

УДК 621.391.82

Ю.В.Бочаров (3 курс, каф. ЭнЭл), Р.П.Кияткин, к.т.н., доц.

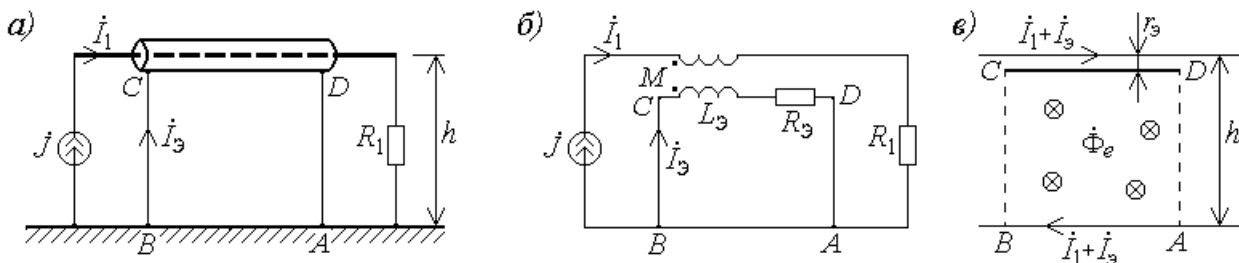
### ОБ ЭКРАНИРОВАНИИ И ЗАЗЕМЛЕНИИ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Устранение шумов и помех в проектируемых электронных схемах и электрических системах – одна из наиболее трудноразрешимых задач, стоящих перед инженерами-разработчиками. Одними из основных методов борьбы с излучениями электромагнитных полей являются экранирование и заземление, тесно связанные между собой [1].

В настоящей работе строже, чем в [1], рассмотрен вопрос об экранировании провода с переменным током  $\dot{I}_1$  частоты  $f$  цилиндрическим экраном (рис. а), выполненным из немагнитного материала с удельной электрической проводимостью  $\gamma$ . Как и в [1], толщина экрана  $\delta_s$  полагалась на интересующих частотах намного меньшей глубины скин-слоя

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\gamma}} \quad (\omega=2\pi f).$$

Вначале процитируем некоторые рассуждения и выводы из [1, стр. 48-50]: *“Чтобы предотвратить излучение, источник помех можно заключить в экран. ... Если проводник с током поместить в экран, заземленный в одной точке, линии электрического поля будут замыкаться на экран, однако на магнитное поле экран будет оказывать очень слабое влияние... Если сделать ток экрана равным по величине и направленным навстречу току центрального проводника, он будет создавать равное и противоположно направленное магнитное поле. ... На рис. а показана заземленная с обоих концов цепь, по которой проходит*



Экранирование проводника с током  $\dot{I}_1$ : а – физическое представление;  
 б – эквивалентная схема; в – модель для определения потока  $\Phi_e$

ток  $\dot{I}_1$ . Чтобы предотвратить излучение этой цепью магнитного поля, необходимо, чтобы оба конца экрана были заземлены и возвратный ток протекал от точки А к точке В по экрану, а не по заземленной плоскости (?)... Для анализа такой конфигурации (?) можно воспользоваться эквивалентной схемой (рис. б). Записав контурное уравнение для цепи А- $R_3$ - $L_3$ -В-А в виде

$$0 = -\dot{I}_3(j\omega L_3 + R_3) - \dot{I}_1 j\omega M, \quad (1)$$

где  $M$  – взаимная индуктивность между экраном и центральным проводником [как было показано выше – см...,  $M=L_3$  (?)], можно определить из него ток экрана...

$$\dot{I}_3 = -\dot{I}_1 \frac{j\omega}{j\omega + R_3/L_3} = -\dot{I}_1 \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{cp}}. \quad (2)$$

Из этого уравнения видно, что на частоте, намного превышающей частоту среза экрана  $\omega_{cp}$ , ток экрана приближается по величине к току через центральный проводник”.

По приведенным выдержкам можно сделать, в частности следующие замечания. Во-первых, при записи уравнения (1) не учтена э.д.с.  $\dot{E} = -j\omega\dot{\Phi}_e$ , индуцированная магнитным потоком  $\dot{\Phi}_e$  (рис. в), проходящим сквозь поверхность, ограниченную контуром ABCDA [2]. Указанный поток может быть определен [3] как внешний магнитный поток двухпроводной линии длиной  $l=AB=DC$ , радиус прямого провода которой равен  $r_3$ , а радиус обратного (по “земле”) провода принят равным, например, половине толщины экрана ( $\delta_3/2$ ):

$$\dot{\Phi}_e = \frac{\mu_0 l}{2\pi} (\dot{I}_1 + \dot{I}_3) \ln \frac{(h-r_3)(h-\delta_3/2)}{r_3(\delta_3/2)}.$$

Во-вторых, заключение [1, стр. 46] « $M=L_3$ » не совсем верно, так как это равенство имеет место только либо при нулевой толщине экрана ( $\delta_3 \rightarrow 0$ ), либо при удалении экрана от “заземленной плоскости” на бесконечное расстояние ( $h \rightarrow \infty$ ). В общем же случае  $L_3$  больше  $M$  на величину *внутренней индуктивности* [2, 3] экрана. С использованием понятия *среднего геометрического расстояния* [4] для расчета рассматриваемых индуктивностей могут быть получены выражения

$$L_3 = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{h^2}{(cr_3)(\delta_3/2)}, \quad M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{(h-r_3)(h-\delta_3/2)}{r_3(\delta_3/2)}, \quad (3)$$

где параметр  $c$  зависит от отношения внутреннего радиуса экрана к наружному [4].

С учетом сделанных замечаний после несложных преобразований вместо грубо приближенного соотношения (2) получаем следующее уточненное выражение для расчета тока экрана:

$$\dot{I}_3 = -\dot{I}_1 \frac{j\omega \cdot 2M}{R_3 + j\omega \cdot (L_3 + M)}, \quad (4)$$

Расчеты, выполненные по формулам (3)-(4), подтвердили практическую непригодность формулы (2). В таблице представлены результаты расчетов для медного ( $\gamma=5,25 \cdot 10^7$  1/Ом·м) экрана толщиной  $\delta_3=0,001$  м с внешним радиусом  $r_3=0,01$  м. Варьировались относительная высота  $h/r_3$  “подвеса” центрального проводника (источника помех) над плоскостью “земли” и частота  $f$  его тока  $\dot{I}_1$ , модуль которого задавался единичным, а начальная фаза — нулевой:  $\dot{I}_1=1=(1+j0)=1e^{j0^\circ}=1\angle 0^\circ$  (А). Индуктивности рассчитывались по формулам (3) с параметром  $c=0,9672$  [4], а частота среза экрана [1] по формуле  $f_{cp}=(R_3/L_3)/2\pi$ . В последних пяти колонках таблицы (за исключением последней строки!) содержатся основные результаты – значения комплексных токов экрана (в амперах), рассчитанные по формуле (4).

Результаты расчетов индуктивностей и комплексного тока (А) медного экрана

$h/r_3$	$L_3 \cdot 10^7$	$M \cdot 10^7$	$f_{cp}$	$f=50$	$f=100$	$f=200$	$f=300$	$f=400$
	Гн/м		Гц	Гц				
1,1	6,439	1,483	79	0,230 $\angle$ -128°	0,315 $\angle$ -147°	0,357 $\angle$ -162°	0,366 $\angle$ -167°	0,370 $\angle$ -171°
1,4	7,404	4,759	69	0,601 $\angle$ -140°	0,722 $\angle$ -157°	0,766 $\angle$ -168°	0,775 $\angle$ -172°	0,778 $\angle$ -174°

2,0	8,831	7,327	58	0,768∠-148°	0,865∠-163°	0,896∠-171°	0,902∠-174°	0,904∠-175°
3,0	10,453	9,541	49	0,851∠-153°	0,925∠-166°	0,947∠-173°	0,951∠-175°	0,953∠-176°
5,0	12,496	11,963	41	0,903∠-157°	0,956∠-168°	0,973∠-174°	0,976∠-176°	0,977∠-177°
– [1]	8,663	8,663	59	0,650∠-130°	0,863∠-150°	0,960∠-164°	0,981∠-169°	0,989∠-172°

Для сравнения в последней строке таблицы курсивом приведены результаты расчетов по формуле (2) согласно [1]. В виду отсутствия в [1] рекомендаций по расчету индуктивности экрана, последняя рассчитывалась по справочнику [4] как индуктивность полого прямолинейного провода кругового сечения при низкой частоте:

$$L_s = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{cr_s} - 1 \right).$$

Полученные результаты позволяют заключить следующее. Размеры “контура заземления”  $ABCD$  весьма существенно влияют на эффективность экранирования, причем она тем выше, чем больше расстояние от системы «проводник–экран» до заземленной плоскости. Так в случае, когда экран располагается почти вплотную к “земле”, даже при частоте  $f \approx 5f_{cp}$  согласно расчетам по уточненным формулам подавление мешающего магнитного поля не превышает 40% , согласно же [1] на этой частоте предотвращение экраном излучения магнитного поля практически полное, причем вне зависимости от взаимного расположения экрана и заземленной поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах. – М.: Мир, 1979. – 317 с.
2. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том 1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.
3. Новгородцев А.Б. ТОЭ<sub>2</sub>: Теория электромагнитного поля. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 248 с.
4. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.