

## ЭКРАНИРОВАНИЕ ОДНОРОДНОГО ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИМ КОЛЬЦОМ

*Шляхом аналітичного та чисельного моделювання досліджено ефективність екранування однорідного гармонійного магнітного поля за допомогою електропровідного кільця. Встановлено залежності коефіцієнту екранування від радіуса кільця та його поперечного перерізу. Визначено параметри електропровідного кільця, застосування якого дозволяє знизити діюче значення магнітної індукції на 30 %. Бібл. 11, рис. 5.*

*Ключові слова:* електропровідне кільце, електромагнітне екранування, аналітичне моделювання, Comsol Multiphysics.

*Путем аналитического и численного моделирования исследована эффективность экранирования однородного гармонического магнитного поля при помощи электропроводящего кольца. Установлены зависимости коэффициента экранирования от радиуса кольца и его поперечного сечения. Определены параметры электропроводящего кольца, применение которого позволяет снизить действующее значение магнитной индукции на 30 %. Библ. 11, рис. 5.*

*Ключевые слова:* электропроводящее кольцо, электромагнитное экранирование, аналитическое моделирование, Comsol Multiphysics.

**Введение.** Наличие ограничений по уровню низкочастотного магнитного поля (МП), в котором может стабильно работать современная электронная аппаратура, а также его негативное влияние на здоровье человека вызывают необходимость снижения магнитной индукции до допустимых значений.

Распространенным методом снижения МП является применение пассивных экранов различных типов. Для снижения уровня МП в локальной области применяются магнитоэстатические (магнитные) и электромагнитные экраны. Обычно такие экраны выполняются в форме короба или цилиндра [1-3]. Известны экраны, имеющие форму специфических тел вращения [4]. Для снижения МП в широкой области, например, вдоль трасс линий электропередачи, используют контурные экраны, представляющие собой один или несколько короткозамкнутых витков. В литературе широко рассмотрены контурные экраны для снижения МП воздушных линий электропередачи, выполненные в форме вытянутых прямоугольников [5-7]. Возможность применения контурных экранов для снижения МП в локальной области детально не изучена.

Электропроводящее кольцо является простейшим пассивным контурным экраном. Его использование для снижения однородного гармонического МП предложено в [1, с. 50]. Однако не было найдено распределение экранированного МП, не определена зависимость коэффициента экранирования от координат точки наблюдения, не рассмотрены массивные кольца. Решению этих задач посвящена настоящая статья.

**Аналитическое решение.** Рассмотрим электропроводящее кольцо радиуса  $r_1$  с круглым поперечным сечением радиуса  $r_2$ , находящееся в однородном гармоническом МП  $\vec{B}_0$  промышленной частоты 50 Гц (рис. 1).

Внешнее МП индуцирует в кольце ток проводимости, этот ток создает противоположно направленное вторичное МП. В результате суперпозиции внешнего и вторичного МП образуется результирующее поле, магнитная индукция которого в центральной области кольца меньше  $B_0$ . Для достижения максимальной эффективности экранирования плоскость кольца целесообразно ориентировать перпендикулярно внешнему МП. Поэтому будем считать, что вектор

магнитной индукции  $\vec{B}_0$  внешнего МП направлен параллельно оси кольца.

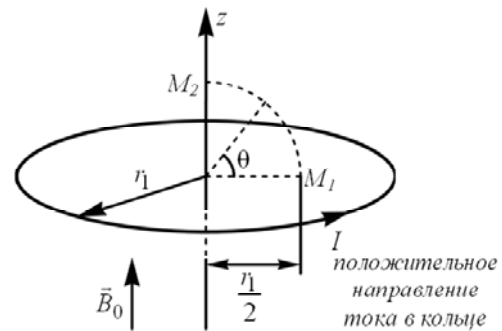


Рис. 1

Внешнее МП описывается частотой  $\omega$  и амплитудой  $B_0$ . Поскольку оно гармонично, то все зависящие от времени величины изменяются по гармоническому закону. Поэтому зависящие от времени величины далее описываются в терминах комплексных амплитуд. Без ограничения общности положим фазу внешнего МП равной нулю. Тогда комплексная амплитуда его магнитной индукции равна

$$\dot{\vec{B}}_0 = \vec{e}_z \cdot B_0,$$

где  $\vec{e}_z$  – единичный вектор, направленный параллельно оси кольца.

Если геометрические параметры электропроводящего кольца связаны соотношением

$$r_1 \gg r_2, \quad (1)$$

то оказывается возможным получить распределение экранированного МП аналитически.

Комплексная амплитуда силы тока, который наводится в кольце, определяется из закона Ома в интегральной форме и закона Фарадея:

$$\dot{i} = -\frac{j\omega\dot{\Phi}_0}{R + j\omega L}, \quad (2)$$

где  $\dot{\Phi}_0$  – комплексная амплитуда потока вектора  $\vec{B}_0$  через кольцо;  $R$ ,  $L$  – соответственно, активное сопротивление и коэффициент самоиндукции кольца;  $j$  – мнимая единица.

В силу допущения (1) поток внешнего МП через кольцо равен

$$\Phi_0 = B_0 \cdot \pi r_1^2; \quad (3)$$

активное сопротивление электропроводящего кольца

$$R = \rho \frac{2\pi r_1}{\pi r_2^2} = \frac{2\rho r_1}{r_2^2}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – его удельное сопротивление; коэффициент самоиндукции кольца [8, с. 207]

$$L = \mu_0 r_1 \cdot \left( \ln \frac{8r_1}{r_2} - \frac{7}{4} \right), \quad (5)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

С учетом (2) – (5) выражение для комплексной амплитуды силы тока в кольце имеет следующий вид:

$$\dot{I} = \frac{\pi}{\mu_0} \cdot \frac{r_1 B_0}{\frac{7}{4} - \ln \frac{8r_1}{r_2} + j \cdot \frac{2\rho}{\mu_0 \omega r_2^2}}. \quad (6)$$

Имея выражение для силы тока, наводимого в кольце, можно определить комплексную амплитуду магнитной индукции  $\dot{\vec{B}}^{coil}$  создаваемого им вторичного МП [9, 10]:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{B}_r^{coil}(r, z) &= \frac{\mu_0 \dot{I}}{2\pi} \cdot \frac{z}{r \sqrt{(r_1 + r)^2 + z^2}} \times \\ &\times \left[ -K(k) + \frac{r_1^2 + r^2 + z^2}{(r_1 - r)^2 + z^2} \cdot E(k) \right], \\ \dot{B}_z^{coil}(r, z) &= \frac{\mu_0 \dot{I}}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(r_1 + r)^2 + z^2}} \times \\ &\times \left[ K(k) + \frac{r_1^2 - r^2 - z^2}{(r_1 - r)^2 + z^2} \cdot E(k) \right], \\ \dot{B}_\phi^{coil} &\equiv 0, \end{aligned} \right. \quad (7)$$

где  $\dot{B}_r^{coil}$ ,  $\dot{B}_\phi^{coil}$ ,  $\dot{B}_z^{coil}$  – компоненты  $\dot{\vec{B}}^{coil}$  в цилиндрической системе координат (начало координат совпадает с центром кольца);  $K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}$  и

$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$  – полные нормальные эллиптические интегралы Лежандра, соответственно, 1-ого и 2-ого рода;  $k = \sqrt{\frac{4r_1 r}{(r_1 + r)^2 + z^2}}$  – числовой коэффициент.

Комплексная амплитуда магнитной индукции поля, образованного в результате суперпозиции внешнего МП и поля индуцированных в кольце токов, равна  $\dot{\vec{B}} = \vec{e}_z B_0 + \dot{\vec{B}}^{coil}$ . Следовательно, действующее значение магнитной индукции экранированного МП

$$B_{rms} = \frac{|\dot{\vec{B}}|}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{|B_0 + \dot{B}_z^{coil}|^2 + |\dot{B}_r^{coil}|^2}{2}}. \quad (8)$$

Коэффициент экранирования  $S$  определяется как отношение действующего значения магнитной индукции при использовании экрана к действующему значению магнитной индукции в его отсутствии [3, с. 27]. Следовательно,

$$S = \frac{\sqrt{|B_0 + \dot{B}_z^{coil}|^2 + |\dot{B}_r^{coil}|^2}}{B_0}, \quad (9)$$

где компоненты вектора  $\dot{\vec{B}}^{coil}$  и комплексная амплитуда тока  $\dot{I}$  задаются, соответственно, выражениями (7) и (6).

Полученные выражения (8) и (9) применимы для анализа экранирующих характеристик «тонких» электропроводящих колец, параметры которых удовлетворяют критерию (1).

**Численное моделирование.** Определение распределения МП вблизи массивного электропроводящего кольца аналитическими методами затруднительно. Поэтому целесообразно прибегнуть к численному моделированию.

Рассматриваемые в данной работе электромагнитные процессы протекают с промышленной частотой 50 Гц. Поэтому они описываются системой уравнений Максвелла в квазистационарном приближении. Распределение МП может быть получено путем решения уравнения закона полного тока в квазистационарном приближении, записанного в терминах магнитного векторного потенциала [11, с. 107]. При этом уместно использовать калибровку Вейля. Для решения этого уравнения, дополненного соответствующими условиями, накладываемыми на магнитный векторный потенциал на границе раздела «воздух-кольцо», использовался интерфейс «Magnetic Fields (mf)», который входит в «AC/DC Module» программной среды COMSOL Multiphysics [11].

Поскольку внешнее МП параллельно оси кольца, была использована осесимметричная модель. Ось симметрии модели, построенной в программной среде COMSOL Multiphysics, является ось электропроводящего кольца. Магнитное поле на границе расчетной области задавалось равным внешнему однородному МП. При этом размер расчетной области намного превосходил радиус кольца  $r_1$ . Во всех подобластях расчетной области использовалась сетка типа «Free Triangular». Максимальный размер элементов разбиения в воздушном пространстве не превышал  $r_1/20$ , максимальный размер элементов разбиения внутри сечения кольца не превышал  $r_2/10$ . Правильность численного решения была проверена путем сравнения с решениями, получаемыми при увеличении размеров расчетной области, и решениями, получаемыми при использовании более густой сетки. Корректность использованной компьютерной модели подтверждается совпадением при  $r_1 \gg r_2$  численного и аналитического решений.

**Результаты исследования и их анализ.** Электропроводящее кольцо характеризуется двумя геометрическими параметрами: радиусом кольца  $r_1$  и радиусом поперечного сечения  $r_2$ . Частота внешнего магнитного поля  $\omega = 2\pi \cdot 50$  с<sup>-1</sup>.

Исследуем зависимость коэффициента экранирования от  $r_2$ . Рассмотрим набор из пяти электропроводящих колец радиуса  $r_1 = 0.15$  м. Будем полагать, что кольца выполнены из алюминия, который обладает высокой электропроводностью (при относительно низкой цене). Радиус поперечного сечения наименьшего из них положим равным  $r_2 = 5$  мм, его объем обозначим  $V_0$ . Другие кольца пусть имеют большее поперечное сечение, а их объем равен  $2V_0, 3V_0, 4V_0$  и  $5V_0$ .

На рис. 2 представлено распределение коэффициента экранирования  $S$  в плоскости кольца ( $z = 0$ ). Кривая с номером  $k$  соответствует кольцу объема  $kV_0$ . Сплошные линии построены согласно выражению (9), точки – результаты численного моделирования.

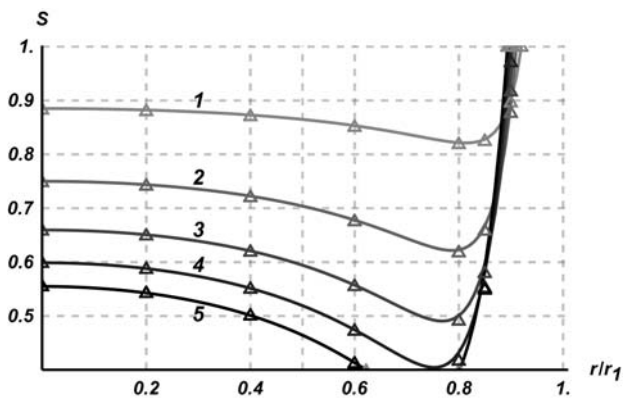


Рис. 2

Как видно из представленных распределений наибольшее снижение МП наблюдается в точке, удаленной от центра на расстояние  $(0.7 \div 0.8) \cdot r_1$ . Увеличение МП в точках  $r > 0.8 \cdot r_1$  обусловлено близостью контура кольца, по которому протекает наведенный ток.

На рис. 3 представлено распределение коэффициента экранирования  $S$  вдоль оси кольца ( $r = 0$ ).

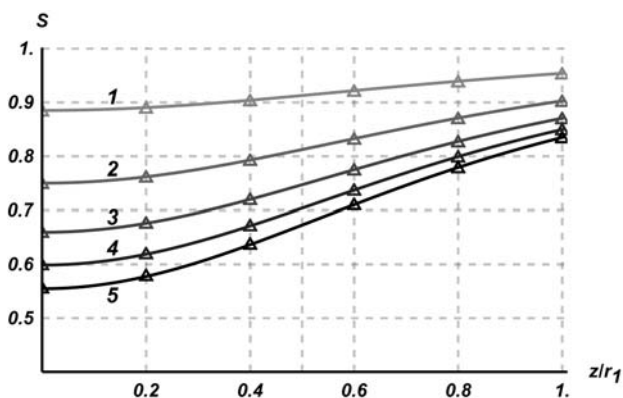


Рис. 3

Для всех колец зависимость  $S(z)$  монотонна: наибольшее снижение МП наблюдается в центре кольца, а при удалении от его плоскости индукция МП растет.

Из рис. 2 и рис. 3 видно, что область экранирования, расположенную в центральной области кольца, целесообразно ограничить сферой радиуса  $r_1/2$ . Коэффициент экранирования на границе этой области может превышать значения  $S$  для точек, лежащих на оси или в плоскости кольца. На рис. 4 представлено распределение  $S$  вдоль дуги  $r = r_1/2$ : значение  $\theta = 0$  соответствует точке  $M_1$  на рис. 1,  $\theta = \pi/2$  – точке  $M_2$ .

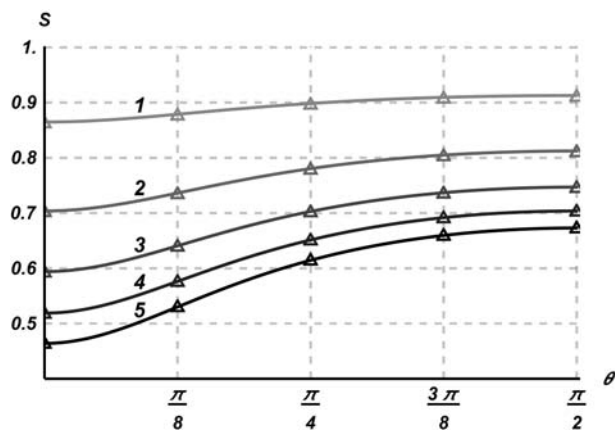


Рис. 4

Из полученных распределений можно сделать вывод, что электропроводящее кольцо радиуса  $r_1 = 0.15$  м с поперечным сечением радиуса  $r_2 = 5$  мм позволяет снизить уровень МП на 10 % (кривая 1 на рис. 2 – 4), с поперечным сечением радиуса  $r_2 = 7.1$  мм – на 20 % (кривая 2 на рис. 2 – 4), с поперечным сечением радиуса  $r_2 = 10$  мм – на 30 % (кривая 4 на рис. 2 – 4).

Исследуем зависимость коэффициента экранирования от радиуса кольца  $r_1$ . Так как значения  $S$  зависят от точки наблюдения, то введем  $S^* = \max\{S(r, z), r^2 + z^2 \leq (r_1/2)^2\}$ , где  $r_1/2$  – радиус области экранирования. На рис. 5 представлена зависимость  $S^*$  от радиуса кольца  $r_1$ . Радиус поперечного сечения кольца  $r_2$  пробегает значения от 5 мм до 11.2 мм: на рис. 5 кривая с номером  $k$  соответствует кольцу с поперечным сечением радиуса  $r_2 = \sqrt{k} \cdot 5$  (мм). Сплошные линии построены согласно выражению (9), точки – результаты численного моделирования.

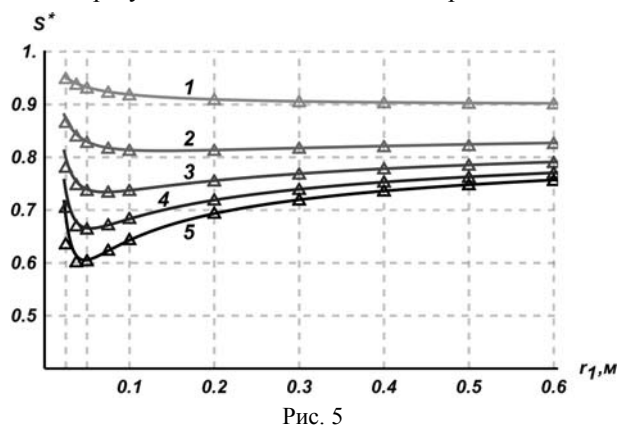


Рис. 5

Из (6) – (7) следует, что (формально) при  $r_1/r_2 \rightarrow \infty$   $S^* \rightarrow 1$ . Однако из рис. 5 видно, что при  $r_1 > 0.5$  м изменение коэффициента экранирования с увеличением радиуса кольца незначительно.

Как следует из рис. 5, зависимость  $S^*(r_1)$  имеет один минимум. Причем для проводящих колец с поперечным сечением  $r_2 \approx 10$  мм и более минимум достигается при  $r_1 \approx 0.05$  м. Дальнейшее увеличение радиуса кольца  $r_1$  при сохранении его поперечного сечения хотя и позволяет расширить область экранирования, но приводит к увеличению коэффициента экранирования, а значит к ухудшению эффективности экранирования МП электропроводящим кольцом.

## Выводы.

1. Предложены методы аналитического и численного моделирования, позволяющие находить распределение коэффициента экранирования при снижении уровня однородного гармонического магнитного поля электропроводящим кольцом.
2. Область экранирования электропроводящим кольцом целесообразно ограничивать сферой с радиусом, равным половине радиуса кольца.
3. Электропроводящее кольцо радиуса 0.15 м с поперечным сечением радиуса 5 мм позволяет снизить уровень МП на 10 %, с поперечным сечением радиуса 7.1 мм – на 20 %, с поперечным сечением радиуса 10 мм – на 30 %.
4. Зависимость коэффициента экранирования электропроводящего кольца от его радиуса имеет немонотонный характер: для заданного поперечного сечения существует такой радиус кольца, при котором эффективность экранирования максимальна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогинский В.Ю. Экранирование в радиоустройствах. – Л.: Энергия, 1969. – 112 с.
2. Шапиро Д.Н. Электромагнитное экранирование. – Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2010. – 120 с.
3. Каден Г. Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 327 с.
4. Ziolkowski M., Gratkowski S. Active, passive and dynamic shielding of static and low frequency magnetic fields // XV International Symposium on Theoretical Engineering. – VDE, 2009. – pp. 1-5.
5. Дикой В.П., Токарский А.Ю., Рубцова Н.Б., Красин О.В. Элементы теории контурных экранов // Повышение эффективности работы энергосистем: Труды ИГЭУ. – 2001. – №4. – С. 225-254.
6. Brandão Faria J.A., Almeida M.E. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – Vol.22. – №2. – pp. 951-959.
7. Lee B.Y., Myung S.H., Cho Y.G., Lee D.I., Lim Y.S., Lee S.Y. Power frequency magnetic field reduction method for residents in the vicinity of overhead transmission lines using passive loop // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2011. – Vol.6. – №6. – pp. 829-835.
8. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
9. Simpson J.C., Lane J.E., Immer C.D., Youngquist R.C. Simple analytic expressions for the magnetic field of a circular current loop. – Preprint, NASA Kennedy Space Center, 2001. – P. 7.
10. Zhao D., Gao L. Spatial distribution of the magnetic field generated by a circular arc current // Advanced studies in theoretical physics. – 2010. – Vol.4. – №6. – pp. 275-282.
11. Comsol Multiphysics Modeling Guide. – Version: COMSOL 3.5a. – November, 2008.

## REFERENCES

1. Roginskiy V.Yu. *Ekranirovaniye v radioustroystvakh* [Shielding in radio devices]. Leningrad, Energiya Publ., 1969. 112 p. (Rus).
2. Shapiro D.N. *Elektromagnitnoye ekranirovaniye* [Electromagnetic shielding]. Dolgoprudny, «Intellekt» Publ. House, 2010. 120 p. (Rus).
3. Kaden G. *Elektromagnitnyye ekrany v vyisokochastotnoy tehnike i tehnike elektrosvyazi* [Electromagnetic shields in high-frequency technology and communication technology]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1957. 327 p. (Rus).

4. Ziolkowski M., Gratkowski S. Active, passive and dynamic shielding of static and low frequency magnetic fields. *XV International Symposium on Theoretical Engineering*. VDE, 2009, pp. 1-5.
5. Dikoy V.P., Tokarskiy A.Yu., Rubtsova N.B., Krasin O.V. Some theoretical aspects of loop shields. *Povysheniye effektivnosti raboty energosistem: Trudy IGEU – Improvement of power system efficiency: Proceedings of the Ivanovo State Power University*, 2001, no.4, pp. 225-254. (Rus).
6. Brandão Faria J.A., Almeida M.E. Accurate calculation of magnetic-field intensity due to overhead power lines with or without mitigation loops with or without capacitor compensation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, vol.22, no.2. pp. 951-959. doi:10.1109/tpwr.2006.883025.
7. Lee B.Y., Myung S.H., Cho Y.G., Lee D.I., Lim Y.S., Lee S.Y. Power frequency magnetic field reduction method for residents in the vicinity of overhead transmission lines using passive loop. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2011, vol.6, no.6, pp. 829-835. doi:10.5370/jeet.2011.6.6.829.
8. Kalantarov P.L., Tseytlin L.A. *Raschet induktivnostey* [Inductance calculations]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p. (Rus).
9. Simpson J.C., Lane J.E., Immer C.D., Youngquist R.C. *Simple analytic expressions for the magnetic field of a circular current loop*. Preprint, NASA Kennedy Space Center Publ., 2001. 7 p.
10. Zhao D., Gao L. Spatial distribution of the magnetic field generated by a circular arc current. *Advanced Studies in Theoretical Physics*, 2010, vol.4, no.6, pp. 275-282.
11. Comsol Multiphysics Modeling Guide. Version: COMSOL 3.5a. November, 2008.

Поступила (received) 09.12.2014

Гринченко Владимир Сергеевич<sup>1</sup>, к.т.н.,  
Чунихин Константин Вадимович<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19, тел/phone: +38 066 489 44 99, e-mail: vsgrinchenko@gmail.com

V.S. Grinchenko<sup>1</sup>, K.V. Chunikhin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine», 19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

### Shielding of a uniform alternating magnetic field using a circular passive loop.

The magnetic and electromagnetic shields are used to reduce the magnetic field in local spaces. Usually these shields are implemented in the form of a box or a cylinder. At the same time the magnetic field reduction in local spaces by means of passive loops is not considered in detail yet. So, the present study considers shielding capabilities of a circular passive loop. The authors have performed an analytical and numerical modeling of a process of a uniform harmonic magnetic field shielding. The simulated results permit to find out the spatial distribution of the shielded magnetic field. Dependencies of shielding effectiveness on the passive loop radius and cross-section are determined. Moreover, the non-monotonic behavior of the loop radius dependence is shown. We have substantiated that the shielded volume of a circular passive loop is advisable to limit by the sphere with a half loop radius. Presented results give parameters of the circular passive loop that reduces the rms value of the magnetic flux density by 30 %. References 11, figures 5.

Key words: circular passive loop, electromagnetic shielding, analytical modeling, Comsol Multiphysics.