НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНА УСТАНОВА
«ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ МАГНЕТИЗМУ
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ»
(ДУ «ІТПМ НАН України»)

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ТА МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ПРИ ДВОСТОРОННЬОМУ ЗАЗЕМЛЕННІ ЕКРАНІВ КАБЕЛІВ

1. **ГРІНЧЕНКО Володимир Сергійович** – кандидат технічних наук, заступник директора з наукової роботи ДУ «ІТПМ НАН України».

2. **ТКАЧЕНКО Олександр Олегович** – кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник ДУ «ІТПМ НАН України».

Харків – 2020

Чинні в Україні санітарні норми по гранично допустимим рівням індукції магнітного поля кабельних ліній (МП КЛ)[1,2]

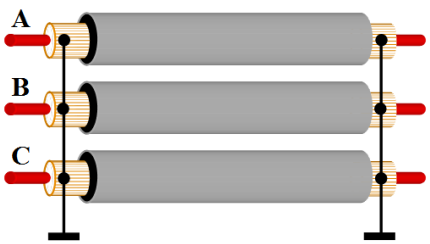
Найменування територій, на яких регламентується рівень магнітного поля промислової частоти	Діюче значення індукції магнітного поля на висоті 0,5 м від поверхні землі або в житлових приміщеннях
Усередині житлових приміщень	0,5 мкТл
На віддалі до 50 см від стін та підлоги житлових приміщень та від побутових електричних приладів	3 мкТл
На території житлової забудови	10 мкТл
У населеній місцевості, поза зоною житлової забудови (землі в межах міста з урахуванням перспективного розвитку на 10 років, приміські та зелені зони, землі селищ міського типу, у межах селищної межі і сільських населених пунктів), а також на території городів і садів	20 мкТл
У ненаселеній місцевості (незабудована територія, яку відвідують люди і яка доступна для транспорту, сільськогосподарських машин)	50 мкТл

1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
2. СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49:2011.2. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ: Настанова (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 139 с.

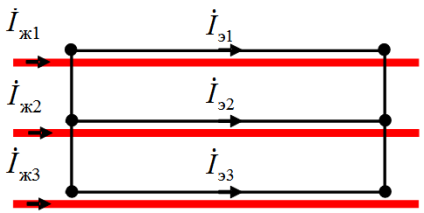
Відома аналітична методика[1] розрахунку МП КЛ при двосторонньому заземленні екранів кабелів

Типова конструкція кабелю

Двостороннє заземлення екранів кабелів



Еквівалентна схема



МП КЛ при двосторонньому заземленні екранів: $\dot{\vec{B}}_{кл} = \sum_k \dot{\vec{B}}_{ж} + \sum_k \dot{\vec{B}}_{э}$,

де $\dot{\vec{B}}_{ж}$ та $\dot{\vec{B}}_{э}$ – індукція МП струмів жил і екранів кабелів, відповідно.

Методика[1], СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання, *скасована в 2016 році*

$$B_{кл} = B_{ж} \cdot m \ ,$$

де $$m = \frac{I_{ж} - I_{э}}{I_{ж}} \ .$$

Недоліки методики, що передувала представленій роботі

1) Для визначення коефіцієнта ослаблення *m* некоректно використовуються діючі значення струмів, що призводить до суттєвої похибки.
2) Методика не враховує схему прокладки кабелів КЛ.

Значення коефіцієнта ослаблення m[1]

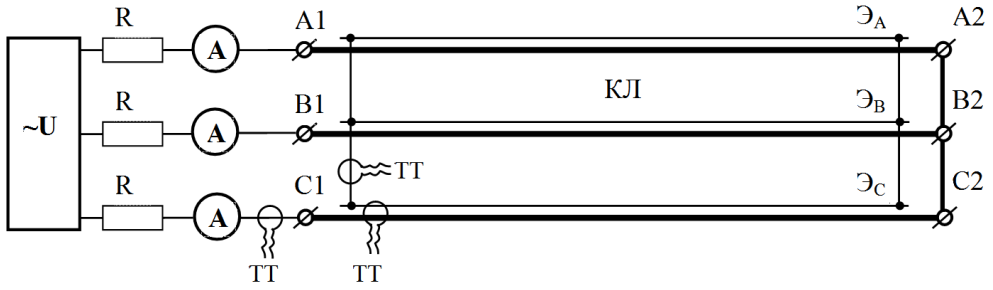
Середньогеометрична відстань між кабелями, м	Переріз екрана, мм^2	*m**
0,1	25	0,9
	50	0,75
	100	0,5
	150	0,4
	200	0,3
0,2	25	0,8
	50	0,7
	100	0,4
	150	0,3
	200	0,2
0,5	25	0,75
	50	0,55
	100	0,3
	150	0,25
	200	0,1

*У разі перерізу екрана або відстані між кабелями, які є проміжними до наведених у таблиці, значення коефіцієнта *m* обчислюють інтерполяцією.

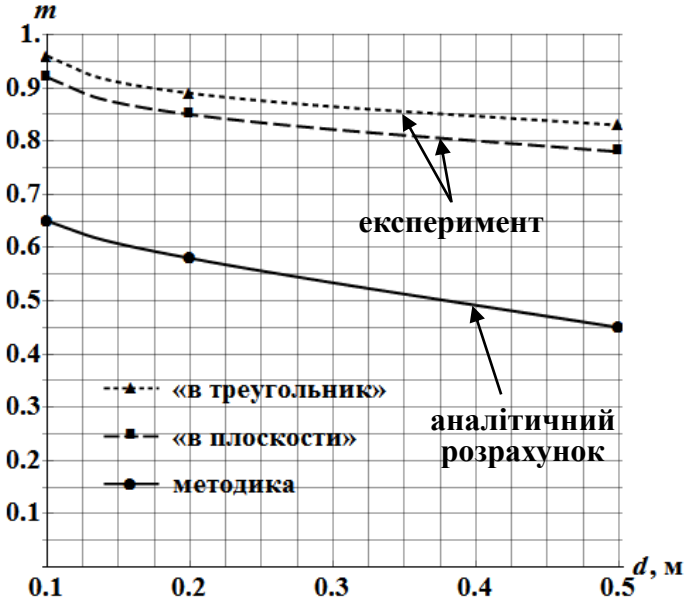
1. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика. – Київ: Мінпаливенерго України, 2008 – С. 34.

Експериментальна оцінка похибки визначення коефіцієнта ослаблення *m* МП КЛ за відомою методикою СОУ-Н ЕЕ 20.179 редакції 2008 р.

Експериментальна установка для лабораторних випробувань КЛ із 3-х кабелів типу АПвЕгаПу-110 1×240/70 за параметрами магнітного поля:



Співставлення аналітичної[1] та експериментальних залежностей *m*(*d*)



Похибка значень коефіцієнтів ослаблення *m* за відомою методикою[1] для кабелів типуАПвЕгаПу-110 1×240/70

d, м	$m_р$	$m_{вим.тр}$	$m_{вим.пл}$	$\delta_{тр}$, %	$\delta_{пл}$, %
0,1	0,65	0,96	0,93	32	30
0,2	0,58	0,89	0,85	35	32
0,5	0,45	0,83	0,78	46	42

1. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика. – Київ: Мінпаливенерго України, 2008 – С. 34.

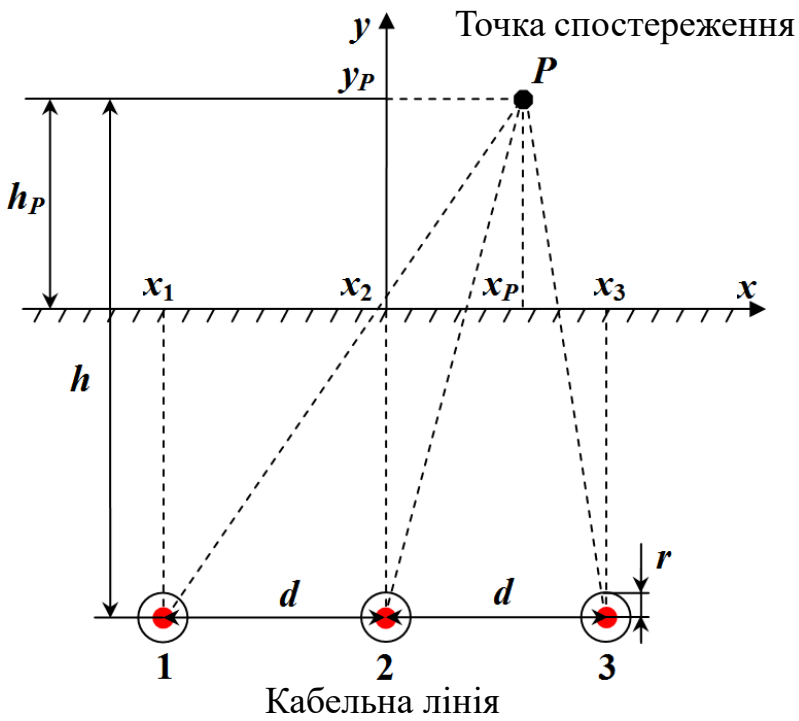
Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розвиток теоретичних засад моделювання та розробка методів розрахунку магнітного поля високовольтних трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні їх екранів за допомогою аналітичних розв’язків.

Задачі:

1. Розробити узагальнену математичну модель МП трифазних КЛ при двосторонньому заземленні власних екранів кабелів на основі аналітичних розв’язків та оцінити її похибку, обумовлену нерівномірністю розподілу ґустини струму в екранах кабелів.
2. Отримати співвідношення для інженерного розрахунку коефіцієнта екранування МП КЛ при двосторонньому заземленні екранів КЛ в залежності від параметрів кабелів для типових схем їх прокладання («у трикутник», «у площині»).
3. Отримати співвідношення для інженерного розрахунку коефіцієнта екранування МП КЛ при двосторонньому заземленні екранів КЛ, охоплених феромагнітними осердями, в залежності від параметрів осердь та параметрів кабелів для типових схем їх прокладання – «у трикутник» та «у площині».
4. Верифікувати отримані розрахункові співвідношення шляхом експерименту та чисельного розрахунку.
5. Розробити методику розрахунку магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні їх екранів та струмів в екранах.

Діюче значення індукції МП КЛ при двосторонньому замиканні екранів



Основні припущення:

1. Кабелі КЛ, що працює в сталому симетричному режимі (50 Гц), прямолінійні, нескінченно довгі та укладені паралельно один одному.
2. Двостороннє заземлення екранів кабелів КЛ заміщується їх двостороннім замиканням.
3. Густина індукованого струму в екрані кожного кабелю рівномірна в поперечному перерізі.
4. Товщина екрана істотно менша за його радіус, що дозволяє розглядати екран кабелю як циліндричну поверхню.
5. Відстань до точки спостереження МП КЛ мінімум удвічі більша за відстань між кабелями.

Нормоване діюче значення індукції МП КЛ в точці *P*:

$$B_{\text{кл}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left|\dot{B}_x\right|^2 + \left|\dot{B}_y\right|^2} \qquad (1)$$

Просторові компоненти індукції МП КЛ:

$$\dot{B}_x = \sum_{k=1}^{3}\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\dot{I}_{\text{ж}k} + \dot{I}_{\text{э}k}\right)\cdot\frac{-(y_p - y_k)}{(x_p - x_k)^2 + (y_p - y_k)^2} \quad , \quad \dot{B}_y = \sum_{k=1}^{3}\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\dot{I}_{\text{ж}k} + \dot{I}_{\text{э}k}\right)\cdot\frac{x_p - x_k}{(x_p - x_k)^2 + (y_p - y_k)^2} \qquad (2)$$

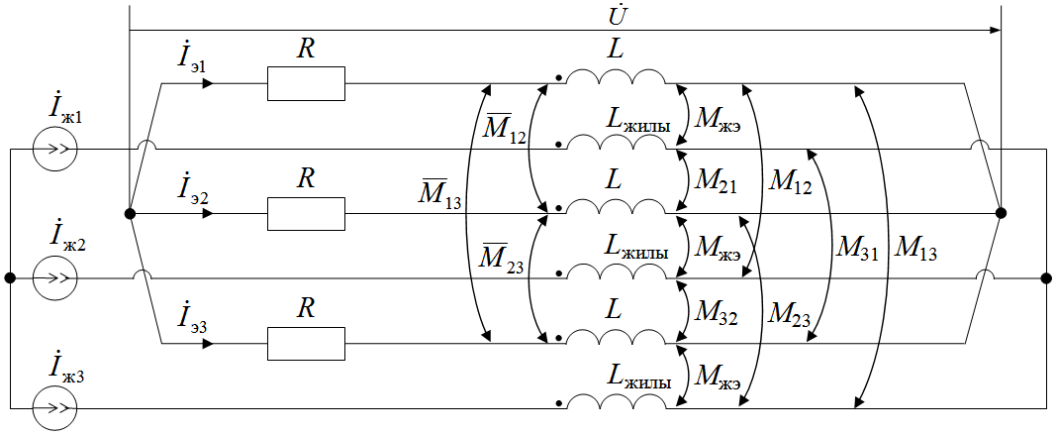
де (x_p,y_p) – координати точки спостереження *P*; (x_k,y_k) – координати вісі *k*-ого кабелю;

$\dot{I}_{\text{ж}k}$ та $\dot{I}_{\text{э}k}$ – комплексні амплітуди струмів в жилі та екрані *k*-ого кабелю, відповідно.

Отже, необхідно визначити комплексні амплітуди струмів в екранах КЛ.

Визначення комплексних амплітуд струмів в екранах трифазної КЛ

Еквівалентна електрична схема трифазної КЛ з двосторонньо замкнутими екранами:



Математична модель, що описує електромагнітні процеси в екранах кабелів КЛ:

$$\begin{cases} \dot{I}_{э1}(R+j\omega L)+\dot{I}_{ж1}\,j\omega M_{жэ}+\left(\dot{I}_{ж2}+\dot{I}_{э2}\right)j\omega M_{12}+\left(\dot{I}_{ж3}+\dot{I}_{э3}\right)j\omega M_{13}=\dot{U}_1\,, \\ \dot{I}_{э2}(R+j\omega L)+\dot{I}_{ж2}\,j\omega M_{жэ}+\left(\dot{I}_{ж1}+\dot{I}_{э1}\right)j\omega M_{21}+\left(\dot{I}_{ж3}+\dot{I}_{э3}\right)j\omega M_{23}=\dot{U}_2\,, \\ \dot{I}_{э3}(R+j\omega L)+\dot{I}_{ж3}\,j\omega M_{жэ}+\left(\dot{I}_{ж1}+\dot{I}_{э1}\right)j\omega M_{31}+\left(\dot{I}_{ж2}+\dot{I}_{э2}\right)j\omega M_{32}=\dot{U}_3\,, \\ \dot{I}_{э1}+\dot{I}_{э2}+\dot{I}_{э3}=0. \end{cases} \qquad \begin{cases} \dot{I}_{ж1}=I_0\cdot e^{-j\cdot\frac{2\pi}{3}}, \\ \dot{I}_{ж2}=I_0\,, \\ \dot{I}_{ж3}=I_0\cdot e^{j\cdot\frac{2\pi}{3}}. \end{cases} \tag{1}$$

$\dot{U}_1=\dot{U}_2=\dot{U}_3=\dot{U}$ – падіння напруги на кожному екрані.

Індуктивність екрана[1]:

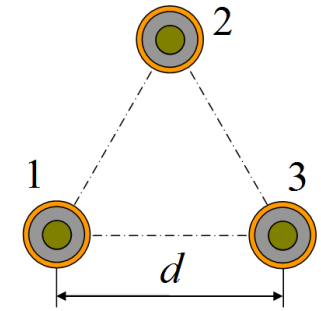
$$L=\frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\frac{2l}{r}-1\right) \tag{2}$$

Отримані взаємоіндуктивності:

$$M_{жэ}=\frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\frac{2l}{r}-1\right),\quad M_{ik}=\overline{M}_{ik}=\frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\frac{2l}{d_{ik}}-1\right) \tag{3}$$

1. Расчет индуктивностей : справ. кн. / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. - 3-е изд., перераб. и доп. - Л. : Энергоатомиздат, 1986. - 487 с.

Комплексні амплітуди струмів в екранах при різних схемах прокладання кабелів КЛ



Прокладання кабелів «у трикутник»

$$M_{12} = M_{23} = M_{31} = M = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\frac{2l}{d} - 1\right) \qquad (1)$$

$$\dot{I}_{эk}^{тр} = -\dot{I}_{жk} \cdot \frac{j\omega(M_{жэ} - M)}{R + j\omega(L - M)} = -\dot{I}_{жk} \cdot \frac{j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*} = \dot{I}_{жk} \cdot \alpha, \quad \alpha = \frac{-j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*}, \quad k = 1, 2, 3 \qquad (2)$$

де $M^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\frac{d}{r}$ – еквівалентна індуктивність екрана кабелю, Гн/м;

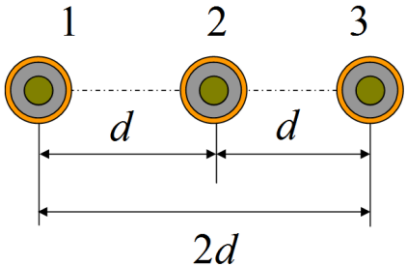
R^* – опір одиниці довжини екрана кабелю, Ом/м.

Прокладання кабелів «у площині»

$$M_{12} = M_{23} \neq M_{31} \qquad M_{12} = M_{23} = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\frac{2l}{d} - 1\right) \qquad M_{31} = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\frac{l}{d} - 1\right) \qquad (3)$$

$$\dot{I}_{э1}^{пл} = -\dot{I}_{ж1} \cdot \frac{Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln\frac{\Delta^3}{2} + \sqrt{3}\ln 2 - j\ln 4\Delta^3}{Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln\frac{\Delta^3}{2} - \frac{3}{Q} - 2j\ln 2\Delta^3}, \quad \dot{I}_{э2}^{пл} = -\dot{I}_{ж2} \cdot \frac{jQ\ln\frac{\Delta^3}{2}}{3 + jQ\ln\frac{\Delta^3}{2}},$$

$$\dot{I}_{э3}^{пл} = -\dot{I}_{ж3} \cdot \frac{Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln\frac{\Delta^3}{2} - \sqrt{3}\ln 2 - j\ln 4\Delta^3}{Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln\frac{\Delta^3}{2} - \frac{3}{Q} - 2j\ln 2\Delta^3}, \quad Q = \frac{\mu_0\omega}{2\pi R^*}, \quad \Delta = \frac{d}{r}; \qquad (4)$$



Визначення МП КЛ через коефіцієнт екранування *SF* при прокладанні кабелів «у трикутник»

Коефіцієнт екранування МП КЛ: $$SF = \frac{B_{ж}}{B_{кл}}, \qquad (1)$$

де $B_{ж}$ – магнітна індукція КЛ; $B_{кл}$ – магнітна індукція КЛ при двосторонньому замиканні екранів.

$$\dot{\vec{B}}_{ж} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^{3} \dot{I}_{ж\,k} \left(-\frac{y - y_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \cdot \vec{e}_x + \frac{x - x_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \cdot \vec{e}_y \right) \qquad (2)$$

$$\dot{\vec{B}}_{кл} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^{3} \left(\dot{I}_{ж\,k} + \dot{I}_{э\,k} \right) \left(-\frac{y - y_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \cdot \vec{e}_x + \frac{x - x_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \cdot \vec{e}_y \right) \qquad (3)$$

При прокладанні кабелів «у трикутник» $\alpha = \dfrac{-j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*} = \text{const}$ для $\forall k$, тому

$$\dot{\vec{B}}_{кл}^{тр} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot (1 + \alpha) \cdot \sum_{k=1}^{3} \dot{I}_{ж\,k} \left(-\frac{y - y_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \cdot \vec{e}_x + \frac{x - x_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \cdot \vec{e}_y \right) \qquad (4)$$

Коефіцієнт екранування МП КЛ $$SF_{тр} = \frac{1}{|1 + \alpha|} = \left| 1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{d}{r} \right| \qquad (5)$$

Діюче значення МП КЛ при двосторонньому замиканні екранів:

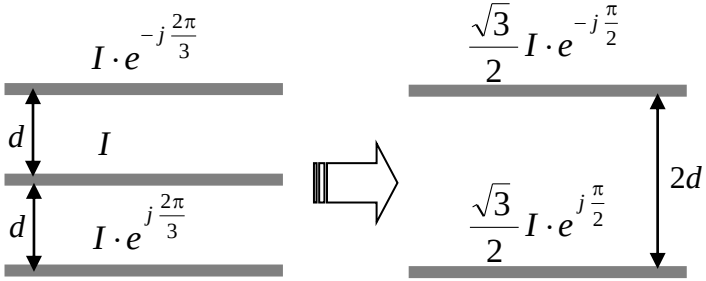
$$B_{кл}^{тр} = B_{ж} \Big/ \left| 1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{d}{r} \right| \qquad (6)$$

Застосування перетворення Кларк для спрощення розрахункових співвідношень МП КЛ при прокладанні «у площині»

Перетворення Кларк для струмів жил трифазної КЛ дозволяє здійснювати еквівалентну по МП КЛ заміну трифазного кола на однофазне, яке характеризується тільки β-компонентами струмів:

$$\dot{I}_{ж1} = -\frac{\dot{I}_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}\,\dot{I}_\beta}{2} \;,\; \dot{I}_{ж2} = \dot{I}_\alpha \;,\; \dot{I}_{ж3} = -\frac{\dot{I}_\alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}\,\dot{I}_\beta}{2}$$

де $\dot{I}_\alpha = I$, $\dot{I}_\beta = -jI$, I – амплітуда струму в жилах.



Перехід від трифазної КЛ до однофазної з еквівалентним МП

Загальне рівняння для визначення струму в екранному контурі з урахуванням перетворення Кларк для струмів жил КЛ :

$$\dot{I}_э^{пл} \cdot \left(2R^* + j\omega L\right) = -j\omega \cdot \left(\dot{\Phi}_{ж1} + \dot{\Phi}_{ж3}\right) \qquad (1)$$

Вираз для струму в екранному контурі:

$$\dot{I}_э^{пл} = j\frac{\sqrt{3}\,I}{2} \cdot j\omega\frac{\mu_0}{\pi}\ln\frac{2d}{r} \Bigg/ \left(2R^* + j\omega\frac{\mu_0}{\pi}\ln\frac{2d}{r}\right) \qquad (2)$$

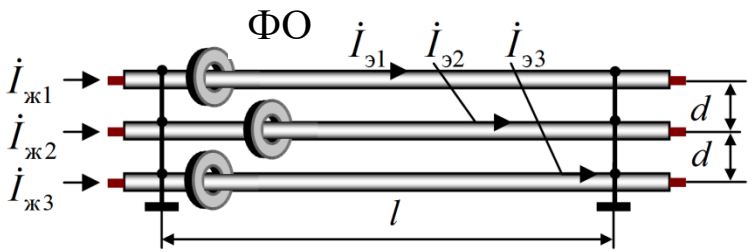
Коефіцієнт екранування КЛ для прокладки кабелів «у площині»:

$$SF_{пл}^{(\beta)} = \left|1 + j \cdot \frac{\mu_0\omega}{2\pi R^*} \cdot \ln\frac{2d}{r}\right| \qquad (3)$$

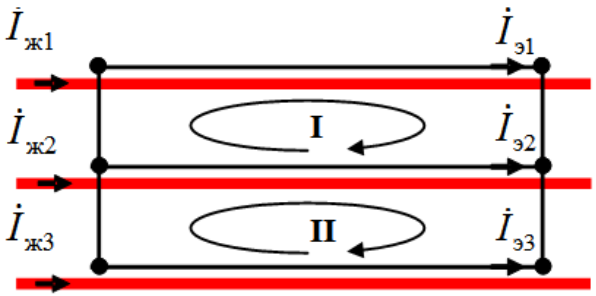
Математична модель МП КЛ з двосторонньо замкнутими екранами кабелів, охопленими феромагнітними осердями (ФО), при прокладанні «у трикутник»

Додаткові припущення:

- циліндричні ФО не намагнічуються до насичення, а їх магнітна проникність постійна і дорівнює μ;
- ФО намагнічується струмами жили і екрана тільки того кабелю, який він охоплює;
- МП всередині ФО вісесиметричне.



Рівняння для визначення струмів в екранах при наявності ФО:



$$\begin{cases} \left(\dot{I}_{э1}-\dot{I}_{э2}\right)\cdot R^{*} = -j\,\omega\cdot\left(\dot{\Psi}_{1}^{(1,2)}-\dot{\Psi}_{2}^{(1,2)}\right), & \text{(I)} \\ \left(\dot{I}_{э2}-\dot{I}_{э3}\right)\cdot R^{*} = -j\,\omega\cdot\left(\dot{\Psi}_{2}^{(2,3)}-\dot{\Psi}_{3}^{(2,3)}\right), & \text{(II)} \\ \dot{I}_{э1}+\dot{I}_{э2}+\dot{I}_{э3}=0. \end{cases}$$

$\dot{\Psi}_{k}^{(m,n)} \equiv \dot{\Psi}_{k}^{(n,m)}$ – повний потік МП кабелю k через контур, утворений екранами кабелів m і n

При прокладанні кабелів «у трикутник» $\dot{\Psi}_{k}^{(m,n)}=0$ для $k \neq m$ та $k \neq n$.

Всередині ФО $\dot{B}=\mu\mu_0\left(\dot{I}_{э\,k}+\dot{I}_{ж\,k}\right)/2\pi r$

Поза ФО $\dot{B}=\mu_0\left(\dot{I}_{э\,k}+\dot{I}_{ж\,k}\right)/2\pi r$

$$\Rightarrow \dot{\Psi}_{k}^{(k,n)}=\frac{\mu_0\left(\dot{I}_{э\,k}+\dot{I}_{ж\,k}\right)}{2\pi}\cdot\ln\frac{d}{r}+\frac{l_{ФС}}{l}\cdot\frac{(\mu-1)\mu_0\left(\dot{I}_{э\,k}+\dot{I}_{ж\,k}\right)}{2\pi}\cdot\ln\frac{r_1}{r_2},$$

l – довжина екранованої ділянки КЛ; $l_{ФС}$ – сумарна довжина ФО на кожному кабелі;
μ – магнітна проникність ФО; r_1 і r_2 – зовнішній і внутрішній радіус ФО.

Визначення МП КЛ при двосторонньому замиканні екранів з ФО через коефіцієнт екранування *SF*

Струми в екранах кабелів при прокладанні «у трикутник»:

$$\dot{I}_{\text{э}k}^{\text{тр}} = -\dot{I}_{\text{ж}k} \cdot \frac{j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*}, \quad M^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\frac{d}{r} + \frac{l_{\text{ФС}}}{l} \cdot \frac{(\mu - 1)\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\frac{r_1}{r_2} \tag{1}$$

Діюче значення МП КЛ, створюваного струмами жил в точці *P*:

$$B_{\text{ж}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left|\dot{B}_x\right|^2 + \left|\dot{B}_y\right|^2} \tag{2}$$

Компоненти магнітної індукції:

$$\dot{B}_x = \sum_{k=1}^{3} \frac{\mu_0}{2\pi} \dot{I}_{\text{ж}k} \cdot \frac{-(y_p - y_k)}{(x_p - x_k)^2 + (y_p - y_k)^2}, \qquad \dot{B}_y = \sum_{k=1}^{3} \frac{\mu_0}{2\pi} \dot{I}_{\text{ж}k} \cdot \frac{x_p - x_k}{(x_p - x_k)^2 + (y_p - y_k)^2}$$

МП КЛ при двосторонньому замиканні в точці *P*: $B_{\text{кл}} = \dfrac{B_{\text{ж}}}{SF}$ (3)

При прокладанні кабелів «у трикутник»:

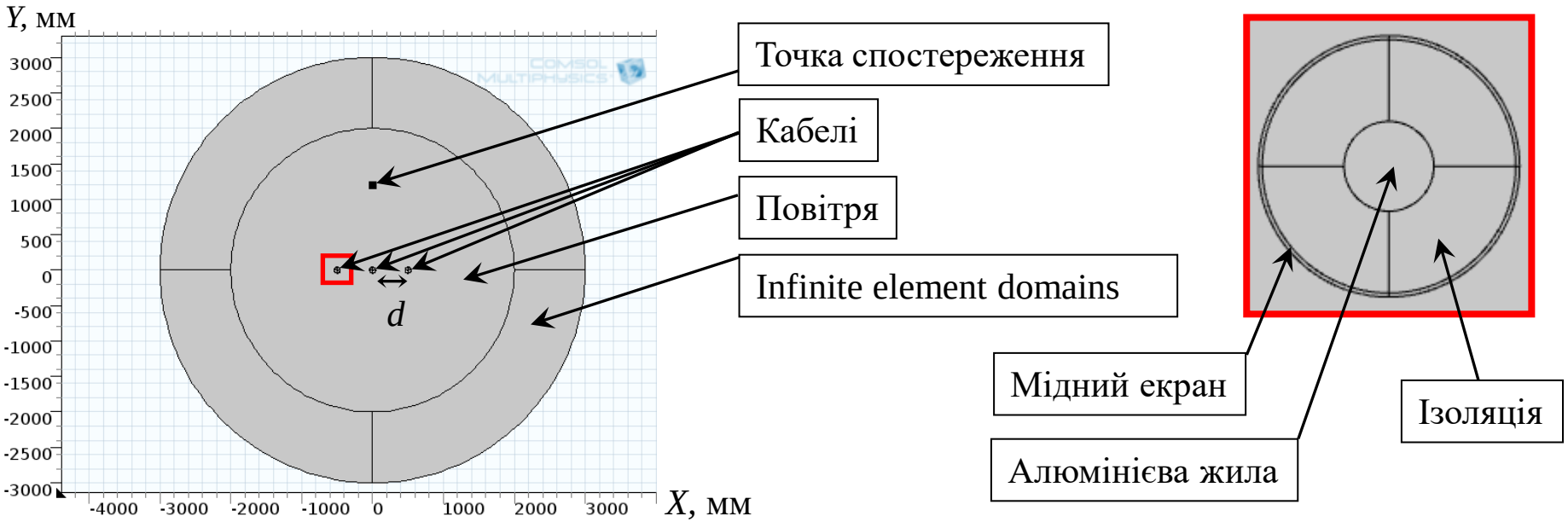
$$SF_{\text{тр}} = \left| 1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln\frac{d}{r} + j \cdot \frac{l_{\text{ФС}}}{l} \cdot \frac{(\mu - 1)\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln\frac{r_1}{r_2} \right| \tag{4}$$

При прокладанні кабелів «у площині»:

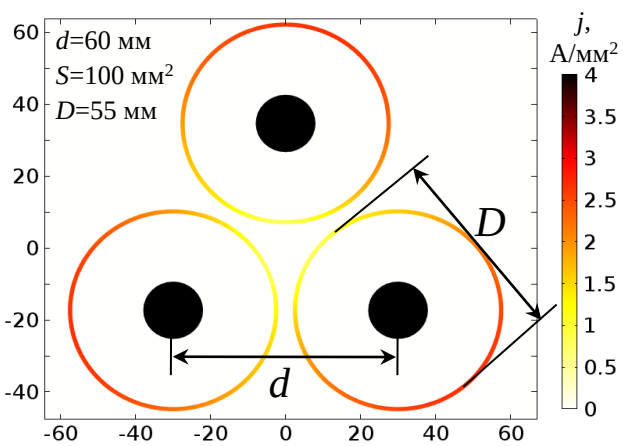
$$SF_{\text{пл}}^{(\beta)} = \left| 1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln\frac{2d}{r} + j \cdot \frac{l_{\text{ФС}}}{l} \cdot \frac{(\mu - 1)\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln\frac{r_1}{r_2} \right| \tag{5}$$

Чисельне моделювання МП трифазної КЛ для оцінки впливу нерівномірності густини струму в її екранах

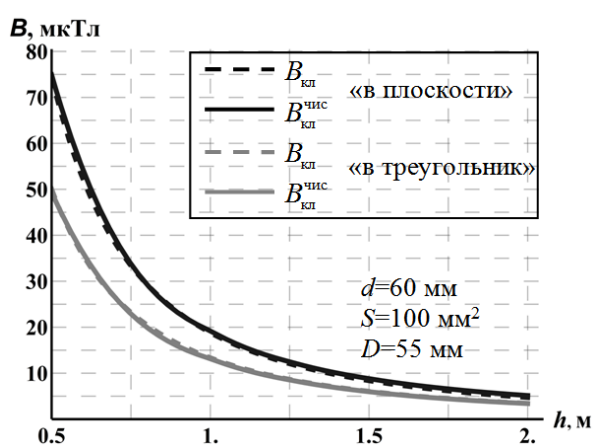
Двовимірна модель в *COMSOL Multiphysics* (*AC/DC*):



Нерівномірність густини струму в перерізі екранів кабелів



Результати аналітичного та чисельного розрахунків МП КЛ:



Похибка розрахунку МП КЛ аналітичним методом не перевищує 8% при прокладанні кабелів «у трикутник» і 5% – «у площині».

h – висота точки спостереження над КЛ

Перевірка розробленої математичної моделі МП КЛ на основі результатів фізичного експерименту і чисельного моделювання

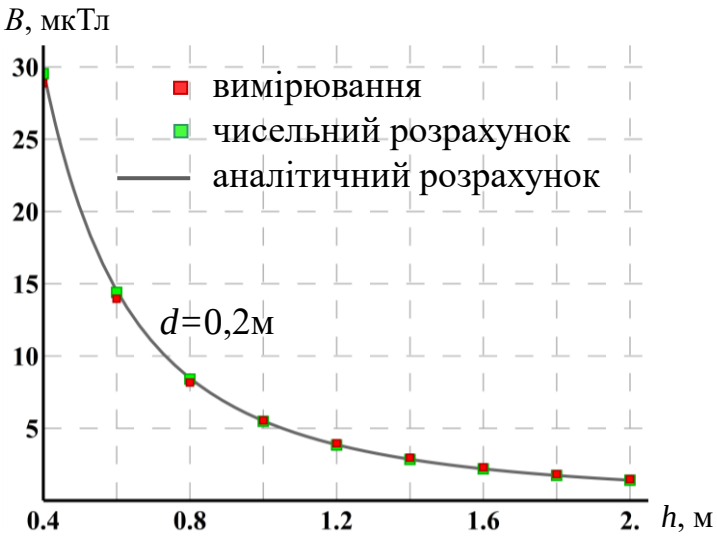
Параметри фізичних макетів

- тип кабелів КЛ: АПвЕгаПу-110 1×240/70;
- довжина кабелів 10 м;
- міжфазна відстань 0,1÷0,5м;
- струм в жилах 95А;
- питомий опір екранів 0,29 Ом/км.

При вимірюваннях використано 3D магнітометр EMF-828, інструментальна похибка<5%

Фізичний макет КЛ

Співставлення результатів розрахунку та вимірювань індукції МП КЛ



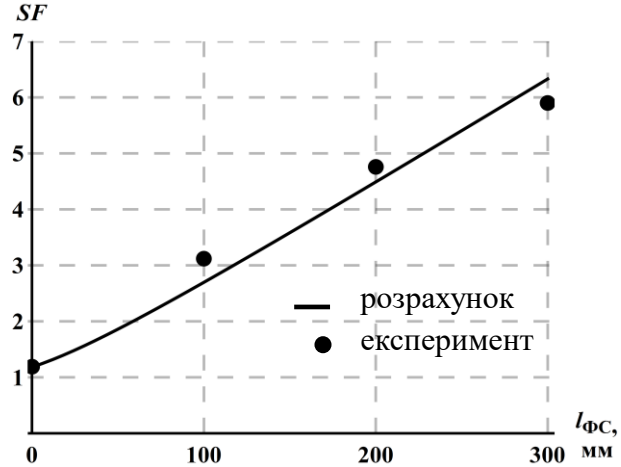
Фізичний макет КЛ з феромагнітними осердями (ФО)

Параметри циліндричних ФО

- довжина осердь 0,1м, 0,2м, 0,3м;
- внутрішній діаметр 0,072 м;
- зовнішній діаметр 0,13 м;
- магнітна проникність μ=3000.

Розкид результатів розрахунку та експерименту не перевищує 15%.

Залежність ефективності екранування від довжини ФО



Отримані значення коригуючого коефіцієнта *m*=1/*SF* в залежності від перерізу екрана *S* для різних значень *D* і *d* кабелів з двостороннім заземленням їх екранів

Відстань між осями кабелів *s*, м	Переріз екрану *S*, мм²	Розташування кабелів КЛ в горизонтальній площині			Розташування кабелів КЛ у кутах рівностороннього трикутника		
		Внутрішній діаметр екрану кабелю, мм					
		25	50	70	25	50	70
0,1	25	0,99	0,99	1	0,99	1	1
	50	0,95	0,97	0,97	0,96	0,98	0,99
	70	0,90	0,95	0,96	0,93	0,97	0,98
	100	0,82	0,89	0,91	0,88	0,93	0,95
	150	0,70	0,78	0,82	0,78	0,86	0,90
	200	0,59	0,68	0,74	0,69	0,79	0,84
0,2	25	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	1
	50	0,90	0,93	0,95	0,94	0,96	0,97
	70	0,84	0,88	0,90	0,89	0,93	0,95
	100	0,73	0,80	0,83	0,81	0,87	0,90
	150	0,59	0,66	0,71	0,68	0,77	0,81
	200	0,48	0,56	0,60	0,57	0,67	0,73
0,5	25	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99
	50	0,85	0,89	0,90	0,90	0,93	0,94
	70	0,77	0,81	0,84	0,83	0,87	0,90
	100	0,65	0,70	0,74	0,72	0,78	0,82
	150	0,50	0,56	0,59	0,57	0,64	0,68
	200	0,40	0,45	0,48	0,46	0,53	0,58

[1]У разі перерізу екрана або відстані між кабелями, які є проміжними до наведених у таблиці Е.6, значення коефіцієнта *m* обчислюють інтерполяцією.

Таблицю впроваджено в таких чинних нормативних документах:

1. СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49:2011.2. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ: Настанова (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 139 с.
2. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2016. – С. 37.

Нові розрахункові співвідношення для визначення діючих значень струмів в екранах кабелів КЛ при прокладанні «у площині»

Нові розрахункові співвідношення, отримані на основі розробленої математичної моделі

$$I_{э1}^{пл} = I_ж \cdot \sqrt{\frac{\left(Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} + \sqrt{3} \cdot \ln 2\right)^2 + \ln^2 4\Delta^3}{\left(Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} - \frac{3}{Q}\right)^2 + 4 \cdot \ln^2 2\Delta^3}},$$

$$I_{э2}^{пл} = I_ж \cdot \sqrt{\frac{Q^2 \cdot \ln^2 \frac{\Delta^3}{2}}{9 + Q^2 \cdot \ln^2 \frac{\Delta^3}{2}}},$$

$$I_{э3}^{пл} = I_ж \cdot \sqrt{\frac{\left(Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} - \sqrt{3} \cdot \ln 2\right)^2 + \ln^2 4\Delta^3}{\left(Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} - \frac{3}{Q}\right)^2 + 4 \cdot \ln^2 2\Delta^3}},$$

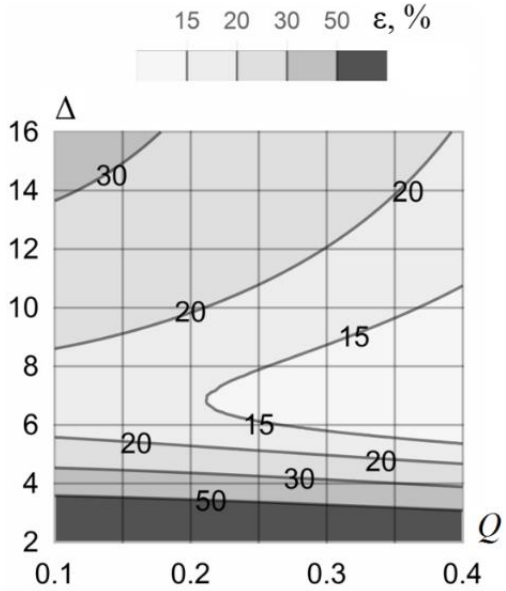
де $Q = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*}$, $\Delta = \frac{d}{r}$.

Похибка нових розрахункових співвідношень не перевищує 5%

Відоме[1] розрахункове співвідношення

$$I = I_ж \cdot \sqrt{0{,}75 \cdot \frac{0{,}017}{R_{70}^2 + 0{,}017} + 0{,}25 \cdot \frac{0{,}01}{R_{70}^2 + 0{,}01}},$$

де R_{70} – опір екрана при 70° С, Ом/км



Похибка ε,% відомого розрахункового співвідношення може перевищувати 30%

1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше, на основі аналітичних розв’язків, розроблено математичну модель магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні власних екранів кабелів, що дозволяє здійснювати моделювання магнітного поля при будь-яких схемах прокладання кабелів.

2. За допомогою розробленої математичної моделі отримані співвідношення, які дозволяють визначати магнітне поле та струми в екранах кабелів при їх двосторонньому заземленні у разі прокладання кабелів «у площині».

3. Запропоновано нове наближене компактне співвідношення для інженерного розрахунку коефіцієнта екранування магнітного поля реальних кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів у разі прокладання кабелів «у площині», яке отримано на основі розробленої математичної моделі та застосування перетворення Кларк і дозволяє виконувати розрахунок з похибкою в межах 5%.

4. Розвинено математичну модель магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні власних екранів кабелів для випадку охоплення кабелів феромагнітними осердями та вперше отримано співвідношення, що дозволяють виконувати інженерний розрахунок коефіцієнтів екранування магнітного поля кабельних ліній з феромагнітними осердями.

Практичне значення отриманих результатів

На основі розроблених методів розрахунку магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів кабелів запропоновано та експериментально верифіковано відповідну методику, яка дозволяє на етапі проектування кабельних ліній здійснювати розрахунок магнітного поля для будь-якої схеми прокладання кабелів кабельних ліній і забезпечує перевірку відповідності рівня магнітного поля екологічним нормам.

Основні результати виконаних в роботі досліджень і практичних розробок використано:

• в ДУ «ІТПМ НАН України» при виконанні фундаментальних і прикладних досліджень в рамках тематичного плану, а також при розробці змін до нормативних документів Міненерговугілля СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 та СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49:2011.2;

• у введених в дію нормативних документах Міненерговугілля: «СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2016. – 37 с» та «СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49:2011.2. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ: Настанова (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 139 с», в розділах присвячених проектуванню та розрахунку магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів кабелів.

• в новій методиці розрахунку діючих значень струмів в екранах кабелів при їх прокладанні «у площині», що передана для впровадження в Національну енергетичну компанію «Укренерго» і дозволяє зменшити похибку розрахунку до 5%, яка наразі перевищує 30%.

Акти впровадження результатів роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Державної установи «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», академік НАМН України, доктор медичних наук, професор

_____ А.М. Сердюк

«25» 02 2020 р.

АКТ

про використання результатів циклу наукових праць «Методи та засоби ефективного екранування магнітного поля високовольтних кабельних ліній електропередачі» к.т.н. Грінченка Володимира Сергійовича та к.т.н. Ткаченка Олександра Олеговича, що представлена на здобуття Премії Верховної Ради України молодим ученим 2020 р.

Ми, що нижче підписалися, представники Державної установи «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України» (далі – ДУ «ІГЗ ім. О.М. Марзєєва НАМНУ»), завідуючий лабораторією фізичних факторів довкілля, д.мед.н., с.н.с. Думанський В.Ю. та старший науковий співробітник лабораторії фізичних факторів довкілля Біткін С.В. склали цей акт про те, що результати циклу наукових праць «Методи та засоби ефективного екранування магнітного поля високовольтних кабельних ліній електропередачі» авторів к.т.н. Грінченка В.С. та к.т.н. Ткаченка О.О. впроваджено при виборі технічно досяжних гранично допустимих рівнів магнітного поля промислової частоти.

Методи та засоби екранування, запропоновані в наукових працях к.т.н. Грінченка В.С. та к.т.н. Ткаченка О.О., дозволяють ефективно зменшувати магнітне поле ліній електропередачі, тим самим забезпечуючи захист здоров'я людей від негативного впливу магнітного поля промислової частоти.

Зав. лаб. гігієни фізичних факторів довкілля
ДУ «ІГЗ ім. О.М. Марзєєва НАМНУ»,
д.мед.н., с.н.с. _____ В.Ю. Думанський

С.н.с. лаб. гігієни фізичних факторів довкілля
ДУ «ІГЗ ім. О.М. Марзєєва НАМНУ» _____ С.В. Біткін

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України», чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф.

_____ В.Ю. Розов

«17» липня 2020 р.

АКТ

про використання результатів циклу наукових праць «Теоретичні засади та методи розрахунку магнітного поля високовольтних кабельних ліній електропередачі при двосторонньому заземленні екранів кабелів» Грінченка Володимира Сергійовича та Ткаченка Олександра Олеговича, що представлена на здобуття премії Президента України для молодих вчених 2020 р.

Ми, що нижче підписалися, представники Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України» (далі – ДУ «ІТПМ НАН України»), вчений секретар, к.т.н. Добродєєв Павло Миколайович та завідуючий лабораторією магнітних вимірювань відділу №30 ДУ «ІТПМ НАН України», к.т.н. Пєлєвін Дмитро Євгенович склали цей акт про те, що результати циклу наукових праць к.т.н. Грінченка В.С. та к.т.н. Ткаченка О.О. «Теоретичні засади та методи розрахунку магнітного поля високовольтних кабельних ліній електропередачі при двосторонньому заземленні екранів кабелів» впроваджено у ДУ «ІТПМ НАН України» при розробці розділів нормативних документів Міненерговугілля: «*СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2016. – 37 с.*» та «*СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49:2011.2. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ: Настанова (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 139 с.*», присвячених проектуванню та розрахунку магнітного поля кабельних ліній.

Результати досліджень, що виконані к.т.н. Грінченком В.С. та к.т.н. Ткаченком О.О., мають істотне значення для вирішення актуальної задачі розрахунку магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому заземленні власних екранів та підвищення точності розрахунку наведених струмів в екранах кабелів.

Вчений секретар
ДУ «ІТПМ НАНУ», к.т.н. _____ П.М. Добродєєв

Зав. лабораторією магнітних
вимірювань відділу №30
ДУ «ІТПМ НАНУ», к.т.н. _____ Д.Є. Пєлєвін

Накази Міненерговугілля, щодо впровадження результатів роботи

МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА
ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

НАКАЗ

«01» 07 2016 м. Київ № 423

Про внесення змін до нормативного документа «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика»

З метою визначення оцінки впливу ліній електропередавання на довкілля під час проектування, будівництва та експлуатації

НАКАЗУЮ:

1. Внести зміни до нормативного документа «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика» (далі – Методика), затвердженого наказом Міненерговугілля від 22.10.2008 № 512, виклавши його у редакції, що додається.
2. Об'єднанню енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики» (Котельников О. О.) внести цей наказ до реєстру нормативних документів Міненерговугілля України.
3. Державному підприємству «Національна енергетична компанія «Укренерго» (Ковальчук В. В.) забезпечити видання та розповсюдження необхідної кількості примірників Методики державним підприємствам, що належать до сфери управління Міненерговугілля, та господарським товариствам, щодо яких Міненерговугілля здійснює управління корпоративними правами держави, відповідно до замовлень.
4. Наказ набирає чинності через 90 днів.
5. Контроль за виконанням цього наказу покласти на заступника Міністра Светеліка О.Д.

Міністр І. Насалик

ВІДДІЛ ДІЛОВОДСТВА № 3

МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА
ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

НАКАЗ

«26» 01 2017 м. Київ № 82

Про внесення змін до Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ. Настанова

Керуючись нормами Закону України «Про стандартизацію», з метою підвищення пропускної спроможності, надійності та екологічних властивостей кабельних ліній

НАКАЗУЮ:

1. Внести зміни до Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ. Настанова, затверджених наказом Міненерговугілля від 06.06.2011 № 198 (СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011), виклавши в новій редакції, що додається.
2. Об'єднанню енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку електроенергетики» (Бурдяк Л.) внести цей наказ до реєстру нормативних документів Міненерговугілля України в установленому порядку.
3. Державному підприємству «Національна енергетична компанія «Укренерго» (Ковальчуку В.) забезпечити видання належної кількості примірників відповідно до замовлень.
4. Цей наказ набирає чинності через 30 днів.
5. Контроль за виконанням цього наказу покласти на заступника Міністра А. Корзуна.

Міністр І. Насалик

ВІДДІЛ ДІЛОВОДСТВА № 3

037036

Данні про цитування

Результати досліджень опубліковані у 19 наукових працях, з яких 13 статей включено до наукометричних баз Scopus та Web of Science.

Загальна кількість посилань на публікації (та h-індекс) у Google Scholar – 92 (5), у Scopus – 18 (3), у Web of Science – 16 (2).

За виключенням самоцитування загальна кількість посилань на публікації (та h-індекс) у Google Scholar – 43(4), у Scopus – 9 (2), у Web of Science – 5 (1).

Основні висновки за роботою

У роботі отримано нові науково обґрунтовані результати, які вирішують наукову задачу математичного моделювання та розрахунку магнітного поля високовольтних трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні їх екранів за допомогою аналітичних розв’язків. Ці результати у своїй сукупності складають істотній внесок в рішення науково-практичної задачі теоретичної електротехніки з моделювання електромагнітних процесів в кабельних лініях електропередачі та розробки на їх основі верифікованої методики розрахунку магнітного поля, необхідної для санітарно-гігієнічної оцінки рівня магнітного поля при проектуванні нових та модернізації діючих кабельних ліній.

Основні результати виконаних досліджень і практичних розробок використано у введених в дію нормативних документах Міненерговугілля: «СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2016. – 37 с» та «СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49:2011.2. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ: Настанова (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 139 с», в розділах присвячених проектуванню та розрахунку магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів кабелів.