

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ ЗАВАД У СИСТЕМАХ ШИРОКОСМУГОВОГО  
 ДОСТУПУ ВРЛ ПО МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПРОВОДКИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОМЕХ В СИСТЕМАХ  
 ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА ВРЛ ПО СЕТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДКИ

INVESTIGATION OF HARMFUL INTERFERENCE IN BPL SYSTEMS OF BROADBAND  
 ACCESS ON ELECTRIC WIRING NETWORK

**Анотація.** У даній статті запропоновано розвиток методу розрахунку інтерференційних завад у системах передачі ортогональними гармонічними сигналами. За допомогою цього методу досліджено інтерференційні завади у системах передачі за технологією ВРЛ при роботі по проводах електропроводки вітчизняного виробництва типу ППВ.

**Аннотация.** В данной статье предложено развитие метода расчета интерференционных помех в системах передачи ортогональными гармоническими сигналами. С помощью этого метода исследованы интерференционные помехи в системах передачи по технологии ВРЛ при работе по проводам электропроводки отечественного производства типа ППВ.

**Summary.** In this paper the modification of method of calculating of harmful interference in transmission systems with orthogonal harmonic signals is proposed. The harmful interference in transmission systems based on BPL technology while operating on type ППВ domestic wires of electric wiring is investigated.

Технологія ВРЛ (Broadband over Power Line) – нова телекомунікаційна технологія, призначена для забезпечення користувачам широкосмугового доступу до мережі Інтернет з використанням домової електропроводки [1]. Економічна доцільність використання технології ВРЛ обумовлена її утилізаційністю, оскільки її впровадження не потребує прокладання нових кабелів, а передбачається використання вже існуючих силових кабелів. Важливою технічною характеристикою технології ВРЛ, що обумовили її успіх, є використання методу передавання OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), який характеризується високою ефективністю при роботі по каналах зв'язку з ненормованими і швидко змінними характеристиками, до яких належать, у тому числі, канали, утворені проводами електропроводки [2]. Системи передачі (СП) із застосуванням цього методу передавання у вітчизняній літературі називають СП ортогональними гармонічними сигналами (СП ОГС).

Одним із основних факторів, що обмежують швидкість передавання в СП ОГС, а, отже, і в СП ВРЛ, є інтерференційні завади, що виникають внаслідок лінійних спотворень групового сигналу СП ОГС у каналі зв'язку [3]. Очевидно, для оцінки перспектив впровадження технології ВРЛ в Україні необхідно дослідити інтерференційні завади в СП ВРЛ, що виникають при роботі по мережах електропроводки, побудованих на вітчизняних проводах електропроводки, оскільки за своїми характеристиками вони суттєво відрізняються від закордонних аналогів. Однак на даний момент результати таких досліджень у літературі відсутні.

У [4] опубліковано метод розрахунку інтерференційних завад у СП ОГС. Цей метод дозволяє розраховувати співвідношення ефективних значень напруги інтерференційних завад і напруги сигналу на вході приймача СП ОГС. Однак за допомогою цього методу можливо проводити розрахунки тільки для випадку однакової потужності передаваного сигналу в усіх каналах (на всіх несучих) СП ОГС. У даній статті пропонується модифікація даного методу, яка дозволяє розраховувати співвідношення ефективних значень інтерференційних завад і сигналу на вході приймача СП ОГС при довільних заданих значеннях потужності передаваного сигналу на несучих СП ОГС.

Пропонований метод розрахунку інтерференційних завад для СП ОГС [4] наведено нижче. Відсоткове співвідношення ефективних значень інтерференційної завади  $\bar{\varepsilon}_l^2$  і сигналу  $\bar{s}_l^2$  в  $l$ -му каналі СП ОГС на вході приймача СП ОГС визначається за формулою:

$$h_l = \frac{\bar{\varepsilon}_l}{\bar{s}_l} \cdot 100, \% = \sqrt{\frac{\bar{\varepsilon}_l^2}{\bar{s}_l^2}} \cdot 100, \%, \quad l = 1, 2, \dots, n,$$

де  $n$  – кількість каналів СП ОГС;

$\bar{\varepsilon}_l^2$  – потужність інтерференційної завади;

$\bar{s}_l^2$  – потужність сигналу на вході приймача СП ОГС;

$\bar{\varepsilon}_l^2$  визначається за формулою:

$$\bar{\varepsilon}_l^2 = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{q=0}^{N-1} \mu_{kq} \cos \left[ \frac{2\pi(l+m-1)(k-q)}{N} \right], \quad l = 1, 2, \dots, N,$$

де  $N$  – кількість відліків групового сигналу на інтервалі ортогональності;

$m$  – номер першої з використовуваних несучих частот;

$$\mu_{kq} = \begin{cases} 2 \sum_{i=k+k_T+1}^{R-1} \sum_{j=q+k_T+1}^{R-1} g_i g_j B_{k+j-q-i}, & k \leq R-2-k_T, q \leq R-2-k_T, \\ 2 \sum_{i=0}^{k+k_T-N-L} \sum_{j=0}^{q+k_T-N-L} g_i g_j B_{k+j-q-i}, & k \geq N+L-k_T, q \geq N+L-k_T, \\ \sum_{i=k+k_T+1}^{R-1} \sum_{j=0}^{k+k_T-N-L} g_i g_j B_{2N+L+k+j-q-i}, & k \leq R-2-k_T, q \geq N+L-k_T, \\ \sum_{i=0}^{k+k_T-N-L} \sum_{j=q+k_T+1}^{R-1} g_i g_j B_{2N+L+q+i-k-j}, & q \leq R-2-k_T, k \geq N+L-k_T, \\ 0, & \text{за інших } k \text{ і } q, \end{cases}$$

де  $g_i$  – значення  $i$ -го відліку імпульсної реакції каналу зв'язку;

$R$  – кількість відліків імпульсної реакції каналу зв'язку;

$L$  – кількість відліків групового сигналу на захисному інтервалі;

$k_T$  – номер відліку групового сигналу, з якого починається його оброблення в приймачі,

$$B_x = \sum_{l=1}^n \sigma_l^2 \cos(\pi \cdot x \cdot \frac{l}{n}), \quad (1)$$

де  $\sigma_l$  – дисперсія інформаційних параметрів  $a_l$  і  $b_l$ , що модулюють гармонічні несучі.

Вираз (1) отримано з використанням [5] і відрізняється від аналогічного виразу в [4] наявністю у параметра  $\sigma$  індексу "l", що означає можливість задавати потужність сигналу несучої індивідуально для кожного каналу СП ОГС, це і становить вищезгадану перевагу запропонованого удосконаленого методу розрахунку інтерференційних завад над методом, описаним у [4].

Потужність сигналу на вході приймача СП ОГС  $\bar{s}_l^2$  визначається за формулою:

$$\bar{s}_l^2 = N^2 \sigma_l^2 \left| \sum_{r=0}^{R-1} g_r e^{-i \frac{2\pi(l+m-1)r}{N}} \right|^2, \quad l = 1, 2, \dots, n.$$

Скориставшись цим методом, розрахуємо співвідношення  $h$  ефективних значень інтерференційних завад і сигналу на вході приймача СП ВРЛ для наступних вихідних даних:

- кількість інформаційних каналів  $n = 255$ ;
- номер першого інформаційного каналу  $m = 1$ ;
- кількість відліків на інтервалі ортогональності  $N = 512$ ;
- кількість відліків на захисному інтервалі  $L = 32$ ;
- частотний план 25 МГц-РВ [6], що передбачає діапазон частот передавання від 0 до 25 МГц;
- маска спектральної густини потужності (СГП) на виході передавача системи ВРЛ [6];
- імпульсна реакція двожильного проводу типу ППВ з площею поперечного перетину струмопровідних жил 2,5 мм<sup>2</sup> довжиною 50 м (рис. 1).

Результати розрахунків наведено на тривимірному графіку (рис. 2), що ілюструє залежність  $h$  від номера  $l$  інформаційного каналу СП ВРЛ і номера відліку початку інтегрування  $k_T$  у приймачі СП ВРЛ.

Як видно з рис. 2, значення  $h$  на перших декількох несучих частотах (каналах) СП ВРЛ суттєво перевищують значення  $h$  на інших несучих. Детальніше це можна побачити, побудувавши двовимірний графік залежності  $h$  від номера інформаційного каналу  $l$  для певного значення  $k_T$ , наприклад, для  $k_T = 10$  (рис. 3). З рис. 3 та табл. 1 видно, що значення  $h$  різко змінюються, починаючи з  $l = 21$  (при  $l = 21$   $h = 10,835$  %, тоді як при  $l = 20$   $h = 341,113$  %). Такий різкий скачок пояснюється наступним. Згідно з маскою СГП на виході передавача системи ВРЛ [6] потужність сигналу на несучих частотах нижче 2 МГц значно менша, ніж для частот вище 2 МГц. Відповідно значно менша і потужність сигналу на вході приймача СП ВРЛ. Але потужність міжканальних інтерференційних завад на несучих частотах нижче 2 МГц мало відрізняється від цієї потужності на несучих частотах вище 2 МГц, оскільки вона обумовлена впливом як сигналів на частотах нижче 2 МГц, так і «більш потужних» сигналів усіх інформаційних каналів діапазону частот від 2 до 25 МГц. Це означає, що співвідношення потужності інтерференційних завад і потужності сигналу на вході приймача СП ВРЛ, а отже і значення  $h$  на несучих частотах нижче 2 МГц значно більше, ніж для несучих частот вище 2 МГц. З огляду на те, що рознос частот у даному варіанті СП ВРЛ дорівнює  $25 \text{ МГц} / (N / 2) = 25 \text{ МГц} / 256 = 97,65625 \text{ кГц}$ , то номер найнижчої несучої частоти, що перевищує 2 МГц, складає  $\text{int}\{2 \text{ МГц} / 97,65625 \text{ кГц}\} + 1 = 21$  ( $\text{int}\{x\}$  – це операція відкидання дробової частини числа  $x$ ). Таким чином, обґрунтовано різкий скачок у співвідношенні  $h$  ефективних значень інтерференційних завад і сигналу на вході приймача даного варіанта СП ВРЛ, починаючи саме з  $l = 21$ .

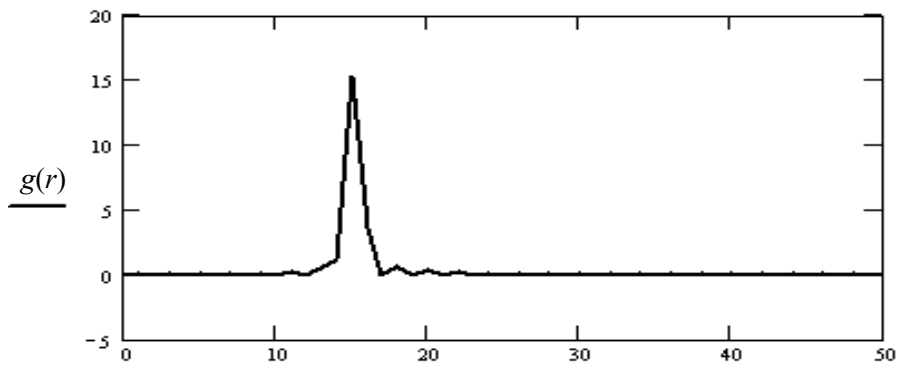


Рисунок 1 – Імпульсна реакція двожильного проводу типу ППВ з площею поперечного перетину струмопровідних жил  $2,5 \text{ мм}^2$  довжиною 50 м

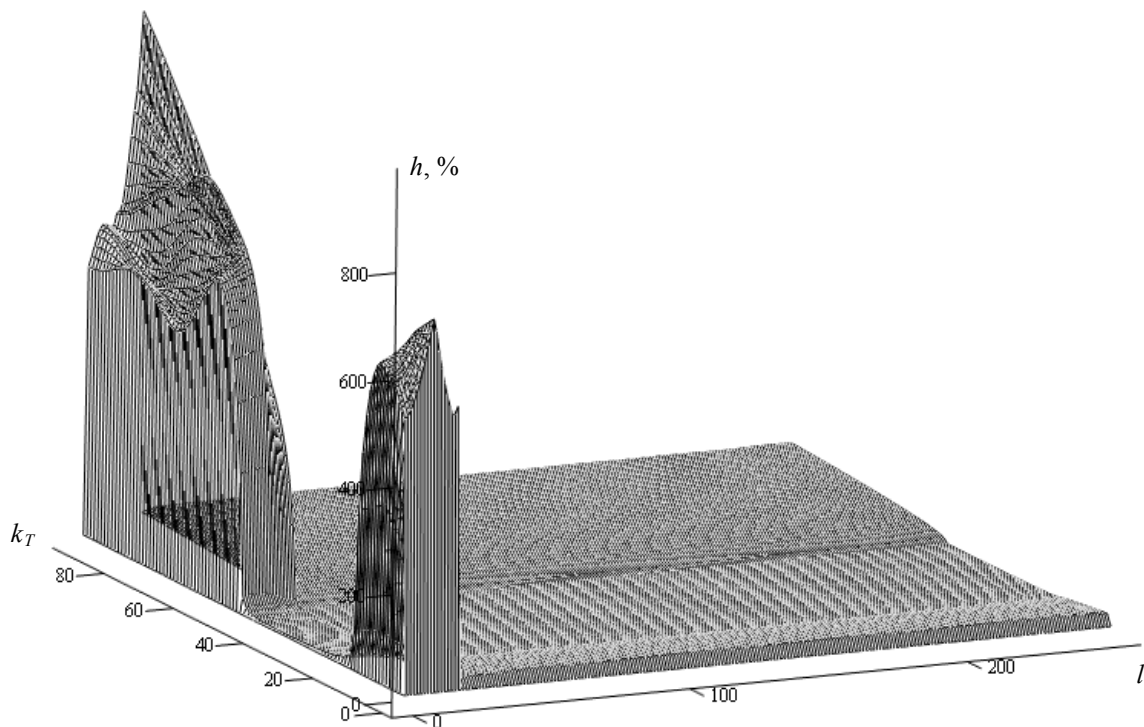


Рисунок 2 – Тривимірний графік залежності співвідношення  $h$  від  $l$  і  $k_T$  для СП ВРЛ при роботі по проводу типу ППВ з площею поперечного перетину струмопровідних жил  $2,5 \text{ мм}^2$  довжиною 50 м ( $n = 255$ ,  $m = 1$ ,  $N = 512$ ,  $L = 32$ )

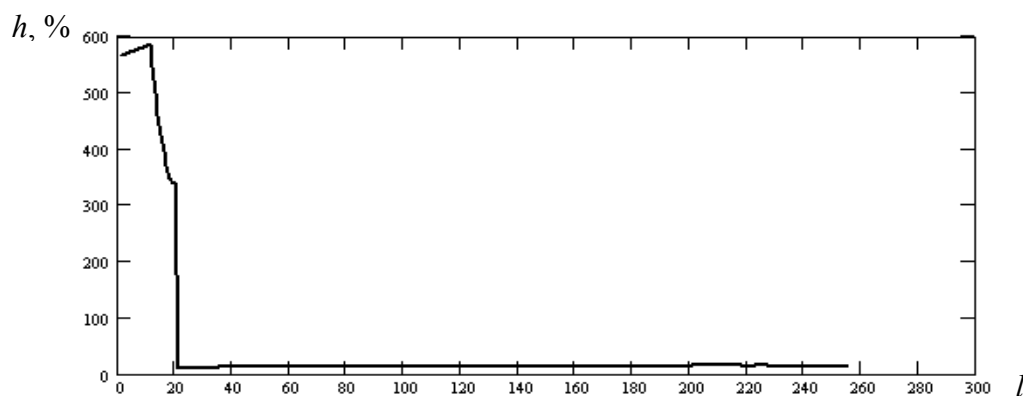


Рисунок 3 – Графік залежності співвідношення  $h$  від  $l$  для  $k_T = 10$  при роботі по проводу типу ППВ з площею поперечного перетину струмопровідних жил  $2,5 \text{ мм}^2$  довжиною 50 м ( $n = 255$ ,  $m = 1$ ,  $N = 512$ ,  $L = 32$ )

Таблиця 1 – Залежність співвідношення  $h$  від  $l$  для  $k_T = 10$  при роботі по проводу типу ППВ з площею поперечного перетину струмопровідних жил  $2,5 \text{ мм}^2$  довжиною 50 м ( $n = 256$ ;  $m = 1$ ;  $N = 512$ ;  $L = 32$ )

$l$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$h, \%$	565,9	568,1	570,0	571,8	573,6	575,4	577,3	579,5	581,7	584,2
$l$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	<b>20</b>
$h, \%$	586,2	546,2	499,0	459,2	425,1	395,7	370,1	347,6	339,6	<b>341,1</b>
$l$	<b>21</b>	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$h, \%$	<b>10,84</b>	10,88	10,93	10,98	11,02	11,07	11,12	11,18	11,23	11,29

Високі значення  $h$  для  $l < 21$  еквівалентні низьким значенням відношення потужності сигналу на вході приймача СП ВРЛ до потужності інтерференційних завад, за яких передавання даних цими каналами СП ВРЛ без застосування спеціальних методів боротьби з інтерференційними завадами є неможливим для більшості, як показали розрахунки, реальних каналів передавання, утворених на базі домової електропроводки. Тому подальші дослідження інтерференційних завад будемо проводити для варіанта СП ВРЛ з використанням діапазону частот передавання від 2 до 25 МГц. У випадку розносу частот 97,65625 кГц це відповідає номеру першого інформаційного каналу  $m = 21$  і, відповідно, кількості інформаційних каналів СП ВРЛ  $n = 255 - m + 1 = 255 - 21 + 1 = 235$ . Результати розрахунку співвідношення  $h$  ефективних значень інтерференційних завад і сигналу на вході приймача СП ВРЛ для вищенаведених вихідних даних, але при  $m = 21$ , наведено на рис. 4 і 5. Очевидно, у даному випадку вже не спостерігається настільки різких змін значення  $h$  при зростанні номера інформаційної несучої  $l$ , що пояснюється однаковим рівнем передаваної потужності на всіх використовуваних несучих частотах.

Розглянемо тепер залежність  $h$  від  $k_T$ . Для наочності побудуємо графік залежності  $h$  від  $k_T$  для довільного  $l$ , наприклад, для  $l = 30$ . З рис. 2, 4 і 6 видно, що залежність  $h$  від  $k_T$  характеризується яскраво вираженим провалом за певних значень  $k_T$ . Як відомо [7], автоматичний пошук оптимальних значень  $k_T$ , за яких співвідношення ефективних значень інтерференційних завад і сигналу на вході приймача СП ВРЛ досягає мінімальних значень, є задачею системи тактової синхронізації СП ВРЛ.

На завершення підсумуємо, що у даній статті запропоновано удосконалений метод розрахунку інтерференційних завад у СП ОГС, який дозволяє враховувати різні рівні потужності передаваного сигналу на кожній несучій СП ОГС. З використанням цього методу здійснено розрахунки співвідношення ефективних значень інтерференційних завад і сигналу на вході приймача СП ВРЛ. Аналіз результатів цих розрахунків показав, що на це співвідношення суттєвий вплив здійснює нерівномірність залежності потужності передаваного сигналу від номера несучої частоти. Також встановлено наявність певного діапазону номерів відліку групового сигналу, з якого починається його оброблення в приймачі, в межах якого розглядуване співвідношення набуває мінімального значення.

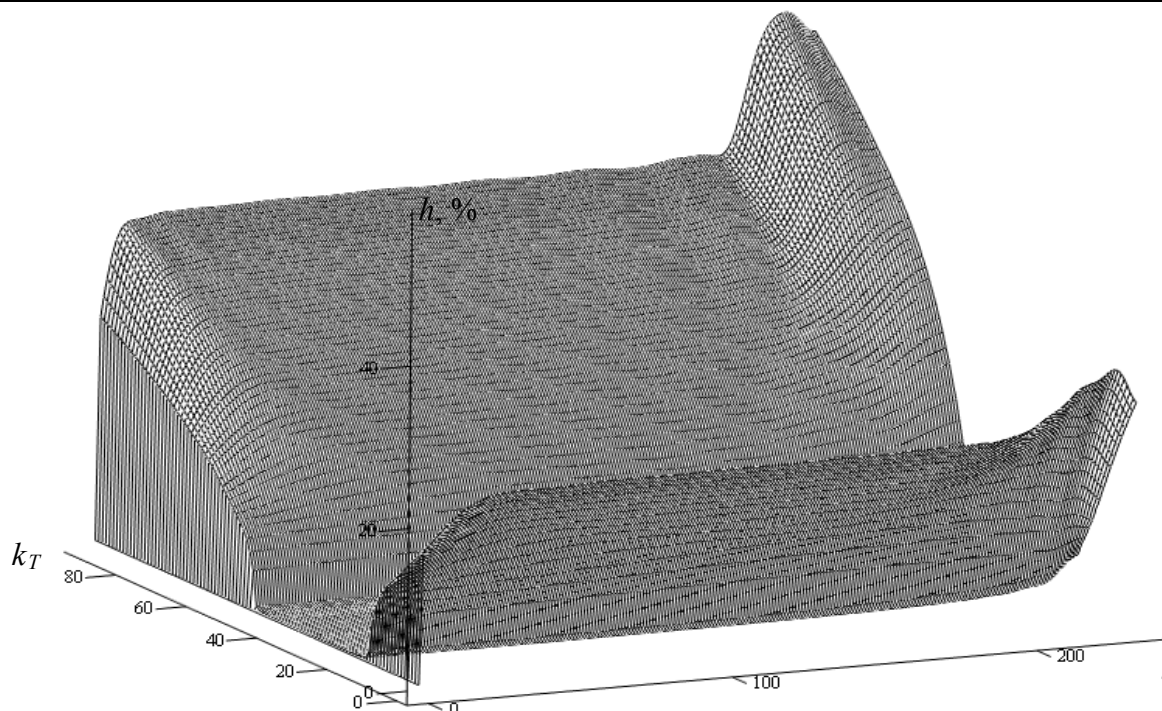


Рисунок 4 – Тривимірний графік залежності співвідношення  $h$  від  $l$  і  $k_T$  у для СП ВРЛ при роботі по проводу типу ППВ з площею поперечного перетину струмопровідних жил  $2,5 \text{ мм}^2$  ( $n = 255, m = 21, N = 512, L = 32$ ) для довжини 50 м

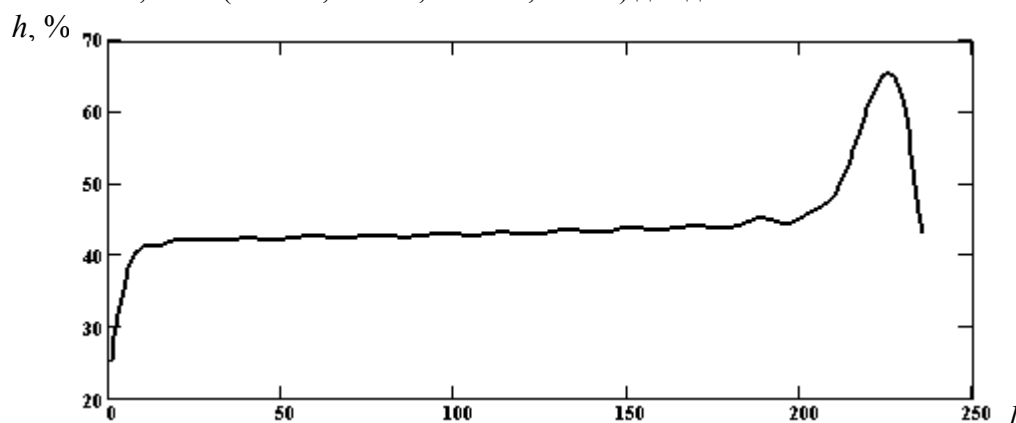


Рисунок 5 – Графік залежності співвідношення  $h$  від  $l$  для  $k_T = 10$  при роботі по проводу типу ППВ з площею поперечного перетину струмопровідних жил  $2,5 \text{ мм}^2$  довжиною 50 м ( $n = 255, m = 21, N = 512, L = 32$ )

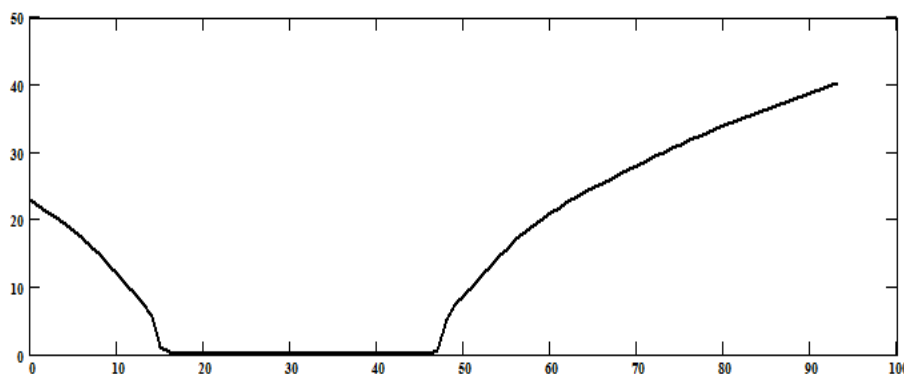


Рисунок 6 – Графік залежності співвідношення  $h$  від  $k_T$  для  $l = 30$  при роботі по проводу типу ППВ з площею поперечного перетину струмопровідних жил  $2,5 \text{ мм}^2$  довжиною 50 м ( $n = 255, m = 21, N = 512, L = 32$ )

*Литература*

1. Моррисі Питер. Реалізація технології VPL / Питер Моррисі // Сети и системы связи. – 2007. – № 11.
2. *Балашов В.А.* Системи передачі ортогональними гармонічними сигналами / Балашов В.А., Воробієнко П.П., Ляховецький Л.М. – М.: Еко-трендз, 2012. – 228 с.
3. Системи передавання широкосмуговими сигналами: [навч. посіб.] / В.О. Балашов, П.П. Воробієнко, Л.М. Ляховецький, В.В. Педяш. – Одеса: Вид. центр ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2012. – 336 с.
4. *Балашов В.А.* Метод оцінки інтерференційних поєм в багатоканалній модемі / В.А. Балашов, В.А. Кузнецов // Труды УНИИРТ. – 1995. – № 2. – С. 60 – 66.
5. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций; под ред. А.А. Свешникова. – М.: Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1970.
6. ITU-T Recommendation G.9964 Unified high-speed wireline-based home networking transceivers – Power spectral density specification.
7. Кузнецов В.А. Исследование и разработка эффективных цифровых алгоритмов обработки сигналов в многоканальных системах передачи: дис. ... кандидата тех. наук: 05.12.02 / Кузнецов Владимир Анатольевич. – Одесса, 1997. – 182 с.