке напряжения и тока в ней определим действующие значения напряженностей электрического и магнитного полей

$$E = U / \ell, \quad (10)$$

$$H = I / u = I / \pi d \quad (11)$$

и занесем эти значения в таблицу под пп. 8 и 9. Зависимости их от напряжения приведены на рис. 2,б.

Таблица

Экспериментальные и расчетные значения электромагнитных параметров и других величин катушки из ферромагнитной проволоки при нескольких значениях подводимого к ней напряжения

№ п.п.	Обозначение	Единицы измерения	Значения		
1.	U	В	10,0	30,0	50,0
2.	I	А	10,5	44,2	85,0
3.	P	Вт	74	1050	3260
4.	$\cos \varphi$	–	0,7048	0,7918	0,7671
5.	z	Ом	0,9524	0,6787	0,5882
6.	r	Ом	0,6712	0,5374	0,4512
7.	x	Ом	0,6756	0,4146	0,3774
8.	E	В/м	0,2067	0,6201	1,0335
9.	H	А/м	557,042	2344,88	4509,39
10.	J	А/м ²	$3,7136 \cdot 10^5$	$15,6325 \cdot 10^5$	$30,0626 \cdot 10^5$
11.	ρ_z	Ом·м	$0,5566 \cdot 10^{-6}$	$0,3966 \cdot 10^{-6}$	$0,3438 \cdot 10^{-6}$
12.	$\rho_r = \frac{rq}{\ell}$	Ом·м	$0,3923 \cdot 10^{-6}$	$0,3141 \cdot 10^{-6}$	$0,2637 \cdot 10^{-6}$
13.	$\rho_x = \frac{xq}{\ell}$	Ом·м	$0,3948 \cdot 10^{-6}$	$0,2423 \cdot 10^{-6}$	$0,2206 \cdot 10^{-6}$
14.	μ_z	Гн/м	$0,787433 \cdot 10^{-3}$	$0,561207 \cdot 10^{-3}$	$0,486256 \cdot 10^{-3}$
15.	μ_r	Гн/м	$0,554889 \cdot 10^{-3}$	$0,444271 \cdot 10^{-3}$	$0,373034 \cdot 10^{-3}$
16.	μ_x	Гн/м	$0,558628 \cdot 10^{-3}$	$0,342788 \cdot 10^{-3}$	$0,311974 \cdot 10^{-3}$
17.	Δ	м	0,00212	0,00212	0,00212
18.	B	Тл	0,43863	1,31596	2,19270
19.	k_{Fe}	–	1,006555	0,771492	0,836436

Если воспользоваться формулой (8) для действующих значений напряженностей электрического и магнитных полей (пп. 8 и 9 таблицы), то получим те же значения полного сопротивления катушки

$$\frac{\ell}{u} E / H = r + jx = z, \quad (12)$$

то есть соответствующие значениям по п.5 таблицы.

Значит формулы (8) и (12) приемлемы не только для отдельного проводника и для внутренней индуктивности его, но и для всей катушки. Разделение полного сопротивления катушки, полученного по формуле (12) без результатов эксперимента, на активную и индуктивную составляющие вызывает затруднения,

поскольку, как нам известно, $k_{Fe} = \frac{x}{r} = \text{var}$.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ПЛОТНОСТИ ТОКА

Не вдаваясь пока в подробности выяснения достаточно точного распределения тока по сечению проводника, определим плотность тока в проводе катушки, принимая ее здесь равномерной (см. п.10 таблицы)

$$J = 4I / \pi d^2. \quad (13)$$

Воспользовавшись законом Ома для плотности электрического тока, определим полное удельное электрическое сопротивление для рассматриваемой катушки из ферромагнитного провода при протекании по ней переменного тока (см. п. 11 таблицы)

$$\rho_z = E / J. \quad (14)$$

Подчеркнем, что это есть полное удельное электрическое сопротивление, характеризующее полное сопротивление катушки, поскольку при подстановке его в формулу (2) дает не значения активного сопротивления, а те же значения z , которые были получены как по формуле (5), так и по формуле (12). Другими словами, использование значения удельного электрического сопротивления, определенного по закону Ома для плотности тока, нельзя пользоваться для определения активной составляющей полного сопротивления. У нас есть полные основания записать

$$z = \rho_z \ell / q. \quad (15)$$

УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ – ВЕЛИЧИНА КОМПЛЕКСНАЯ

Выше уже отмечалось, что значения удельного электрического сопротивления проводника из ферромагнитного материала при переменном токе больше значений его при постоянном токе ($\rho_{\sim} > \rho_{=}$). Значения его приведены в таблице под п.12. Обозначим его через ρ_r и будем понимать как удельное электрическое сопротивление, характеризующее активное сопротивление проводника (катушки, обмотки) из ферромагнитного материала.

Если при переменном токе существует полное удельное электрическое сопротивление проводника, определенное на основании закона Ома для плотности

электрического тока, и его активная составляющая, то должна существовать и реактивная составляющая

$$\rho_x = x \frac{q}{\ell} = \sqrt{\rho_z^2 - \rho_r^2} = \rho_z \sin \varphi. \quad (16)$$

Таким образом, мы приходим к выводу, что полное удельное сопротивление проводника (катушки, обмотки) из ферромагнитных материалов при переменном токе состоит из активной и реактивной составляющих, то есть является величиной комплексной

$$\rho_z = \rho_r + j\rho_x = \sqrt{\rho_r^2 + \rho_x^2}. \quad (17)$$

Зависимости $\rho(U)$ приведены на рис. 2,в.

Аналогичные результаты получены и для катушки из медного провода. Разница заключается в том, что для катушки из медного провода электромагнитные параметры не зависят от напряжения, так как магнитная проницаемость остается постоянной ($\mu_o = \text{const}$). Заметим, что в этом случае катушка намотана медным проводом прямоугольного (не кругового) сечения $1,5 \times 4 \text{ мм}^2$. При этом приемлемыми являются формулы (10) и (11) для определения напряженностей электрического и магнитного полей, поскольку дают те же значения электромагнитных параметров, что и по результатам экспериментальных данных.

МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ И ГЛУБИНА ПРОНИКНОВЕНИЯ

Из формулы (9) при известных значениях удельного электрического сопротивления находим значения магнитной проницаемости

$$\sqrt{\mu_z} = \frac{u}{\ell} \frac{r}{\sqrt{\omega \rho_r}}, \quad \sqrt{\mu_x} = \frac{u}{\ell} \frac{x}{\sqrt{\omega \rho_x}}, \quad \sqrt{\mu_z} = \frac{u}{\ell} \frac{z}{\sqrt{\omega \rho_z}}, \quad (18)$$

вносим их в таблицу (пп. 14-16) и на рис. 2,г в виде зависимостей $\mu(U)$.

Определим глубину проникновения волны электромагнитного поля для полных ρ_z и μ_z (п. 17 табл.)

$$\Delta z = \sqrt{\frac{2\rho_z}{\omega \mu_z}}. \quad (19)$$

Видно, что определенная по этой формуле глубина проникновения волны или в данном случае глубина распределения тока в поверхностном слое проводника кругового сечения практически занимает около 91,4% его площади, то есть почти все сечение провода. Если учесть, что таким образом трактуемая глубина проникновения характеризует распределение не всей энергии, а только ее часть, то на данной глубине волна затухает не полностью. И это справедливо, очевидно, только для падающей волны на проводник. При подключении проводника к источнику напряжения процессы протекают по иному. Из таблицы видно, что таким образом определенная глубина не зависит от интенсивности электромагнитного поля, что вызывает сомнение в правильности формулы (19). Кроме того, экспериментальными исследованиями асинхронного двигателя с внешним массивным фер-

ромагнитным ротором при коротком замыкании ($f_2 = f_1 = 50$ Гц) установлено, что глубина проникновения электромагнитной волны достигает десятков миллиметров [2] и зависит от интенсивности поля.

Таким образом, в рассматриваемом нами случае распределение плотности тока по сечению проводника можно принять равномерным, а проявление скин-эффекта незначительным и, во всяком случае, не таким, чтобы сопротивление проводника и его удельное электрическое сопротивление увеличилось в два раза. И если некоторые рецензенты полученные результаты пытаются объяснить зависимостью $k_r(\mu)$, то это уже не коэффициент вытеснения тока по определению, а должен быть введен совсем новый коэффициент, который характеризовал бы изменение удельного электрического сопротивления от частоты и интенсивности электромагнитного поля и который является комплексной величиной. Мы понимаем это как изменение физических свойств ферромагнитных материалов под влиянием изменения параметров электромагнитного поля (электромагнитных нагрузок), то есть в данном случае конкретного свойства – изменения удельного электрического сопротивления (проводимости). В подтверждение этому приведем фразу из книги [3] на стр. 13: "Нелинейными называются среды, физические свойства которых, в особенности удельное активное сопротивление и электрическая и магнитная проводимости, не постоянны и изменяются под влиянием изменений параметров поля и энергии системы".

ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ ТРАКТУЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Определим действующие значения магнитной индукции в проводнике

$$B = \mu_z H, \quad (20)$$

сведем их в таблицу (п. 18) и построим в виде зависимости $B(U)$ на рис. 3.

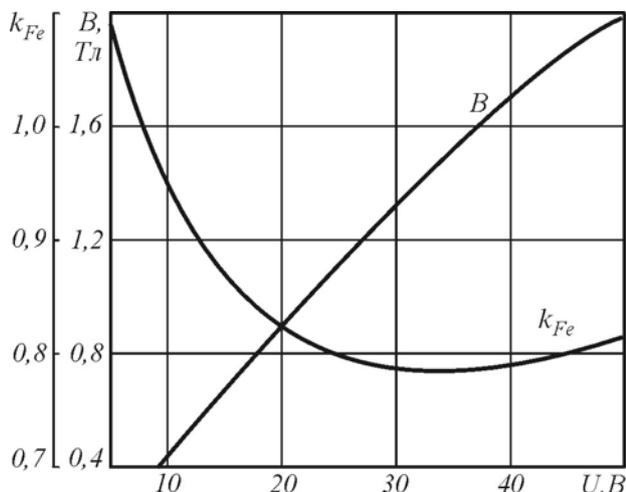


Рис. 3. Зависимости коэффициента индуктивности и индукции от напряжения для катушки из ферромагнитного провода

Формулы для определения потребляемых полной мощности и ее составляющих, выраженных через магнитную индукцию, напряженность магнитного поля, объем и частоту, принимают вид

$$S = BHV\omega = BHq\ell\omega, \quad (21)$$

$$P = BHVq\ell\omega \cos \varphi, \quad (22)$$

$$Q = BHVq\ell\omega \sin \varphi. \quad (23)$$

Приравняв эти выражения для мощностей к выражениям, записанным через сопротивления и квадрат тока,

$$S = zI^2 = \rho_z \frac{\ell}{q} I^2, \quad (24)$$

$$P = rI^2 = \rho_r \frac{\ell}{q} I^2, \quad (25)$$

$$Q = xI^2 = \rho_x \frac{\ell}{q} I^2, \quad (26)$$

находим выражения для полного удельного сопротивления и его составляющих, записанных через параметры поля

$$\rho_z = \frac{\omega HB}{J^2}; \quad \rho_r = \frac{\omega HB \cos \varphi}{J^2}; \quad \rho_x = \frac{\omega HB \sin \varphi}{J^2}. \quad (27)$$

Определенные по формуле (27) значения ρ совпадают с аналогичными значениями по пп. 11-13 таблицы, что и требовалось доказать.

Отличие формул (27) от формулы (8) в [1] состоит в том, что в [1] приведена формула для определения потерь в стали асинхронного двигателя [4], которые пропорциональны частоте f . Здесь же учет осевой симметрии распределения поля в линейном проводнике потребовал введения коэффициента 2π , что в результате дало $2\pi f = \omega$. Вместе с тем, полученные значения ρ_z по формуле (27) совпадают со значениями, полученными по формуле (14). Такое совпадение подтверждает правильность формулы по определению потерь в стали (формула (11) в [4] и формула (8) в [1]).

КОЭФФИЦИЕНТ ИНДУКТИВНОСТИ

Под п. 19 в таблице приведены значения коэффициента индуктивности, который характеризует отношение не только индуктивных сопротивлений и проводимости к активным составляющим, а и соответствующих составляющих полных удельного сопротивления, токов, мощностей

$$k_{Fe} = \frac{x}{r} = \frac{b}{g} = \frac{\rho_x}{\rho_r} = \frac{\mu_x}{\mu_r} = \frac{I_x}{I_r} = \frac{Q}{P} = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \operatorname{tg} \varphi. \quad (28)$$

На рис. 3 приведена зависимость $k_{Fe}(U)$, которая наглядно показывает изменение коэффициента индуктивности для данного ферромагнитного материала проволоки (катушки). Ранее был определен k_{Fe} для стали Ст.3 на основании динамической петли гистерезиса. Общий вид кривой $k_{Fe}(B)$ имеет примерно такой же закон изменения, но несколько другие значения (кривая проходит ниже той, что приведена на

рис. 3). Приведенное в учебниках и в технической литературе значение $k_{Fe} \cong 0,6 = const$, приемлемо только для номинальных значений напряжения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Учитывая содержание статьи [1] и изложенные здесь результаты, построенные на базе экспериментальных данных катушки из ферромагнитного провода, можно сформулировать следующие выводы.

1. Активное сопротивление при малых значениях подводимого к катушке переменного напряжения ($f = 50$ Гц) примерно в два раза больше сопротивления при постоянном токе, что нельзя объяснить только эффектом вытеснения тока, поскольку в данном случае $k_r \cong 1$.

2. При увеличении подводимого напряжения значения активного и индуктивного сопротивлений катушки уменьшаются, что противоречит устоявшемуся мнению о возможном возрастании их в связи с увеличением температурного коэффициента (k_θ) и коэффициента вытеснения тока (k_r).

3. Пределы изменения индуктивного сопротивления больше пределов изменения активного сопротивления, а их отношение (коэффициент индуктивности $k_{Fe} = x/r$) изменяется от 1,3 (при $U = 5B$) до 0,77 (при $U = 35U$). При дальнейшем увеличении напряжения k_{Fe} снова возрастает. Ранее было принято считать, что $k_{Fe} \cong 0,6 = const$.

4. Причиной изменения электромагнитных параметров является изменение удельного электрического сопротивления (проводимости), что подтверждено выводом формулы для его определения через параметры поля и частоту переменных величин.

5. Рассчитанные значения удельного электрического сопротивления на основе закона Ома для плотности электрического тока соответствуют полному удельному электрическому сопротивлению, характеризующему полное сопротивление электрической цепи при переменном токе.

6. Поскольку на основе упомянутого закона Ома существуют полное удельное электрическое сопротивление и его активная составляющая, которой мы привыкли пользоваться при определении активного электрического сопротивления цепи, то должна существовать и индуктивная составляющая удельного электрического сопротивления, характеризующая индуктивное сопротивление цепи.

7. Удельное электрическое сопротивление цепи при протекании по ней переменного тока является величиной комплексной, то есть полное удельное электрическое сопротивление состоит из активной и индуктивной составляющих, как и полное сопротивление цепи.

8. Активная составляющая полного удельного электрического сопротивления ферромагнитных материалов на переменном токе значительно больше

таковой на постоянном токе ($\rho_r = \rho_{r\sim}$), что обусловлено не вытеснением тока, а изменением физических свойств материала под влиянием переменного электромагнитного поля.

9. Определенная по известной формуле глубина распределения тока по сечению провода дает постоянные значения, независящие от интенсивности электромагнитного поля, что вызывает сомнение в ее правильности. Выполненные ранее экспериментальные исследования показали, что глубина проникновения электромагнитной волны, например, в массивный ферромагнитный ротор асинхронного двигателя достигает десятков миллиметров и зависит от интенсивности электромагнитного поля.

10. Даже при таком образом определенной глубине распределения тока в проводнике, площадь поперечного сечения, занимаемая током, составляет 91,4%. По этой причине, а также с учетом предыдущего вывода, полученные результаты нельзя объяснить ни вытеснением тока ($k_r \cong 1$), ни дополнительными потерями.

11. Принятое для пользования постоянное значение коэффициента индуктивности ($k_{Fe} \cong 0,6 = const$) приемлемо только для номинальных значений напряжения (магнитной индукции). На конкретном примере здесь и в других публикациях авторов показаны широкие пределы его изменения задачи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вербовой А.П., Вербовой П.Ф. Исследование влияния величины напряжения на электромагнитные параметры катушки из ферромагнитного проводника // *Электротехніка і електромеханіка* – 2003. - № 2. – С. 13-16.
- [2] Вербовой А.П., Вербовой П.Ф., Сьянов А.М. Исследование глубины проникновения электромагнитной волны в массивный ферромагнитный ротор асинхронного двигателя // *Техн. електродинаміка*. - 1999. - № 1. - С. 68-71.
- [3] Туровский Я. *Техническая электродинамика*. Пер. с польск. – М.: Энергия, 1974. – 488 с.
- [4] Вербовой А.П., Вербовой П.Ф. Определение потерь в стали регулируемых асинхронных двигателей // *Праці ІЕД НАН України. Електротехніка*. - Київ: ІЕД НАНУ, 1999. - С. 119-124.

Поступила 25.07.2003