УДК 620.179.14

О ДИФФУЗИИ ЗАТУХАЮЩИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ КАМЕРУ

Себко В.П., д.т.н., проф., Беззапонная В.М.
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Приборы и методы неразрушающего контроля"
тел. (0572) 707-69-27

У роботі проведені теоретичні й експериментальні дослідження явища проникненні загасаючих магнітних полів, що змінюються повільно, через стінки металевих камер. Отримані експериментальні дані перебувають у гарній згоді з розрахунковими.

В работе проведены теоретические и экспериментальные исследования явления проникновении медленно изменяющихся затухающих магнитных полей через стенки металлических камер. Полученные экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с расчётными.

Расчет сложных физических систем можно вести разными путями: когда физическая модель описывается точными математическими уравнениями, а затем в процессе их решения делаются некоторые упрощения или допущения, и когда она сразу же упрощается, а затем уравнения, описывающие эту упрощенную модель, решаются точно.

Конечно, наилучшим вариантом расчета был бы тот, когда сложная физическая модель описывалась бы исчерпывающими ее уравнениями, которые резались бы точно без всяких упрощений. Однако это иногда сложно выполнило. В целом ряде случаев применим второй путь расчета.

Так, например, мы решили вопрос о проникновении медленно изменяющихся затухающих магнитных полей при прохождении через цилиндрические металлические камеры. Схема нашей установки приведена на рис.1. Батарея конденсаторов общей емкостью C=0,012 F разряжается на катушку сопротивлением R_1=0,41 Ома; L_1=31.10^{-3} Н. Размеры катушки приведены на рис.3. В эту катушку вставлялись медная труба длиной l =300 мм, $d_{вн}$ =100 мм и толщиной стенки 2 мм. Требовалось определить, какие изменения поля на оси катушки (и трубы) вносит такая цилиндрическая камера. Решать такую задачу о проникновении магнитной волны через стенки камеры, когда труба вносит некоторые изменения в разрядный ток конденсатора (из-за взаимоиндуктивности трубы с катушкой), то есть меняется граничное условие на внешней части стенки трубы, было бы делом довольно сложным.

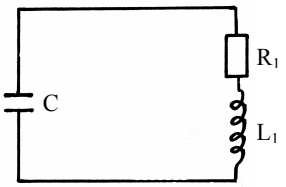

Рис. 1. Электрическая схема установки

В этом случае мы и пошли сразу же на упрощение модели. Мы считали, что период колебаний магнитного поля велик (L и C - большие). А это значит, что глубина скин-эффекта больше толщины камеры

$$\frac{\delta}{d} = \frac{C}{d \cdot \sqrt{2\pi \cdot \sigma \cdot \beta_0 \cdot \mu}} >> 1, \qquad (1)$$

где δ - глубина скин-эффекта; σ - проводимость материала камеры; β_0 - циклическая частота; μ - магнитная проницаемость материала; d - толщина камеры; μ_0 – магнитная постоянная.

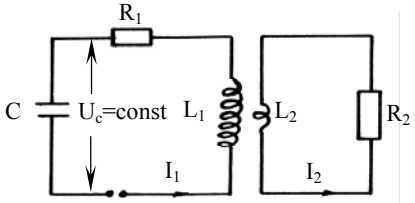

Рис.2. Эквивалентная схема катушки, внутри которой помещена металлическая камера

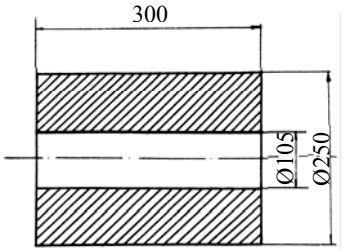

Рис. 3 Катушка
(L_1=31·10^{-3} Гн; R_1=0,41 Ома; W=614)

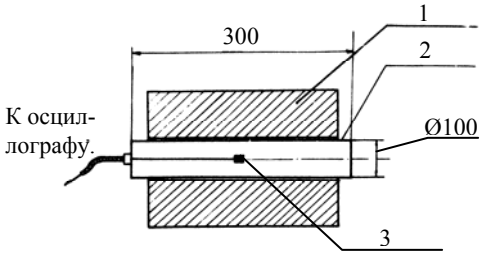

Рис. 4. Схема измерения магнитного поля на оси камеры
1. Катушка, создающая магнитное поле
(L_1=31·10^{-3} Н, R_1=0,41 Ом)
2. Цилиндрическая камера
3. Магнитный зонд

Таким образом, камеру можно представить в виде кольца с индуктивностью L_2 и сопротивлением R_2. Поток, свободно пересекая такое кольцо, наведет в ней ЭДС, под действием которой потекут кольцевые токи, поле которых будет размагничивать основное поле (уравнение магнитного равновесия $i_1 \cdot W_1 = i_0 \cdot W_0 + i_2 \cdot W_2$).

Теперь ясно, что нашу систему: катушка, внутри которой расположена цилиндрическая камера, можно представить в виде рис.2.

По закону Кирхгофа для мгновенных значений токов можно написать систему двух уравнений

$$\begin{cases} L_i \cdot \dfrac{di_1}{dt} + R_1 \cdot i_1 + \dfrac{1}{c} \cdot \int i_1 \cdot dt + M \cdot \dfrac{di_2}{dt} = 0 \\ R_2 \cdot i_2 + L_2 \cdot \dfrac{di_2}{dt} + M \cdot \dfrac{di_1}{dt} = 0. \end{cases}$$

Выпишем начальные условия:

$$t=0,\ i=0,\ i_2=0,\ U_c=U_0.$$

Решая эту систему операторным методом [1,2], найдем $i_1(t)$ и $i_2(t)$. Напряженность поля на оси катушки будет пропорциональна

$$H_{\text{осев.}} \sim i_1 \cdot W_1 + i_2 \cdot W_2 . \qquad (2)$$

Теперь, если мы отнесем эту напряженность к напряженности поля на оси катушки, внутри которой отсутствует камера, то получим результирующее поле в %

$$h_{\text{осев.}} = \frac{i_1 \cdot W_1 + i_2 \cdot W_2}{I_1 \cdot W_2} \cdot 100\% , \qquad (3)$$

где i_1-мгновенное значение тока в катушке; i_2 - мгновенное значение тока в трубе; I_1 - мгновенное значение тока в катушке при отсутствии в ней трубы.

Тогда ослабление поля на оси в %

$$100\% - h_{\text{осев.}}(\%).$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

Заданные значения величин: $L_1=31 \cdot 10^{-3}$ Гн; R_1=0,41 Ома; C=0,012 Ф; W=614 витков; R_2=0,9 Ома; $L_2=0{,}116 \cdot 10^{-6}$ Гн; $M=2410^{-6}$ Гн.

Напряжение на батарее U=5кВ. Материал трубы – медь.

1) Максимальное значение напряженности поля на оси катушки, когда труба отсутствует внутри нее,

$$H \sim I_1 \cdot W_1 = 16{,}2 \cdot 10^5 \text{ Aw};\ I_1 = 3140 \cdot e^{-6{,}6t} \cdot \sin(51{,}5 \cdot t + \pi). \quad (4)$$

2) Оценка скин-эффекта

$$\frac{\delta}{d} = 12 .$$

3) Мгновенные значения токов в катушке и в трубе

$$i_1(t) = -210 \cdot e^{-88t} + 210\, e^{-9{,}5t} \cdot \cos 51{,}5t + 3350 \cdot e^{-9{,}5t} \cdot \sin 51{,}5t \quad (5)$$

$$i_2(t) = 37{,}5 \cdot 10^4 e^{-88t} - 37{,}5 \cdot 10^4 \cdot e^{-9{,}5t} \cdot \cos 51{,}5t - 1{,}66 \cdot 10^5 \cdot e^{-9{,}5t} \cdot \sin 51{,}5t \quad (6)$$

Как видно из выражения (5),ток в катушке изменился по сравнению с тем током, когда внутри нее отсутствовала камера (4). Во-первых, появился довольно быстро затухающий экспоненциальный член – $210e^{-88t}$,влияющий на первую амплитуду разрядного тока. Во-вторых, возросло затухание разрядного тока

$$\alpha_{\text{без трубы}} = \frac{R_1}{2L_1} = 6{,}6;\ \ \alpha_{\text{с трубой}} = 9{,}5$$

(связано с потерями от нагрева). Частота колебаний не изменилась. Таким образом, камера внесла некоторые изменения в разрядный ток.

Теперь можно оценить затухание поля внутри камеры.

$i_1 \cdot W_1 = 15{,}3 \cdot 10^5$ Aw $\qquad$ $i_2 \cdot W_2 = -0{,}98 \cdot 10^5$ Aw

t=0,03 сек. $\qquad$ t=0,03 сек.

Полная максимальная напряжённость поля внутри камеры

$$H \sim 15{,}3 \cdot 10^5 - 0{,}98 \cdot 10^5 = 14{,}4 \cdot 10^5 \text{ Aw}.$$

Ослабление поля % внутри медной камеры

$$\frac{(16{,}2 - 14{,}4) \cdot 10^5}{16{,}2 \cdot 10^5} \cdot 100\% = 11\% .$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

Работа была проведена с целью выяснения, как проникает затухающее магнитное поле с периодом T=100 мсек и амплитудой порядка $8 \cdot 10^3$ кА/м через медную трубу $d_{\text{внешн.}}$= 100 мм и толщиной стенки 2 мм. Катушка имела параметры и размеры, указанные на рис.3. Труба имела те же параметры, которые употреблялись в расчете, рис. 4. На катушку разряжалась батарея конденсаторов ИМ-I50, включающая в себя параллельно 80 конденсаторов общей емкостью 0,012 Ф. Начальное напряжение на батарее 5 кВ, T=120 мсек.

Измерения проводились при помощи магнитного зонда со средним диаметром d=1,5 мм и числом витков W=250. Зонд вставлялся в медную камеру через специальную фишку. Сигнал с зонда подавался на электронно-лучевой осциллограф ЭНО-I. Сигнал (максимальное значение), снимаемый с зонда, внутри трубы, помещенной в катушку, составляет 333 мВ (рис.6).Сигнал с зонда внутри катушки без камеры составляет 432 мВ (рис.5).

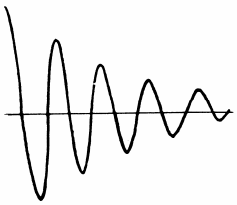

Рис. 5. Сигнал с зонда, когда камера отсутствует внутри катушки

Рис. 6. Сигнал, снимаемый с зонда, при наличии камеры

Надо отметить, что сигнал при наличии камеры внутри катушки по частоте совпадает с сигналом, когда отсутствует камера, кроме того, затухание α при наличии трубы возросло.

Попробуем оценить теоретически величину уменьшения в процентах максимального значения сигнала из-за того, что была внесена медная камера в катушку.

Сигнал с магнитного зонда ~dH/dt.

Найдем величину, пропорциональную максимальному значению сигнала с зонда, когда труба отсутствует внутри катушки

$$\frac{dH}{dt}_{\text{с трубой}} \sim \frac{d(i_1 \cdot w_1 + i_2 \cdot w_2)}{dt}.$$

Подставляя (5) и (6) в последнее выражение, найдём

$$\frac{dH}{dt}_{\text{с трубой}} \sim -203 \cdot 10^5 \cdot e^{-88t} +$$

$$+980 \cdot 10^5 \cdot e^{-9,5t} \cdot \cos(51,5t - 7°).$$

Величина, пропорциональная максимальному значению,

$$\frac{dH}{dt}_{\text{с трубой}} = 729 \cdot 10^5 \, Aw/сек,$$

t=0,0023 сек.

Итак, подсчет уменьшения сигнала с зонда при внесении

$$100\% - \frac{792 \cdot 10^5}{922 \cdot 10^5} \cdot 100\% = 20,5\%.$$

Это почти соответствует измерениям на магнитных зондах (23%). На графике рис.7 -представлены подсчитанные составляющие сигнала

$$\frac{dH}{dt}_{\text{с трубой}} - 203 \cdot 10^5 \cdot e^{-88t},$$

затухающий член $980 \cdot 10^5 \cdot e^{-9,5t} \cdot \cos(51,5 \cdot t - 0,038 \cdot \pi)$ и результирующий сигнал (жирная кривая).

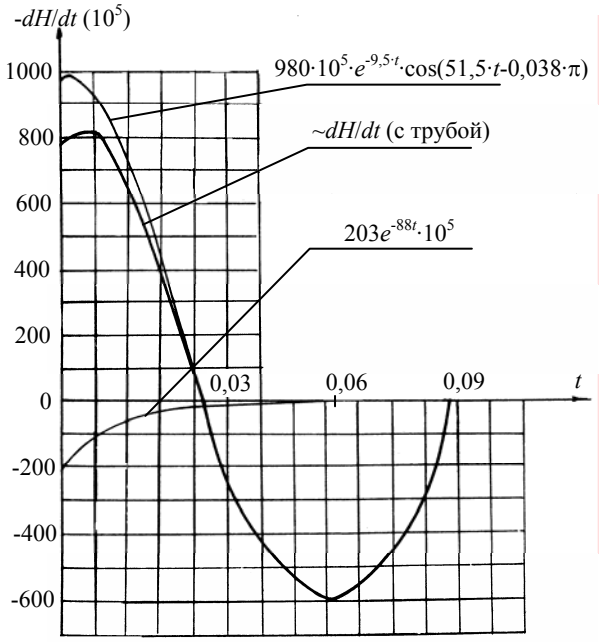

Рис. 7. График. Зависимость сигнала с зонда от времени при наличии камеры (dH/dt (с трубой). Теоретические кривые

При работе с разрядами на больших частотах взаимоиндуктивность кольца (камеры) и катушки (часто ее выполняют в виде одного-двух витков) уступает место суммарной взаимоиндуктивности бесчисленного множества контуров, связанных с вихревыми токами в толще камеры, с катушкой, на которую разряжается емкость. В этом случае может не только возрасти декремент затухания первичного тока, но и изменится его частота. Сильно возрастают активные потери в толще камеры. В этом случае также можно прибегнуть к эквивалентной схеме замещения. Только здесь надо внести в первичный контур дополнительное сопротивление (которое зависит от формы материала, помещенного внутрь катушки, частоты, электропроводности и т.д.) и индуктивное, а также рассчитать первичный ток $i_1(t)$ при наличии таких добавок и его отклонения от первоначального. Интересна возможность (при таком подходе к расчетам) по изменению тока в первичной цепи, найденному, например, экспериментально, судить об одном каком-то обобщенном параметре сердечника, помещенного внутрь катушки. Больше того, если таким сердечником является проводящая среда, изменяющая свои параметры во времени (например, плазма), то, считая известным закон изменения первичного тока (в катушке), мы могли бы судить о законе изменения этого параметра. Конечно, здесь, по-видимому, пришлось бы иметь дело с параметрическими дифференциальными уравнениями» и схемы замещения усложнились бы.

Надо сказать, что на основании такого метода можно решить вопрос о том, как нужно изменять первичный ток, чтобы обобщенный параметр среды (например, электропроводность) изменялся по заданному закону. Правда, во всех этих случаях приходится отвлекаться от многих факторов, которые могут исказить картину. Не все равно такой путь расчетов совместно с экспериментом кажется интересным

Во многих случаях при расчётах сложных систем имеет смысл упрощать физические модели, отвлекаясь сразу же от несущественных факторов и переходить к эквивалентным схемам, а затем точно решать эти схемы. Решения подобных уравнений (часто параметрических) осуществить гораздо проще, поскольку, помимо накопленного солидного опыта (большая научно-техническая литература), разработаны способы их решения на электронно-счётных машинах.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: Наука, 1964. – 608 с.

[2] Калантаров П.Л., Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники. Теория цепей переменного тока. - М. Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 444 с.

Поступила 06.06.2005