

ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА ЕКРАНИРАЩИЯ ЕФЕКТ НА ПЛОСКИ ЕКРАНИ

Йоана Маринова¹

¹ Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700, София

РЕЗЮМЕ: Представена е методика за изчисляване на електромагнитен екран за намаляване интензивността на електромагнитните смущения.

CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC SCREENS

Joana Marinova¹

¹ University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

ABSTRACT. Methodology for calculating electromagnetic screen to reduce the intensity of electromagnetic interference.

Въведение.

Електрообзавеждането (ЕО) на една електроенергийна система (ЕЕС), което включва различни видове електрически машини и електромагнитни апарати за променлив и постоянен ток, кабели с различно предназначение и сечение, разпределителни табла и устройства и др. се явява източник на електромагнитни полета (ЕМП). Тези ЕМП се разпространяват в околното пространство и оказват влияние на работата на високочувствителни елементи към различните видове автоматични устройства, на електропроводни линии за пренасяне на информация, на устройствата за релейна защита и противоаварийна автоматика, на електронно-изчислителни комплекси и телекомуникационни системи, а също така и на обслужващия персонал. Тези електромагнитни полета пораждат изключително остър проблем и задача за решаване, а именно: осигуряване на електромагнитна съвместимост (ЕМС) на всички електротехнически средства, които работят в границите на определено пространство, за осигуряване на електромагнитна екология (ЕМЕ) за човека и околната среда.

За осигуряване на електромагнитната съвместимост и електромагнитната екология в границите на даден обект (електроцентрала, подстанция, открита разпределителна уредба, електропровод, жилищен блок, административна сграда и др) е необходимо теоретично да се обосноват и експериментално да се докаже практическата приложимост на методи за решаването на определени задачи.

За спазване на санитарно-хигиенните норми и осигуряване работоспособност на различни видове електротехнически устройства, чувствителни към влиянието на външни електромагнитни полета е необходимо решаването на следните задачи:

1. Определяне напрегнатостта на електрическото E и на магнитното H поле или плътността на енергийния поток S в определена точка от околното пространство.
2. Определяне на коефициента на намаляване интензивността на електромагнитното поле при зададено разстояние между източника на ЕМП и определена точка от околното пространство (в която се намира човек или чувствително на въздействието на ЕМП техническото средство).
3. Определяне на необходимото разстояние, между източник на ЕМП и определена точка от околното пространство, в която може да се намира човек или чувствително на ЕМП техническо средство.

Поставените задачи изключително много се усложняват, когато в дадена точка от околното пространство на даден обект трябва да се определя интензивността на резултантното електромагнитно поле, което се явява сума от действието на електромагнитните полета на няколко източника.

Един от най-ефективните методи за намаляване на интензивността на ЕМП се явява екранирането.

В доклада е представен метод за изчисляването на екраниращия ефект плосък екран за намаляване интензивността на електромагнитното поле.

Метод за изчисляване на екраниращия ефект на плоски екрани.

За оценка качествата на екрана се използва понятието ефективност на екранирането [4]. Тази ефективност определя отношението на напрегнатостта на полето в произволна точка от дадено защитавано пространство при

отсъствието на екран към напрегнатостта на полето в същата точка при наличието на екран.

$$E_E = \frac{E_0}{E_{\text{ек}}} = \frac{E_{0m}}{E_{\text{ек}m}}; \quad E_H = \frac{H_0}{H_{\text{ек}}} = \frac{H_{0m}}{H_{\text{ек}m}}, \quad (2)$$

където E_E , E_H – ефективност на екранирането при действието на електрическо и магнитно поле;

E_0 , H_0 , E_{0m} , H_{0m} – ефективни стойности и амплитуди на напрегнатостта на електрическото и магнитното поле в разглежданата точка от пространството при отсъствие на екран;

$E_{\text{ек}}$, $H_{\text{ек}}$, $E_{\text{ек}m}$, $H_{\text{ек}m}$ – ефективни и амплитудни стойности на напрегнатостта на електрическото и магнитно поле след екрана в същата точка.

Ефективността на екранирането зависи от размера и формата на екрана, дебелината и електрическите свойства на материала, от които е произведен, а също така и наличието на отвори с различна форма.

За решаване на поставената задача се разглежда плосък плътен неферомагнитен екран, върху които електромагнитните вълни падат нормално към повърхността му.

Разглежда се падането на плоска електромагнитна вълна върху екран с дебелина d . На фиг.1 е представен схематично безкраен проводящ плосък екран с комплексно вълново съпротивление на материала Z_2 , разположен във въздушна среда с вълново съпротивление $Z_1=Z_3=Z_0$. На екрана е показана посоката на падане на електромагнитната вълна върху екрана.

Приемат се следните означения:

H_{ms1} – максимална стойност на напрегнатостта на магнитното поле, което преминава през повърхността 1 на екрана;

H_{ms2} – максимална стойност на напрегнатостта на магнитното поле на противоположната страна на екрана (повърхност 2), които има дебелина d .

Приема се, че H_{ms1} и H_{ms2} са комплексни стойности на амплитудите на напрегнатостта на тези полета. Съгласно резултатите, получени в [3], за отношението на комплексните амплитуди е в сила израза

$$\frac{H_{ms1}}{H_{ms2}} = \frac{Z_2 + Z_3}{2Z_2} \left(e^{\alpha d} - M_1 M_2 e^{-\alpha d} \right), \quad (2)$$

където $M_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$ – комплексен коефициент на отразяване от повърхността 1 на екрана;

$$M_2 = \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} \text{ - комплексен коефициент на}$$

отразяване от повърхността 2;

$$Z_1 = Z_3 = Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377\Omega \text{ - вълново}$$

съпротивление във вакуум (въздух);

$$Z_2 = (1+j) \sqrt{\frac{\omega \mu}{2 \gamma}} \text{ - вълново съпротивление на}$$

екрана;

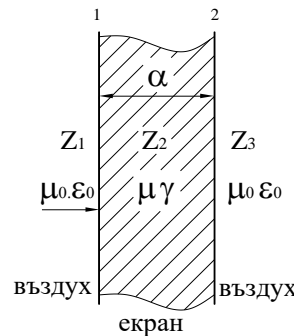
$$a = (1+j) \frac{1}{\Delta} \text{ - честота, } \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

μ – магнитна проницаемост на екрана (за неферомагнитни екрани от алуминий и мед);

γ – специфична проводимост на екрана;

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \text{ - магнитна константа;}$$

$$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \text{ - електрическа константа;}$$



Фиг.1

При внасянето на екран в електромагнитното поле, напрегнатостта на магнитното поле пред екрана се увеличава, а зад екрана се намалява. Електромагнитната вълна, която е съществувала в разглежданата област от пространството, до внасянето на екрана е възможно да се идентифицира с вълна, падаща на екрана при внасянето на екран в тази област. Ако вълната пада нормално на проводящата повърхност на екрана, то между амплитудата на падащата вълна H_{0m} и амплитудата H_{ms1} съществува зависимостта [3,6]

$$H_{ms1} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot H_{0m} \quad (3)$$

където $\frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$ – коефициент на преминаване на вълната.

Амплитудата H_{ms2} в резултат на непрекъснатост на тангенциалните съставлящи на напрегнатостта на магнитното поле на границата "2" е равна на напрегнатостта на полето зад екрана $H_{\text{ек}m}$:

$$H_{ms2} = H_{\text{ек}m} \quad (4)$$

С използване на изразите (2), (3) и (4) се определя отношението

$$\frac{H_{0m}}{H_{\text{ек}m}} = \frac{(Z_2 + Z_1)(Z_2 + Z_3)}{4Z_2Z_1} \left(e^{\alpha d} - M_1 M_2 e^{-\alpha d} \right) = \frac{(Z_2 + Z_1)(Z_2 + Z_3)e^{\alpha d} - (Z_2 + Z_1)(Z_2 + Z_3)e^{-\alpha d}}{4Z_1Z_2} \quad (5)$$

Замествайки в израз (5) стойностите $Z_1 = Z_2 = Z_0$; Z_2 и "а" и след подходящо преобразуване се получава израза

$$\frac{\dot{H}_{om}}{\dot{H}_{ek,m}} = \frac{(1+a+j)^2 \cdot e^{\frac{(1+j)d}{\Delta}} - (1-a+j)^2 \cdot e^{-\frac{(1+j)d}{\Delta}}}{4a(1+j)}, \quad (6)$$

$$a = \gamma \cdot Z_0 \cdot \Delta = \sqrt{\frac{2\gamma}{\omega \epsilon_0}}. \quad (7)$$

За комплексно-спрегнатото число се записва израза

$$\frac{\dot{H}_{om}^*}{\dot{H}_{ek,m}^*} = \frac{(1+a-j)^2 \cdot e^{\frac{(1-j)d}{\Delta}} - (1-a-j)^2 \cdot e^{-\frac{(1-j)d}{\Delta}}}{4a(1-j)} \quad (8)$$

От (8) за отношението на модулите \dot{H}_{om} и $\dot{H}_{ek,m}$ се получава израза

$$E_H = \frac{\dot{H}_{om}}{\dot{H}_{ek,m}} = \sqrt{\frac{\dot{H}_{om}^* \dot{H}_{om}}{\dot{H}_{ek,m}^* \dot{H}_{ek,m}}}. \quad (9)$$

От съвместното решаване на (6), (8) и (9) и след преобразуване се получава израза

$$E_H = \frac{\dot{H}_{om}}{\dot{H}_{ek,m}} = \frac{1}{4} \sqrt{\left[\left(\frac{2}{a} + a \right)^2 + 4 \right] \cdot \operatorname{ch} \frac{2d}{\Delta} + 4 \left(\frac{2}{a} + a \right) \cdot \operatorname{sh} \frac{2d}{\Delta} - \sqrt{\left[\left(\frac{2}{a} - a \right)^2 - 4 \right] \cdot \cos \frac{2d}{\Delta} - 4 \left(\frac{2}{a} - a \right) \cdot \sin \frac{2d}{\Delta}} \quad (10)$$

По формула (10) ефективността на екранирането е възможно да се изчислява и за много високи честоти (включително за рентгеново излъчване).

За радиочестоти и метални екрани $|Z_2| \ll Z_1 = Z_3 = Z_0$, при което $M_1 = M_2 = -1$. При тези условия формула (10) е възможно да се опрости. В този честотен диапазон стойността на коефициента „а“ е много голяма. Така например, при честота $f \leq 10^{10} \text{ Hz}$, $\omega = 2\pi f \leq 6,28 \cdot 10^{10} \text{ rad/sec}$ за алуминиев екран ($\gamma_{Al} = 36 \cdot 10^6 \text{ S/m}$) за стойността на коефициента „а“ се получава:

$$a \geq \sqrt{\frac{2\gamma_{Al}}{\omega \epsilon_0}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 36 \cdot 10^6}{6,28 \cdot 10^{10} \cdot 8,8542 \cdot 10^{-12}}} = 11380$$

Подкореният израз на формула (10) допуска разложение в ред по степени на „а“

$$E_H^2 = \frac{1}{4} \left(\operatorname{ch} \frac{2d}{\Delta} - \cos \frac{2d}{\Delta} \right) a^{-2} + \frac{1}{2} \left(\operatorname{sh} \frac{2d}{\Delta} - \sin \frac{2d}{\Delta} \right) a^{-1} + \frac{1}{2} \left(\operatorname{ch} \frac{2d}{\Delta} + \cos \frac{2d}{\Delta} \right) a^0 + \frac{1}{4} \left(\operatorname{sh} \frac{2d}{\Delta} - \sin \frac{2d}{\Delta} \right) a + \frac{1}{16} \left(\operatorname{ch} \frac{2d}{\Delta} - \cos \frac{2d}{\Delta} \right) a^2 \quad (11)$$

От (11) следва, че при големи стойности на „а“ за всички екрани, с изключение на свръхтънките, за които се изпълнява условието $\frac{2a}{\Delta} \rightarrow 0$ ще бъде в сила формулата

$$E_H = \frac{a}{4} \sqrt{\operatorname{ch} \frac{2d}{\Delta} - \cos \frac{2d}{\Delta}} = \sqrt{\frac{\gamma}{8\omega \epsilon_0} \left[\operatorname{ch}(d\sqrt{2\omega \mu_0 \gamma}) - \cos(d\sqrt{2\omega \mu_0 \gamma}) \right]} \quad (12)$$

която е приложима за практически изчисления.

Интересни резултати се получават при разложение във формула (10) на функциите $\operatorname{ch} \frac{2d}{\Delta}$, $\operatorname{sh} \frac{2d}{\Delta}$, $\cos \frac{2d}{\Delta}$, $\sin \frac{2d}{\Delta}$ в ред по степени на $\frac{2a}{\Delta}$. Ако се използват известните формули за разположение и ако се отчете, че

$$a \cdot \frac{2d}{\Delta} = 2d \cdot \gamma \cdot Z_0; \quad \frac{2d}{\Delta a} = \omega \cdot d \cdot \gamma \cdot Z_0 \cdot \epsilon_0 = \frac{\omega \cdot d}{c} = \frac{2\pi \cdot f \cdot d}{c},$$

(където c – скорост на светлината), след преобразуване се получава израза

$$E_H = \left(1 + \frac{d\gamma Z_0}{2} \right)^2 + \left(\frac{\pi f d}{c} \right)^2 \times \left[\frac{2}{21} + \frac{8}{31} d\gamma Z_0 + \frac{16}{41} (d\gamma Z_0)^2 + \frac{16}{51} (d\gamma Z_0)^3 + \frac{8}{61} (d\gamma Z_0)^4 \right] + 16 (d\gamma Z_0)^2 \left(\frac{\pi f d}{c} \right)^4 \times \left[\frac{2}{6!} + \frac{8}{7!} d\gamma Z_0 + \frac{16}{8!} (d\gamma Z_0)^2 + \frac{16}{9!} (d\gamma Z_0)^3 + \frac{8}{10!} (d\gamma Z_0)^4 \right] + \dots \quad (13)$$

При относително ниски честоти, когато се изпълняват условията $f < \frac{c}{d^2 \cdot \gamma \cdot Z_0}$ и $d \cdot \gamma \cdot Z_0 \gg 1$, членовете с

множителите $\frac{\pi \cdot f \cdot d}{c}$ в израз (13) е възможно да се пренебрегнат и да се получи сравнително проста формула за определяне ефективността от използването на плоски екрани в следния вид

$$E_H \cong 1 + \frac{d\gamma Z_0}{2} \quad (14)$$

В голяма част от случаите в (14) „1“ е възможно да се пренебрегне.

При изпълнение на условието $d\gamma Z_0 \ll 1$ (при свръхтънки екрани или за метали с малка стойност на проводимостта) и $\left(\frac{\pi \cdot f \cdot d}{c} \right)^2 \gg d\gamma Z_0$, формула (13) се представя със следния приблизителен израз

$$E_H \cong \sqrt{\left(1 + \frac{\pi \cdot f \cdot d}{c}\right)^2} \quad (15)$$

Получените формули са приложими за плоски екрани и плоски електромагнитни вълни, които падат нормално към повърхността на екрана, при които съществуват само напречни съставлящи на векторите E и H.

Получените формули за определяне ефективността на екрана са приложими и за магнитни екрани, когато относителната магнитна проницаемост на метала μ е възможно да се приеме за постоянна. В този случай в приведените формули е необходимо да се направи заместването

$$a = \sqrt{\frac{2\gamma}{\varepsilon_0 \omega \mu}}; \quad \Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu}}$$

при което параметъра $d\gamma Z_0$ не се променя, а вместо

параметъра $\frac{\pi \cdot f \cdot d}{c}$ е необходимо да се използва

параметъра $\frac{\pi \cdot f \cdot d \cdot \mu}{c}$.

Тъй като за въздух

$$\frac{\dot{E}_{om}}{H_{om}} = \frac{\dot{E}_{ek,m}}{H_{ek,m}} = Z_0,$$

$$\text{то } \frac{\dot{E}_{om}}{\dot{E}_{ek,m}} = \frac{H_{om}}{H_{ek,m}}$$

и следователно, $E_E = E_H$, т.е. за изчисляване ефективността на екранирането на електрически полета е допустимо използването на формулите (10) и (12).

Литература

- Иванов И.В., Велев Г.Ц. Измервания и контрол в безопасността на труда. *Габрово, "Габро Принт", 2008*
- Ненова З.П., Велев Г.Ц. Измервания и контрол в безопасността на труда. *Габрово, "Габро Принт" 2008*
- Каден Г. Электромагнитные экраны. -М.;Л: Госэнергоиздат, 1957-306 с.
- Нетушил А.В., Поливанов К.М. основы электротехники- Ч.3.М; Л;: Госполитиздат, 1956,-192с.
- Туровский Я. Техническая электродинамика- М: Энергия, 1974-488 с.
- Франке В. А. Методика расчета экранов для рабочих индукторов и согласующих(к трансформаторов плавильно-закалочных высокочастотных установок-В кн.: Защита от действия электромагнитных полей и электрического тока в промышленности.-Л, 1963, с. 91-97
- Шапира Д.Н. Расчет эффективности экранирующих камер. М: Радиотехника, 195510, №4, с.36-47.