

забезпечення пропускної здатності 10...12 постановників активних шумових перешкод, зменшувати відносний рівень бічного прийому до -33...-35 і менш ДБ.

### Література

1. Долгушин В.П. Метод підвищення ефективності (пропускної спроможності) систем пеленгації джерел АШП на основі просторово-кореляційного алгоритму обробки сигналів / В.П. Долгушин, О.В. Горшколепов, О.В. Мірошніченко // Збірник наук. праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. – К. : ВІКНУ, 2006. – Вип. 2. – С. 56–63.

2. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга первая / Левин Б.Р. – М. : Сов. радио, 1966.

Рецензент: д.т.н. Шинкарук О.М.  
Надійшла 7.2.2012 р.

УДК 621.39

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Ю.О. БАБІЙ, Л.М. МЕЛЬНИК  
Хмельницький національний університет

## ВПЛИВ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ КОРПОРАТИВНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

*Проведено дослідження пропускної спроможності волоконно-оптичних ліній в корпоративних системах зв'язку зі спектральним ущільненням каналів, та огляд існуючих методів зменшення впливу нелінійних ефектів, міжмодової дисперсії та джиттера на пропускну здатність і довжину регенераційної ділянки волоконно-оптичних систем передавання. Запропоновано метод який найкраще забезпечить підвищення пропускної здатності транспортної мережі шляхом зменшення впливу поляризаційно-модової дисперсії оптичних світловодів волоконно-оптичних систем передавання інформації зі спектральним ущільненням каналів.*

*The research capacity of fiber optic lines in corporate communication systems with wavelength division multiplexing channels, and review of existing methods of reducing the influence of nonlinear effects of polarization dispersion and jitter on the bandwidth and the length of the regeneration areas of fiber optic transmission systems. The method that best secure higher bandwidth transport network by reducing the influence of polarization Mode Dispersion optical light guide fiber optic systems transmit information with spectral multiplexing.*

### Вступ

На даний момент Україна працює над розвитком золотодобувної галузі, і деякі проекти по освоєнню нових копалин вже є актуальними. Українська та польсько-австралійська компанії заключили договір по розробці проекту з видобутку золота у селі Бобрикове, Луганської області, що передбачає створення більш як 300 робочих місць. Для забезпечення швидкого та надійного зв'язку України з країнами партнерами, необхідно створення корпоративної системи зв'язку з використанням оптоволоконних ліній [1].

Якісними показниками оптоволоконних ліній зв'язку (ВОЛЗ) є швидкість передачі та завадостійкість сигналів. Зі збільшенням швидкостей у системах ущільнення оптичних каналів за довжинами хвиль WDM (Wavelength Division Multiplexing) виникають негативні явища, які впливають на якість сигналу, одним з яких є поляризаційна модова дисперсія (ПМД) та джиттер. Оптичні волокна (ОВ) транспортних мереж є анізотропним середовищем під впливом статичних і динамічних факторів (механічних спотворень), що призводить до різних швидкостей поширення поляризаційних складових і виникнення диференціальної групової затримки (ДГЗ), і як наслідок, поляризаційної модової дисперсії. Для боротьби з поляризаційною модовою дисперсією та джиттером використаємо метод підвищення пропускної здатності оптичної транспортної мережі за рахунок поканальної компенсації поляризаційної модової дисперсії оптичного волокна та зменшення впливу джиттера шляхом усунення впливу його детермінованої складової [2].

**Постановка наукової задачі:** сучасна мережа синхронної цифрової ієрархії SDH (Synchronous Digital Hierarchy) побудована на базі мультиплексування з часовим розподілом каналів TDM (Time Division Multiplexing), дійшовши до швидкості передавання 10 Гбіт/с, зіштовхнулася з проблемами хроматичної та поляризаційної дисперсії моди, котрі на швидкості вищій від 10 Гбіт/с, починають суттєво впливати на якість передачі. Таким чином, розширення пропускної здатності за допомогою TDM виявляється досить проблематичним. Ця проблема послужила поштовхом до створення систем ущільнення оптичних каналів за довжиною хвиль WDM [2].

Явища хроматичної та поляризаційної модової дисперсії в оптичному волокні ставлять обмеження на швидкість і дальність передачі сигналу. Для компенсації їх негативного впливу використовують різні методи компенсації: попереднє чірпування лазерного джерела, інверсію спектра в середині ділянки, волоконні бреггівських решітки з постійною лінійною складовою що змінюється (чірпування), волокно з компенсацією дисперсії і пристрої компенсації дисперсії[3].

На відміну від однохвильових систем передачі, в системах WDM актуальною стає компенсація

дисперсії не на одній довжині хвилі, а в робочому діапазоні довжин хвиль, так звана компенсація нахилу дисперсії.

Оптичні волокна транспортних мереж є анізотропним середовищем під впливом статичних і динамічних факторів (механічних спотворень), що призводить до різних швидкостей поширення поляризаційних складових і виникнення диференціальної групової затримки, та як наслідок, поляризаційної модової дисперсії. Основним завданням при створенні підсистеми моделювання оптичного волокна з двозаломленням було збереження адекватної залежності диференціальної групової затримки від довжини хвилі оптичної несучої, тому для опису поширення світла через такі структури було вибрано багатосегментну структуру волокна і модифікований метод Джонса (1), що полягає у визначенні матриць для кожного із сегментів, що характеризується азимутом  $q_i$  і затримкою  $d_i = w \cdot \Delta t_i$ :

$$M_i(w) = \begin{bmatrix} \cos^2 q_i + e^{-id_i} \sin^2 q_i & (1 - e^{-id_i}) \cos q_i \sin q_i \\ (1 - e^{-id_i}) \cos q_i \sin q_i & \sin^2 q_i + e^{-id_i} \cos^2 q_i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $d_i$  – випадковий зсув фаз між ортогонально поляризованими складовими,  $q_i$  – азимут пластинки,  $\Delta t_i$  – максимальна часова затримка пластинки.

Відповідно до виразу (2) результуюча матриця Джонса усього оптичного волокна  $T$  з  $N$  сегментів матиме вигляд:

$$T = \prod_{i=0}^{N-1} M_i(d), \quad (2)$$

де  $N$  – кількість сегментів ОВ,  $M_i(d)$  – комплексна матриця Джонса,  $T$  – добуток матриць Джонса кожного сегмента.

Результуючий час затримки між швидким і повільним станами поляризації визначається як сума затримок кожного з сегментів:

$$dgd_{\Sigma} = \sum_{k=1}^N dgd_k, \quad (3)$$

де  $dgd_k$  – диференціальна групова затримка сигналу оптичного волокна.

Створена підсистема моделювання оптичного волокна з двозаломленням використовує також методи статистичного моделювання, що дозволяє досліджувати залежність диференціальної групової затримки від еліпса поляризації вхідного сигналу, довжини хвилі оптичної несучої і ширини смуги випромінювання оптичного джерела, а кількість сегментів і їх параметри безпосередньо пов'язати з коефіцієнтом ПМД і довжиною оптичного волокна[4].

Нелінійні ефекти виникають через нелінійну залежність індексу рефракції матеріалу оптичного волокна від потужності сигналу, що ним передається, і можуть викликати шуми і спотворення оптичних імпульсів, що накладає обмеження на максимальну швидкість передавання і пропускну здатність ОВ, а також на довжину регенераційної ділянки. Для визначення впливу нелінійних ефектів використовується ряд аналітичних виразів, так як ці ефекти носять більше детермінований, ніж випадковий характер. Так, для визначення порогової потужності стимульованого розсіювання Брілюена (SBS) використовуємо вираз:

$$P_{th}(SBS) \approx 21A_{eff} / g_B L_{eff}, \quad (4)$$

де  $g_B = 5 \cdot 10^{-11}$  – типовий приріст SBS,  $L_{eff} = \frac{1}{a}(1 - e^{-aL})$  – ефективна довжина оптичного волокна,  $A_{eff} \approx p(MFD/2)^2$  – ефективна область, може знаходитися в діаметрі модового поля (MFD),  $a$  – затухання в ОВ.

Поріг потужності для стимульованого розсіювання Рамана (SRS) можна обчислити за формулою:

$$P_{th}(SRS) = 16A_{eff} / g_R L_{eff}, \quad (5)$$

де  $g_R = 10^{-13}$  – підсилювальний коефіцієнт SRS, мВт, при довжині хвилі  $\lambda = 1500$  нм.

З виразів (4) та (5) видно, що явища SBS і SRS полягають в тому, що оптичний сигнал розсіюється і зміщується в область довших хвиль. Якщо сумарна потужність сигналу в ОВ не перевищує розрахованих, то впливом даних ефектів можна знехтувати. Фазова самомодуляція починає проявлятися за потужності вхідного випромінювання  $\sim 8 \dots 10$  мВт. Зміна фази викликає зсув частоти, що призводить до розширення спектру сигналу.

Зміна фази сигналу:

$$\Phi(SPM) = g P_{in} L_{eff}, \quad (6)$$

де  $P_{in}$  – вхідна потужність сигналу, Вт,  $g = 2pn / I A_{eff}$  – нелінійний коефіцієнт поширення,  $n \approx 3.2 \cdot 10^{-20}$  – нелінійний коефіцієнт індексу рефракції, м<sup>2</sup>/Вт.

Перехранна фазова самомодуляція (ХРМ) виникає тоді, коли потужність однієї хвилі, що поширюється у волокні, викликає зміну показника заломлення середовища поширення і призводить до самомодуляції фази іншої хвилі. Зміну фази імпульсу під впливом ХРМ можна визначити, модифікувавши формулу для SPM (6) наступним чином:

$$\Phi_1(XPM) = g L_{eff} (P_1 + 2P_2 + \dots + 2P_n), \quad (7)$$

де  $P_1, P_2, \dots, P_n$  – потужність хвиль в ОВ, (дБ). ХРМ є первинним обмеженням вхідної потужності для систем передавання зі спектральним ущільненням.

Чотирихвильове змішування FWM (Four-Wave Mixing) виникає в системах передавання зі спектральним ущільненням каналів і полягає у виникненні паразитних хвиль, що призводить до втрати потужності сигналу і виникнення паразитних впливів в інших каналах системи. Основний параметр в рівнянні для ефективності FWM є  $D\mathbf{b}$  – розузгодження фази FWM через дисперсії оригінальних хвиль:

$$\Delta\mathbf{b} = \mathbf{b}_i + \mathbf{b}_j - \mathbf{b}_k - \mathbf{b}_{ijk} = \left(\frac{2pc}{I^2}\right) \left(\frac{dD}{dI}\right) \left(\frac{I_i + I_j}{2} - I_0\right) (I_i - I_j) (I_j - I_k), \quad (8)$$

де  $\mathbf{b}_i, \mathbf{b}_j, \mathbf{b}_k, \mathbf{b}_{ijk}$  – постійна розповсюдження,  $dD/dI$  – нахил дисперсійної характеристики (відомий як  $S_0$ ), ( $pc / \text{нм}^2 \cdot \text{км}$ );  $\lambda_i, \lambda_j, \lambda_k$  – три оригінальні довжини хвилі, (нм);

$\lambda_0$  – нульова дисперсійна довжина хвилі, (нм);

$\lambda$  – довжина хвилі передавання у вакуумі (1550 нм).

Формула для визначення ефективності FWM:

$$h = \left(\frac{a^2}{a^2 + \Delta\mathbf{b}^2}\right) \left(1 + \frac{4e^{-aL} \sin^2(\Delta\mathbf{b}L/2)}{(1 - e^{-aL})^2}\right) \left(\frac{\sin(N_A \Delta\mathbf{b}L/2)}{\sin(\Delta\mathbf{b}L/2)}\right), \quad (9)$$

де  $L$  – довжина ОВ, (м),

$N_A$  – числова апертура ОВ.

Потужність згенерованої довжини хвилі:

$$P_{ijk} = \left(\frac{D_{ijk}}{3} g L_e\right) P_i P_j P_k e^{-aL} h, \quad (10)$$

де  $D_{ijk} = 3 \div 6$  – дегенеруючий чинник, залежний від міжканальної відстані і хроматичної дисперсії використовуваного ОВ.

Для реалізації адекватної моделі оптичної транспортної системи необхідно виміряти її характеристики і параметри, для чого були вибрані методики і розроблені схеми експериментів з вимірювання диференціальної групової затримки в широкому спектральному діапазоні і джиттера (фазового тремтіння), що має місце в системах такого класу, а також проведені вимірювання коефіцієнта бітової помилки. Результати вимірювань лягли в основу реалізації відповідних підсистем моделювання оптичних транспортних систем (ОТС), а також були використані для перевірки адекватності розробленої моделі.

Один із найефективніших методів аналізу параметрів цифрової системи передавання є ОКО-діаграма, тому саме цей метод і ліг в основу створення моделі ОТС. Запропонований метод дозволяє аналізувати як енергетичні, так і часові параметри цифрового сигналу.

Око-діаграма є результат багатократного накладання бітових послідовностей, що відображається на екрані осцилографа у вигляді діаграми розподілу амплітуди сигналу в часі.

Фундаментальним показником якості цифрових систем передачі є коефіцієнт помилок BER. Робота цифрових систем передачі вважається нормальною тільки в тому випадку, якщо BER не перевищує певне допустиме значення, що відповідає використовуваному мережевому стандарту.

Досить поширена методика оцінки коефіцієнта помилок BER на основі визначення Q-фактора. Q-фактор – це параметр, який безпосередньо відображає якість сигналу цифрової системи передачі. Існує певна функціональна залежність Q-фактора сигналу і вимірюваного коефіцієнта помилок BER. Q-фактор визначається шляхом статистичної обробки результатів вимірювання амплітуди і фази сигналу на електричному рівні, а саме безпосередньо по око-діаграмі. При цьому виконується побудова функції розподілу станів «1» і «0», а для цих розподілів, в припущенні їх гаусової форми, оцінюються математичні очікування станів  $E1$  і  $E0$  і їх середньоквадратичні відхилення  $S_1$  і  $S_0$  (рис. 1, а).

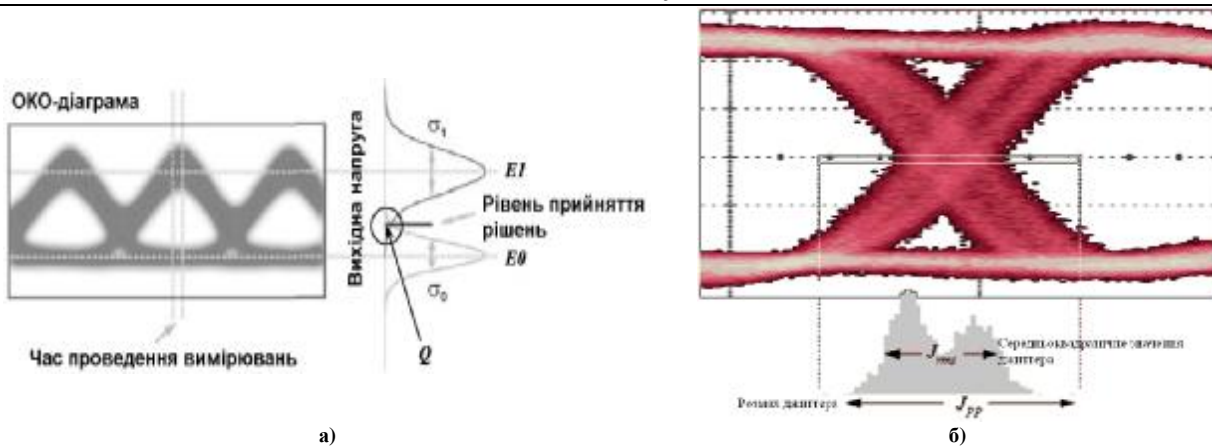


Рис. 1. Ідентифікація око-діаграми: а) оцінка Q-фактора; б) оцінка джиттера

Q-фактор розраховується за наступною формулою :

$$Q = \frac{|E1 - E0|}{s_1 + s_0} \quad (11)$$

При цьому сам коефіцієнт помилок *BER* визначається за формулою :

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2p}} \exp \left( -\frac{Q^2}{2} \right) \quad (12)$$

Для оцінки розподілу джиттера, що призводить до часового зсуву оптичних імпульсів, визначають точку синхронізації і зміщення імпульсів, що передавалися через послідовність пристроїв і оптичних волокон відносно цієї точки. В результаті отримуємо такі параметри джиттера, як його середньоквадратичне значення і максимальний розмах (рис. 1, б). Шляхом детальнішого аналізу отриманих значень можна встановити деякі закономірності виникнення джиттера, що дозволить реалізувати схему зменшення його негативного впливу.

В основу розробленого методу компенсації ПМД покладено той факт, що диференціальна групова затримка (ДГЗ) залежить від еліпса поляризації світлового випромінювання, що подається в оптичне волокно. Схему волоконно-оптичної системи передавання інформації зі спектральним ущільненням каналів і схемою компенсації поляризаційної модової дисперсії на основі модулятора вхідного світлового випромінювання, аналізатора ДГЗ і зворотного каналу для вибору найкращого еліпса поляризації вхідного випромінювання показано на (рис. 2).

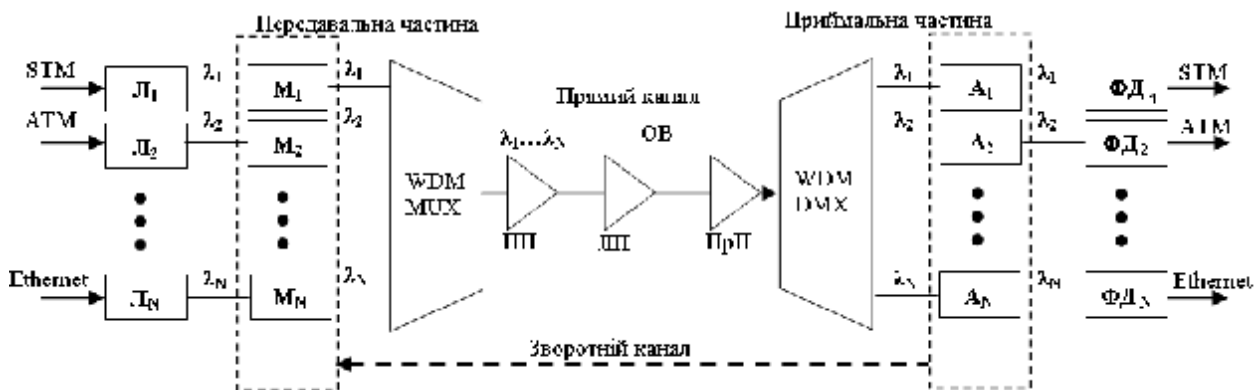


Рис. 2. Схема DWDM-системи передавання з поканальною компенсацією поляризаційно-модової дисперсії

В схему (рис. 2) входять наступні компоненти:  $L_1, L_2 \dots L_N$  – одномодові лазери; ПП – підсилювач потужності; ЛП – лінійний підсилювач (як правило EDFA); ПрП – попередній підсилювач потужності;  $\Phi D_1, \Phi D_2 \dots \Phi D_N$  – фотодетектори; ОВ – оптичне волокно; WDM MUX – мультиплексор спектрального ущільнення; WDM DMX – демультіплексор спектрального ущільнення; STM, ATM, Ethernet – можливі види трафіка;  $M_1, M_2 \dots M_N$  – модулятори – пристрої для зміни еліпса поляризації вхідного випромінювання;  $A_1, A_2 \dots A_N$  – аналізатори – пристрої для визначення ДГЗ і для керування модуляторами через зворотній канал.

Лазер Л випромінює лінійно-поляризоване світло, причому може використовуватися як лазер з внутрішньою модуляцією інтенсивності, так і передавальний оптичний модуль з зовнішнім модулятором.

Випромінювання подається на модулятор М, далі сигнали всіх спектральних каналів подаються на оптичний WDM – мультиплексор, після якого груповий сигнал N спектральних каналів передається в оптичне волокно через широкосмуговий підсилювач потужності.

Схема компенсації ПМД, що показана штриховою лінією на (рис. 2), дозволяє оперативно реагувати на зміну ДГЗ. В якості модулятора використовується електрооптичний кристал. Під дією керуючої напруги кристал змінює двозаломлення, причому різниця показників заломлення швидкої і повільної осей залежить від величини прикладеної напруги. Для схеми компенсації ПМД потрібно, щоб модулятор дозволяв реалізувати різницю часу поширення швидкої і повільної складових в межах від 0 до  $2\pi/\omega$ , де  $\omega$  – кутова частота оптичного сигналу. Зрозуміло, що для різної довжини хвилі оптичної несучої буде і різне значення прикладеної напруги для отримання однакової різниці ходу.

Аналізатор на виході ОВ вимірює значення ДГЗ в даний момент. Якщо значення ДГЗ перевищує максимально допустиме, то по зворотному каналу передається сигнал на зміну вхідного еліпса поляризації. На модулятор в покроковому режимі подаються фіксовані значення напруги, а на виході аналізатора визначається ДГЗ сигналу. Передача даних ведеться неперервно на кожному еліпсі поляризації вхідного сигналу. Після проходження одного циклу вимірювань (зміна відносного зсуву фаз кристала від 0 до  $2\pi$  з заданою кількістю кроків) на модуляторі встановлюється таке значення напруги, при якому ДГЗ на виході волокна приймало мінімальне значення, і цей вхідний стан поляризації зберігається до того моменту, поки значення ДГЗ знову не перевищить допустимого. Такий алгоритм компенсації використовується для кожного спектрального каналу окремо, незалежно один від одного [5].

**Висновки.** Розглянутий вище метод компенсації поляризаційної модової дисперсії в волоконно-оптичних лініях корпоративних систем зв'язку зі спектральним ущільненням каналів дозволяє зменшити вплив нелінійних ефектів, міжмодової дисперсії, джиттера та підвищити пропускну здатність і швидкість передачі цифрових потоків інформації оптичних транспортних систем.

### Література

1. Починається реалізація польсько-австралійського інвестпроект з розробки золотих родовищ в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://geografica.net.ua/news/pochinaetsja\\_realizacija\\_polsko\\_avstralijskogo\\_investproektu\\_z\\_rozrobki\\_zolotikh\\_rodovishh\\_v\\_ukrajini/2011-09-21-1528](http://geografica.net.ua/news/pochinaetsja_realizacija_polsko_avstralijskogo_investproektu_z_rozrobki_zolotikh_rodovishh_v_ukrajini/2011-09-21-1528).
2. Нікіфоренко К.Б. Дослідження взаємних впливів в оптичних каналах DWDM систем / К.Б. Нікіфоренко, Ю.М. Панченко // Наукові записки УНДІЗ. – 2011. – № 1 (17). С. – 64–68.
3. Поляризаційно модова дисперсія [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.fiberman.ru/articles/fiber-optical/polarization-mod-dispersion/>.
4. Олексін М.І. Модель оптичної транспортної системи на основі технології DWDM / М.І. Олексін, Є.М. Чернихівський // Радіоелектроніка та телекомунікації: [зб. наук. пр.] відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Національного університету "Львівська політехніка", 2008. – 212 с.
5. Олексін М.І. Вплив дисперсії і нелінійних ефектів оптичного волокна на параметри транспортних систем : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.12.02 "Телекомунікаційні системи та мережі" / М.І. Олексін. – Одеса 2009. – 23 с.

Рецензент: д.т.н. Троцишин І.В.  
Надійшла 7.2.2012 р.

УДК 621.396.12

В.Б. РУДНИЦЬКИЙ, А.В. СПИВАК  
Хмельницький національний університет

## ОБҐРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСНОГО ПРИБОРУ НВЧ ПРИЙМАЧІВ НА ОСНОВІ НАДПРОВІДНИХ СТРУКТУР

*В статті розглядаються основні вимоги до захисних пристроїв приймачів НВЧ діапазону, що будуються на основі високошвидкісних енергозалежних надпровідникових структур та визначені основні критерії оцінки їх ефективності в умовах надкороткоімпульсних електромагнітних впливів.*

*The article deals with the basic requirements for protective devices UHF receiversthat are based on high-energy-dependent on conducting structures and the basiccriteria for evaluating their effectiveness in ultrashort electromagnetic pulse effects.*

Ключові слова: діапазон, хвилевід, радіоелектронна апаратура.

Одним із перспективних напрямів розробки захисних пристроїв приймачів НВЧ діапазону є використання у вхідних хвилевідних трактах вставок зі спеціальних матеріалів, що характеризуються чутливою до інтенсивності електромагнітного поля провідністю. Такими матеріалами є високотемпературні надпровідники [1, 3], в яких за певних температурних умов достатньо швидко може змінюватись власна провідність при змінній інтенсивності електричного поля на їх поверхні. Існує багато робіт цього напрямку,