

УДК 537.87(047)

Конахович Г.Ф., д-р техн. наук
Андрухович П.О.
Карпов А.В.

МЕТОДИКА МОДЕРНІЗАЦІЇ МОДЕЛІ ХАТА

Інститут інформаційно-діагностичних систем
Національного авіаційного університету

Представлено дослідження закону згасання електромагнітного поля в реальних умовах експлуатації в залежності від частоти випромінювання. Представлено методи апроксимації, які використовувалися для обробки отриманих результатів. Представлено методику модернізації моделі Хата та моделі COST 231 на основі дослідження закону згасання електромагнітного поля в реальних умовах експлуатації в залежності від частоти випромінювання

Постановка проблеми

На сьогоднішній день немає моделі яка б могла чітко описати поширення електромагнітного поля в будь-яких умовах. На даний момент існують різні моделі, що так чи інакше самі є апроксимацією реального каналу. Для побудови комплексних систем захисту інформації необхідно знати як поширюється електромагнітне поле від того чи іншого джерела. Нами було досліджено, що затухання поля сильно залежить від частоти, тому запропоновано внести зміни до формули Хата. В цій моделі значення втрат між суміжними поверхнями завжди не змінне для всіх значень частоти і дорівнює 18,3 дБ, що не є дійсним.

Аналіз досліджень та публікації

Стаття цікава практичними результатами вимірів поширення електромагнітного поля в реальних умовах типового приміщення, так як на даний момент не існує чітких залежностей, які б описували розповсюдження поля. Також було створено інтерполяційну квазімодель розрахунку коефіцієнту згасання електромагнітного поля в залежності від частоти випромінювання. Дана модель є цікавою тим, що дає змогу визначити значення коефіцієнту затухання електромагнітного поля на будь-якій частоті з визначеного діапазону. Також була запропонована методика модернізації моделі Хата. Приведені результати можуть бути використані

широким колом фахівців, що працюють в області захисту інформації.

Постановка завдання

Метою статті є представлення графічної залежності поширення електромагнітного поля, на основі якої проведено, за допомогою апроксимації, розрахунок залежності коефіцієнта затухання від частоти побічних електромагнітних випромінювань. Також – представлення методики модернізації моделі Хата та COST 231 на основі практичних даних. В результаті досліджень нами отримана залежність затухання електромагнітного поля, між суміжними поверхнями, від частоти.

Виклад основного матеріалу дослідження

У числі можливих каналів витоку інформації, що підлягають захисту, окреме місце займає канал витоку за рахунок побічних електромагнітних випромінювань. Це визначається тим фактом, що практично кожен електротехнічний пристрій в процесі роботи випромінює в простір електромагнітні хвилі, так або інакше пов'язані з його функціонуванням. Джерелами випромінювання сигналу можуть бути різні елементи виробу, що здійснюють обробку інформації.

З метою дослідження закону згасання електромагнітного поля в реальних умовах був проведений практичний експеримент.

Як джерело випромінювання досліджувався комп'ютер типу IBM PC/AT (зо-

крема монітор). Він розташований на другому поверсі будівлі, план якої приведе-

ний на рис. 1.

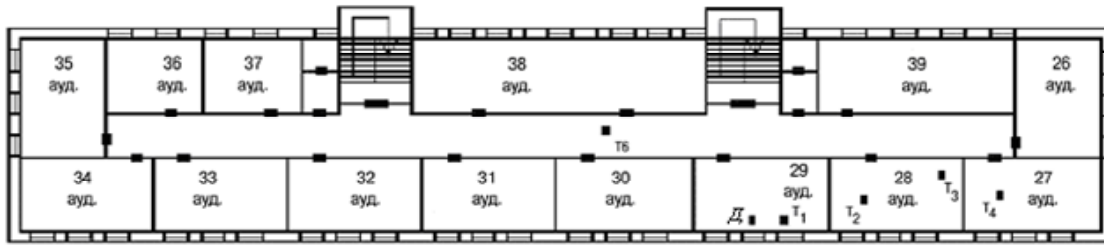


Рис. 1. План будівлі

Корпус триповерховий, блочно-панельний, висота кожного поверху з урахуванням міжповерхових перекриттів – 4 м. У приміщеннях будівлі розташовані робочі письмові столи, а також контрольно-вимірвальна апаратура. Комп'ютер розміщувався на робочому столі на відстані 1 м від вікна. На рисунку місце розташування досліджуваного джерела випромінювання позначено літерою “Д”.

Проводилися виміри напруженості електромагнітного поля на різних відстанях від джерела випромінювання. На рисунку символами T_i позначені точки проведення вимірів.

Напруженість електромагнітного поля, що створюється досліджуваним джерелом фіксувалася за допомогою набору каліброваних антен, підключених до входу вимірвального приймача. Як вимірвальний приймач використовувався селективний мікровольтметр типу *SMV-8*. Виміри сигналів проводилися на наступних частотах:

- 30 МГц (частота К1);
- 50 МГц (частота К2);
- 100 МГц (частота К3);
- 130 МГц (частота К4);
- 150 МГц (частота К5);
- 185 МГц (частота К6);
- 230 МГц (частота К7);
- 300 МГц (частота К8).

Коефіцієнт затухання поля було розраховано за формулою:

$$K = \lg(E_d/E_0),$$

де K – коефіцієнт затухання електромагнітного поля, що створюється досліджуваним джерелом випромінювання;

E_0 – напруженість електромагнітного поля, виміряна на відстані 0,5 м від джерела;

E_d – напруженість електромагнітного поля, виміряна на відстані d від джерела випромінювання.

Результати експериментальних досліджень наведені на рис. 2

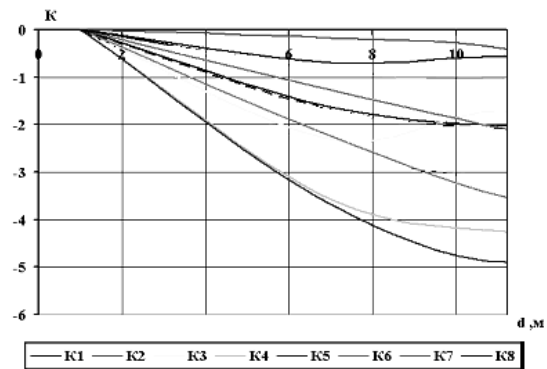


Рис. 2. Коефіцієнт затухання поля

На основі цих вимірів проводимо дослідження залежності коефіцієнта затухання електромагнітного поля від частоти. Розрахунки проведемо за вимірами, зробленими у точці T_2 (8 метрів від джерела). Отримані дані представимо у вигляді табл. 1.

Обробку результатів проводимо за допомогою апроксимації. В даній статті було використано два методи апроксимації: сплайн-апроксимація та апроксимація поліномами вищих степенів.

Таблиця 1.

| Частота випромінювання джерела, МГц | Значення втрат сигналу у точці T ₂ , дБ |
|-------------------------------------|--|
| 30 | 6,1 |
| 50 | 4 |
| 100 | 5,3 |
| 130 | 1 |
| 150 | 3,2 |
| 185 | 4,9 |
| 230 | 4,1 |
| 300 | 2,5 |

Суть апроксимації поліномами вищих степенів полягає в тому, що здійснюється спеціальний підбір лінійної комбінації степенів виразів і конструювання з них степеню полінома, який найкраще наближає (апроксимує) таблично задану функцію. У математиці похибку апроксимації часто оцінюють по методу найменших квадратів. Тому часто поліноміальну апроксимацію називають апроксимацією по методу найменших квадратів. Згідно методу найменших квадратів потрібно побудувати такий апроксимуючий поліном, щоб алгебраїчна сума квадратів відхилень (похибок) між табличними значеннями функції і її значеннями, обчисленими за допомогою полінома, що наближає, була мінімальною.

Точність поліноміальної апроксимації катастрофічно падає при збільшенні степені апроксимуючих поліномів. Від цього недоліку можна позбавитися використовуючи для апроксимації відрізки поліномів невисокої степені, які використовуються для представлення частини вузлових точок. Найвідомішим методом такої апроксимації є сплайн-апроксимація.

Наочно сплайн-функцію можна представити у вигляді гнучкої сталевий лінійки, що закріплена у вузлових точках і плавно згинається. Завдяки вказаним властивостям сплайнів вони непогано описують функції, представлені як невеликим числом вузлових точок (завдяки плавності сплайн-кривих), так і функції, що представляються дуже великим числом вузлових точок (оскільки порядок поліномів від цього числа вже не залежить). Недоліком сплайн-апроксимації є

відсутність загального вираження для всієї кривої. Фактично доводиться використовувати набір сплайн-функцій для різних інтервалів між вузловими точками.

Сплайн-апроксимація:

$$vA_i = f_i,$$

де f_i – це масив значень частоти випромінювання

$$vB_i = k_i,$$

де k_i – це масив значень коефіцієнта затухання поля

$$b = cspline(vA, vB),$$

де b – функція апроксимації

$$spline(x) = \text{int } \text{erp}(b, vA, vB, x),$$

де $spline(x)$ – інтерполяція апроксимації

$$y(x) = 20 \lg(spline(x)),$$

де $y(x)$ – апроксимована залежність коефіцієнта затухання електромагнітного поля від частоти.

Апроксимація поліномами вищих степенів:[3]

$$C = \text{l inf } it(vA, vB, F),$$

де C – коефіцієнти поліномів вищих степенів, vA – це масив значень частоти випромінювання, vB – це масив значень коефіцієнта затухання поля, F – поліном вищих степенів.

$$L(r) = F(r)C,$$

де $L(r)$ – функція апроксимації.

Сплайн-апроксимація більш наближена до реальних значень, ніж апроксимація поліномів вищих степенів. Вона дає можливість більш чітко визначити значення коефіцієнта затухання поля за зна-

ченням частоти випромінювання поля.

Завдяки використанню інтерполяції ми можемо передбачити будь-яке значення коефіцієнта затухання поля від частоти, відстані у вимірному нами діапазоні частот (30-300 МГц). Проте ці значення є

дійсними лише для даного приміщення. Для створення більш загальної моделі необхідно провести значно більшу кількість вимірів у більшому діапазоні частот.

Зобразимо на рис. 3 результати апроксимацій.

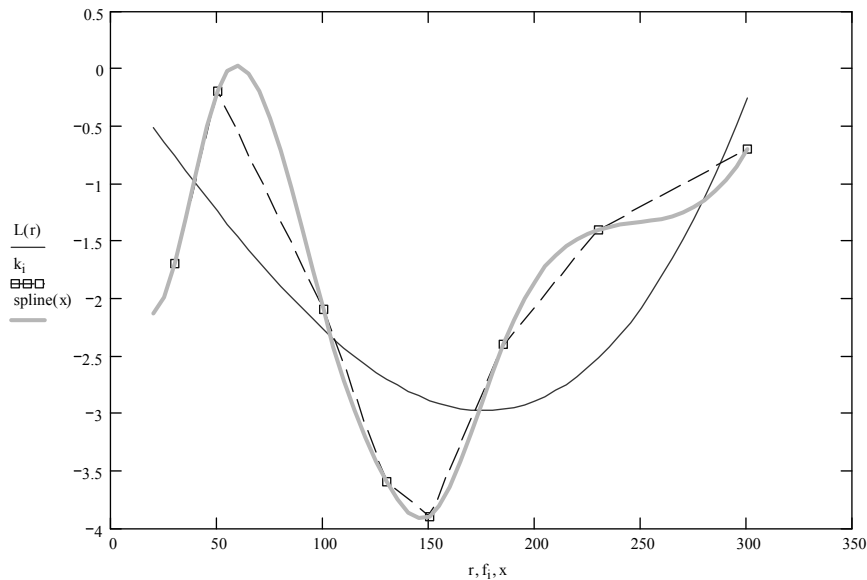


Рис. 3. Результати апроксимації вимірів

Представлена модель не може бути загальною, тому що закон затухання електромагнітного поля різний для різних джерел. Причому, це твердження вірне навіть для однакових з точки зору виробництва пристроїв. Ця відмінність, у свою чергу, зумовлена фізичними розбіжностями в параметрах елементної бази самого пристрою, можливістю вживання в однотипних пристроях елементів, що відрізняються один від одного другорядними параметрами, що не впливають на працездатність виробу, відмінністю у взаємному розташуванні з'єднаних елементів (наприклад, при установці окремих плат в роз'єм материнської плати комп'ютера, або ж при з'єднанні окремих вузлів виробу за допомогою гнучких кабелів). При цьому характер випромінювання від виробу може змінюватися в часі.

Закон затухання поля в просторі залежить від ряду зовнішніх чинників. Наявність в просторі, що оточує джерело випромінювання, сторонніх тіл обумовлює прояв таких явищ, як:

– екранування;

- перевипромінювання;
- дифракція.

В результаті проведених досліджень було встановлено, що значення затухання електромагнітного поля залежить від частоти, що наштовхнуло нас на прагнення вдосконалити модель Хата.

На даний момент існують різні моделі, що описують поширення електромагнітного поля від джерела у певних умовах. Серед них можна виділити:

- модель Окамури;
- модель Хата;
- модель Уолфіша-Ікегами;
- модель Альсбрука і Парсона;
- модель Бертолі;
- модель Лі;
- модель Кся-Бертолі та інші.

Модель Хата є емпіричним зображенням графічних даних про втрати електромагнітного поля під час поширення у вільному просторі. Ця емпірична модель спрощує розрахунок втрат поля, тому що являє собою завершену формулу, не основану на емпіричних кривих для різних

параметрів.

Дана модель використовує
Перший випадок: $d \leq 0.04$ км

наступний алгоритм розрахунку втрат електромагнітного поля від відстані:

$$L = 34.2 + 20 \log(f) + 10 \log(d^2 + (H_b - H_m)^2 / 10^6)$$

де f – частота (МГц); $H_m = \min\{h_1, h_2\}$,
де h_1, h_2 – це висота підйому приймальної та передавальної антени;
 $H_b = \max\{h_1, h_2\}$, d – відстань, що повинна становити не більше 100 км.

Якщо H_m і/або H_b нижче 1м, то ми використовуємо значення, що дорівнює 1м. Антена висотою вище ніж 200м може привести до появи значних похибок.

Другий випадок: $d \geq 0.1$ км

$$a(H_m) = (1.1 * \log(f) - 0.7) \min\{10, H_m\} - (1.56 \log(f) - 0.8) + \max\{0, 20 \log(H_m / 10)\}$$

$$b(H_b) = \min\{0, 20 \log(H_b / 30)\},$$

$$a = \begin{cases} a = 1, d \leq 20 \text{ км} \\ a = 1 + (0.14 + 0.000187f + 0.00107H_b) * (\log d / 20)^{0.8}, 20 \text{ км} < d \leq 100 \text{ км} \end{cases}$$

Підпункт 1: населена місцевість

$30 \text{ МГц} < f \leq 150 \text{ МГц}$

$$L = 69.6 + 26.2 \log(150) - 20 \log(150 / f) - 13.82 \log(\max\{30, H_b\}) +$$

$$+ a[44.9 - 6.55 \log(\max\{30, H_b\})] \log(d) - a(H_m) - b(H_b)$$

$150 \text{ МГц} < f \leq 1500 \text{ МГц}$

$$L = 69.6 + 26.2 \log(f) - 13.82 \log(\max\{30, H_b\}) +$$

$$+ a[44.9 - 6.55 \log(\max\{30, H_b\})] \log(d) - a(H_m) - b(H_b)$$

$1500 \text{ МГц} < f \leq 2000 \text{ МГц}$

$$L = 46.3 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(\max\{30, H_b\}) +$$

$$+ a[44.9 - 6.55 \log(\max\{30, H_b\})] \log(d) - a(H_m) - b(H_b)$$

$2000 \text{ МГц} < f \leq 3000 \text{ МГц}$.

$$L = 46.3 + 33.9 \log(2000) + 10 \log(f / 2000) - 13.82 \log(\max\{30, H_b\}) +$$

$$+ a[44.9 - 6.55 \log(\max\{30, H_b\})] \log(d) - a(H_m) - b(H_b).$$

Підпункт 2: слабо населена місцевість

$$L = L(\text{населеної}_\text{місцевості}) - 2 \{ \log[\min\{\max 150, f\}, 2000] / 28 \}^2 - 5.4.$$

Підпункт 3: відкритий простір

$$L = L(\text{населеної}_\text{місцевості}) - 4.78 \{ \log[\min\{\max 50, f\}, 2000] / 28 \}^2 + 18.33 * \{ \log[\min\{\max 50, f\}, 2000] \} - 40.94$$

Третій випадок: $0.04 \text{ км} < d < 0.1 \text{ км}$

$$L = L(0.04) + \frac{[\log(d) - \log(0.04)]}{[\log(0.1) - \log(0.04)]} * [L(0.1) - L(0.04)]$$

Використовуючи приведені формули модель Хата може враховувати різні сценарії розповсюдження електромагнітного поля:

– Зовнішньо-зовнішній сценарій (Приймач і передавач знаходяться поза будівлею);

– Внутрішньо-зовнішнє (приймач знаходиться у приміщенні, а передавач зовні або навпаки);

– Внутрішньо-внутрішнє (приймач і передавач знаходяться в одному або різних приміщеннях).

Для розрахунку втрат електромагнітного поля у приміщенні, модель Хата використовує наступну залежність:

$$L = L_{fc} + L_c + \sum hL_{oi} + k_f \left(\frac{k_f+2}{k_f+1} - b \right) * L_f,$$

де L_{fc} – втрати у вільному просторі;

L_c – постійні втрати; k_f – кількість подоланих поверхів; h – кількість подоланих стін на шляху розповсюдження; L_{oi} – втрати у стіні типу i ; L_f – втрати між суміжними поверхами; $h_{кімнати}$ – висота кімнати; b – емпіричний параметр.

За допомогою практичного дослідження ми визначили втрати електромагнітного поля між суміжними поверхами на різних частотах в діапазоні від 30 до 300 МГц. Отримані результати приведемо у вигляді табл. 2.

Таблиця 2.

| Частота випромінювання джерела, МГц | Значення втрат сигналу між суміжними поверхами, дБ |
|-------------------------------------|--|
| 30 | 22 |
| 50 | 3 |
| 100 | 33 |
| 130 | 50 |
| 150 | 57 |
| 185 | 32 |
| 230 | 18 |
| 300 | 7 |

Після проведення дослідження ми помітили, що затухання поля сильно залежить від частоти, тому нами було запропоновано внести зміни до формули Хата. Як видно з попередніх залежностей значення втрат між суміжними поверхами L_f завжди не змінне для всіх значень частоти і дорівнює 18,3 дБ, що не є дійсним.

На основі отриманих нами даних була створена методика модернізації моделі Хата для розрахунку цього параметру, яка залежить від частоти.

Взагалі можливо запропонувати лише методику модернізації, тому що отриманні дані не є досить достовірними для створення загальної формули. Як ми вже казали, кожне джерело має свій характер поля, а також це поле змінюється на різних частотах. Тому на результати ви-

мірів, наприклад, могла вплинути ввімкнена клавіатура. Впливаючи з цього ми не можемо стверджувати, що отримані дані достовірні, але на їх прикладі ми продемонструємо запропоновану нами методику модернізації моделі Хата.

Виведення даної формули нами зроблено на основі сплайн апроксимації та програмного пакету *MathCAD*.

Для того щоб отримати формулу нами використано поліном третього ступеня:

$$y = a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4.$$

З метою достовірного опису даної залежності в діапазоні від 30 до 300 МГц поділимо його на дві частини:

1. Від 30 до 150 МГц
2. Від 150 до 300 МГц

Для того щоб знайти коефіцієнти

a_1, a_2, a_3, a_4 нами використано дані отримані в ході досліджень, підставивши їх у поліном запишемо систему з чотирьох рівнянь:

$$\begin{aligned} f(a_1, a_2, a_3, a_4) &= 30^3 a_1 + 30^2 a_2 + \\ &\quad + 30a_3 + a_4 + 22 \\ gf(a_1, a_2, a_3, a_4) &= 50^3 a_1 + 50^2 a_2 + \\ &\quad + 50a_3 + a_4 + 3 \\ h(a_1, a_2, a_3, a_4) &= 100^3 a_1 + 100^2 a_2 + \\ &\quad + 100a_3 + a_4 + 33 \\ j(a_1, a_2, a_3, a_4) &= 130^3 a_1 + 130^2 a_2 + \\ &\quad + 130a_3 + a_4 + 50. \end{aligned}$$

В результаті розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь отримано значення коефіцієнтів:

$$v = \begin{pmatrix} 2.256 \cdot 10^{-4} \\ -0.063 \\ 4.865 \\ -117.554 \end{pmatrix}.$$

Підставивши дані коефіцієнти можна отримати залежність втрат між суміжними поверхами для першого діапазону частот:

$$L_f = 2.256 \cdot 10^{-4} f^3 - 0.063 f^2 + 4.865 f - 117.554$$

$$L_f = \begin{cases} 2.256 \cdot 10^{-4} f^3 - 0.063 f^2 + 4.865 f - 117.554, \text{ при } f \text{ від } 30 \text{ до } 150 \text{ МГц} \\ 2.467 \cdot 10^{-5} f^3 - 0.019 f^2 + 4.988 f - 461.464, \text{ при } f \text{ від } 150 \text{ до } 300 \text{ МГц} \end{cases}$$

На основі даної формульної залежності L_f від частоти побудуємо графік, що наведено на рис. 4.

Приведемо в табл. 3 порівняльні значення затухання електромагнітного поля отримані експериментальним шляхом та отримані за допомогою використання виведеної формули.

Висновки

Модифікована Модель Хата

Проведемо аналогічні розрахунки для другого діапазону:

$$\begin{aligned} q(a_1, a_2, a_3, a_4) &= 150^3 a_1 + 150^2 a_2 + \\ &\quad + 150a_3 + a_4 + 57 \\ w(a_1, a_2, a_3, a_4) &= 185^3 a_1 + 185^2 a_2 + \\ &\quad + 185a_3 + a_4 + 32 \\ l(a_1, a_2, a_3, a_4) &= 230^3 a_1 + 230^2 a_2 + \\ &\quad + 230a_3 + a_4 + 18 \\ p(a_1, a_2, a_3, a_4) &= 300^3 a_1 + 300^2 a_2 + \\ &\quad + 300a_3 + a_4 + 7. \end{aligned}$$

В результаті розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь отримали значення коефіцієнтів:

$$r = \begin{pmatrix} 2.467 \cdot 10^{-5} \\ -0.019 \\ 4.988 \\ -461.464 \end{pmatrix}$$

Підставивши дані коефіцієнти отримали залежність втрат між суміжними поверхами для другого діапазону частот:

$$L_f = 2.467 \cdot 10^{-5} f^3 - 0.019 f^2 + 4.988 f - 461.464$$

Об'єднавши обидві формули знайдемо розв'язок для всього діапазону:

$$L = L_{fc} + L_c + \sum hL_{oi} + k_f \left(\frac{k_f + 2}{k_f + 1} - b \right) * L_f,$$

дозволяє досить чітко скласти загальну картину розповсюдження електромагнітного поля, але як видно з попередніх залежностей значення втрат між суміжними поверхами L_f завжди не змінне для всіх значень частоти і дорівнює 18,3 дБ, що не є дійсним. На основі отриманих нами даних ми вирішили модернізувати модель Хата створивши формулу для розрахунку цього параметру яка залежить від частоти.

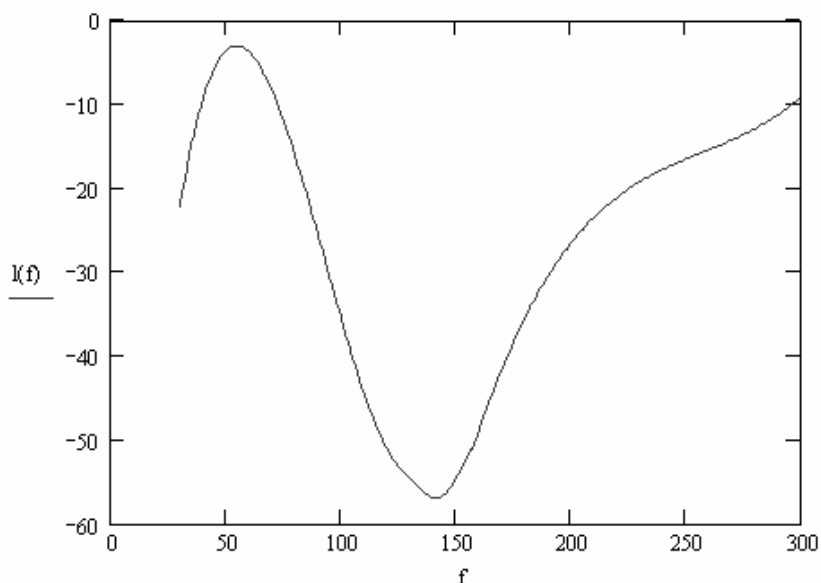


Рис. 4. Залежність втрат між суміжними поверхами від частоти розрахована за отриманою формулою

Будь-яка формула характеризується своєю повнотою та достовірністю. Наша модель може бути повною для діапазону від 30 до 300 МГц, тому що вона може з невеликим відхиленням показати значення у даному діапазоні. Але вона не є цілком

достовірною. Тому що дані отримані з умов реальної експлуатації при фіксації значення поля, на вході приймача фіксувалося поле створене в результаті суперпозиції електромагнітних полів.

Таблиця 3.

| Частота випромінювання джерела, МГц | Значення втрат сигналу між суміжними поверхами, дБ | Значення втрат сигналу між суміжними поверхами отримані за допомогою виведеної формули, дБ |
|-------------------------------------|--|--|
| 30 | 22 | 22,213 |
| 50 | 3 | 3,6 |
| 100 | 33 | 35,454 |
| 130 | 50 | 54,161 |
| 150 | 57 | 57,503 |
| 185 | 32 | 32,758 |
| 230 | 18 | 19,161 |
| 300 | 7 | 8,974 |

Список літератури

1. Косарев В.И. 12 лекцій по вычислительной математике. – М.: Изд-во МФТИ, 2000. – 224 с.
2. Рэк. МСЭ-R Стандарт М.1225.
3. Конахович Г.Ф., Климчук В.П., Паук С.М., Потапов В.Г. Захист інформації в телекомунікаційних системах – К.: НАУ, 2007. – 321 с.

Подано до редакції 01.03.10