

УДК 621.31.002.5

А.А.Кустов (4 курс, каф. ЭСиАЭС), Р.П.Кияткин, к.т.н., доц.

## РАСЧЕТ ФУНКЦИЙ ЭКРАНИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ЭКРАНОВ ВО ВНЕШНИХ ОДНОРОДНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

В лаборатории электромагнитного поля (ЭМП) кафедры теоретических основ электротехники (ТОЭ) при выполнении работы № 11 “Исследование электромагнитного экранирования” исследуются экраны с толщиной стенок 1,5...5 мм, имеющие сферическую и цилиндрическую форму. Для всех экранов (стальных, медных, алюминиевых и латунных) опытным путем при постоянном и переменном магнитных полях определяются функции экранирования  $k=H_i/H_0$ , где  $H_i$  – напряженность поля внутри экранов;  $H_0$  – напряженность внешнего поля, создаваемого электромагнитом, размеры полюсов которого достаточно велики для того, чтобы магнитное поле в средней области между ними, в которую вносятся экраны, можно было приближенно считать однородным. Так как экраны состояются из двух половин, то они могут быть и неоднородными. Теоретическим путем предлагается [1] вычислить степень экранирования  $a=1/k$  лишь для простейшего случая однородного стального сферического экрана с постоянной магнитной проницаемостью, находящегося во внешнем однородном постоянном магнитном поле.

Целью работы являлась разработка алгоритма и компьютерной программы численно-аналитического расчета функции экранирования для всех имеющихся в лаборатории немагнитных экранов в однородном переменном магнитном поле во всем обеспечиваемом установкой диапазоне частот (50...1000 Гц).

При расчете экран представляется некоторым числом  $n_3$  элементарных круговых витков (ЭКВ), в пределах сечений  $S_k$  ( $k = \overline{1, n_3}$ ) которых вихревые токи  $\dot{I}_k$  ЭКВ полагаются распределенными равномерно. При этом активные сопротивления ЭКВ рассчитываются как резистивные:  $r_k = l_{kcp} / \gamma_k S_k$ , где  $l_{kcp} = 2\pi R_{kcp}$  – длина осевой (средней) линии-окружности витка;  $\gamma_k$  – удельная электропроводность  $k$ -го ЭКВ.

Электрическое состояние каждого ЭКВ описывается уравнением, составленным по второму закону Кирхгофа, а всех ЭКВ – системой  $n_3$  таких уравнений. В матричной форме (с обозначениями:  $\mathbf{r}$  – диагональная матрица активных сопротивлений ЭКВ;  $\mathbf{M}$  – квадратная матрица собственных и взаимных индуктивностей ЭКВ;  $\mathbf{I}$  – столбец искомых токов ЭКВ диска;  $\mathbf{S}_{ЭКВ}$  – столбец площадей ЭКВ;  $j$  – мнимая единица;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота переменного тока в катушках электромагнита;  $\mu_0$  – магнитная постоянная) система уравнений принимает вид

$$(\mathbf{r} + j\omega\mathbf{M}) \cdot \mathbf{I} = -j\omega\mu_0 H_0 \mathbf{S}_{ЭКВ} \quad (*)$$

Для расчета индуктивностей и взаимных индуктивностей ЭКВ используются формулы, выражающие индуктивность кругового кольца и взаимную индуктивность двух соосных круговых колец [2].

Решением системы (\*) определяется распределение вихревых токов по сечению экрана. Затем с использованием формулы для напряженности магнитного поля на оси кругового витка с током [1] методом суперпозиции рассчитывается комплекс напряженности магнитного поля в центре экрана:

$$\dot{H}_i = H_0 + \sum_{k=1}^{n_s} \frac{\dot{I}_k}{2R_{k\text{cp}}} \sin^3 \beta_k ,$$

где  $\sin \beta_k = \frac{R_{k\text{cp}}}{\sqrt{R_{k\text{cp}}^2 + h_k^2}}$ ;  $h_k$  – расстояние от центра экрана до плоскости  $k$ -го ЭКВ.

На заключительном этапе определяется функция экранирования  $k$  как отношение  $H_i$  к  $H_0$ .

Изложенный алгоритм реализован на ЭВМ, выполнены отладочные расчеты, результаты которых хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными на лабораторной установке.

Представленной работой завершена разработка комплекса программ для численного моделирования электромагнитных устройств переменного тока с токопроводящими элементами, включающего:

- две программы расчета мощности потерь и распределения переменного тока по сечению одного или двух проводников, заложенных в открытый паз электрической машины [3]; первая программа позволяет получить приближенное решение в одномерной (по высоте проводников) постановке, допускающей также аналитическое решение; по второй программе расчет ведется в строгой двумерной постановке;
- программу расчета электромагнитных параметров двухпроводной линии из массивных немагнитных проводов [4];
- программу полного электромагнитного расчета системы «круглые немагнитный проводящий диск — катушка с переменным током» [5];
- две программы расчета характеристик экранирования внешнего однородного переменного магнитного поля составными (из различных немагнитных материалов) сферическими и цилиндрическими экранами.

Перечисленные программы позволяют на современном уровне производить сравнительные теоретические расчеты при выполнении четырех из 14-ти (действующих в настоящее время) работ в лаборатории ЭМП кафедры ТОЭ.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Нейман Л.Р., Демирчян К.С., Юринов В.М. Руководство к лаборатории электромагнитного поля. – М.: Высшая школа, 1966. – 267 с.
2. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.2.– Л.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
3. Давиденко П.В., Кияткин Р.П. Расчет вытеснения тока в проводниках, заложенных в паз электрической машины // Тез. докл. научн.-техн. конф. студентов 25-ой юбил. Недели науки

СПбГТУ. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 1996, – С. 30-31.

4. Христюк Д.В., Кияткин Р.П. Влияние поверхностного эффекта и эффекта близости на параметры линии из массивных медных стержней // Там же. – С. 32-33.

5. Кустов А.А., Кияткин Р.П. Реализация метода элементарных витков для электромагнитного расчета системы катушка с током — алюминиевый диск // Материалы межвуз. науч. конф.– СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001. – Ч. I. – С. 84-85.