

О. Ю. Іохов, В. Г. Малюк, Є. О. Каплун

Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна

## ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО ЗАСОБІВ ЗНЕШКОДЖЕННЯ РАДІОКЕРОВАНИХ БОЄПРИПАСІВ

**Анотація.** Проаналізовано можливості застосування надширококутових сигналів для функціонального ураження радіокерованих боєприпасів для радіоелектронного захисту особового складу підрозділів НГУ. Показано, що найбільш перспективними є системи дискретно-безперервної дії, які використовують суміщений ємнісний накопичувач енергії з використанням генераторів імпульсних напруг Аркадьєва-Маркса і узгоджену з ним антенну систему, що дозволяє випромінювати електромагнітні імпульси високої інтенсивності. Оцінені енергетичні та просторові характеристики антенної системи засобу функціонального ураження радіокерованих боєприпасів.

**Ключові слова:** антитерористична операція, радіокерований боєприпас; функціональне ураження радіозасобу.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Умови виконання завдань з забезпечення національної безпеки України Національною гвардією України (НГУ), а саме боротьба з диверсійними, диверсійно-розвідувальними групами (ДРГ) противника та незаконними збройними формуваннями (НЗФ) під час зовнішнього або внутрішнього збройного конфлікту вимагають від застосування спеціальних заходів та засобів протидії використанню противником радіокерованих боєприпасів. Аналіз перебігу останніх конфліктів та наслідків терористичних атак показує на постійне застосування засобів дистанційного детонування вибухових пристроїв. Висока ефективність використання радіокерованих боєприпасів (РБП) пов'язана з можливістю контролю процесу їх детонування у реальному режимі часу. На даний час в НГУ відсутні будь-які засоби знешкодження радіокерованих боєприпасів тому проблема радіоелектронного захисту особового складу підрозділів НГУ при виконанні дій з забезпечення національної безпеки при застосуванні радіокерованих боєприпасів є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Одним із рішень зазначеної проблеми є застосування потужних електромагнітних імпульсів (ЕМІ) [1, 2]. Роботи, пов'язані з практичним використанням генераторів ЕМІ, досить добре відомі, наприклад [1, 3]. При розробці засобів радіоелектронного захисту вузьким місцем є саме антенна система. На даний час для автобронетанкової техніки Національної гвардії та інших силових структур України відсутні обґрунтування основних технічних вимог до засобів знешкодження РБП [2].

Таким чином, **мета статті** полягає у обґрунтуванні основних технічних вимог до засобів знешкодження радіокерованих боєприпасів для радіоелектронного захисту особового складу підрозділів НГУ.

### Основний матеріал

Проведений вище аналіз досліджень і наведені чисельні параметри радіокерованих боєприпасів дозволяють визначити енергетичні та просторові ха-

рактеристики антенної системи для функціонального подавлення (ФП) РБП [3].

Розглянемо наступний варіант.

1. Робоча частота роботи радіолінії становить 20 МГц, що відповідає довжині хвилі  $\lambda_{\text{тер}} = 15$  м.

2. Антена передавача і приймача є лінійна антенна (вібратор), для якого коефіцієнт спрямованої дії (КНД)  $D = 1,5$  оскільки  $L \ll \lambda$ . У діапазоні 20 ... 100 МГц довжина вібратора складає 0,05 ... 0,1 $\lambda_{\text{тер}}$ . З міркувань скритності виберемо  $L = 0,05\lambda_{\text{тер}} = 75$  см. Тоді  $D = 0,05$ .

3. Виходячи з даних, наведених у роботах [4], чутливість приймача може бути обрана такою:  $U_{\text{min}} = 10$  мкВ.

4. Чутливість приймача, перерахована у напруженість електричного поля на вході, за умови, що коефіцієнт корисної дії (ККД) антенно-фідерного тракту  $\eta = 1$ , визначається виразом:

$$E_{\text{min}} = \sqrt{\frac{60U_{\text{min}}^2}{\lambda^2 D}} \approx 2,3 \text{ мкВ/м}. \quad (1)$$

5. Динамічний діапазон приймача становить 50 дБ. Тоді  $U_{\text{max}} = 0,1$  В,  $E_{\text{max}} = 0,23$  В/м.

Результати аналогічних розрахунків для інших можливих частот РБП зведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Величина напруженості електричного поля, що забезпечує нормальну роботу РБП

$f$ , МГц	$\Lambda$ , м	$L$ , м	$D$	$U_{\text{min}}$ , мкВ	$E_{\text{min}}$ , мкВ/м	$E_{\text{max}}$ , В/м
50	6	0,6	0,2	5	14,4	1,44
100	3	0,3	0,2	5	28,8	2,89
500	0,60	0,3	1	5	64,5	6,45
1000	0,30	0,15	1	2	51,6	5,16
2000	0,15	0,15	2	2	73	7,3
3000	0,10	0,1	2	2	110	11

Як зазначається в [5], динамічний діапазон приймача в значній мірі визначає його перешкодо-захищеність. Більшість існуючих способів завадо-захисту виявляється ефективним лише тоді, коли

рівень перешкоди не перевищує динамічний діапазон. Іншими словами, якщо сформувавши поле на заданій частоті, що перевищує  $E_{max}$ , то можна говорити про надійне блокування приймача, тобто про неможливість роботи РБП. Для оцінки величини напруженості електричного поля приземної хвилі, що розповсюджується від передавача РБП, скористаємося співвідношенням [6]:

$$E_{РБП} = \frac{1}{\sqrt{|\epsilon - j60\lambda\sigma|}} j \frac{120\pi IL \exp(-jkR)}{\lambda R}, \quad (2)$$

де  $\epsilon$ ,  $\sigma$  - діелектрична проникність і провідність Землі;  $L$  - лінійний розмір антени.

Для сухої землі відповідно до [6] з огляду на наведені вище дані отримаємо, що для  $f_{мер} = 20$  МГц і  $R = 50$  м з урахуванням втрат на трасі у випадку приповерхневого поширення електромагнітної хвилі (загасання 30 дБ на 50 м) і втрат на неузгодженість по поляризації (3 дБ)  $E_{РБП} = 1,64$  мВ / м. При зменшенні довжини радіолінії (відстань між передавачем сигналу на підшив і прийомним пристроєм РБП) зменшується коефіцієнт захисту, що будемо вважати неприпустимим. При прийнятих вихідних даних аналогічні значення виходять і для частоти  $f_{мер} = 50$  МГц.

Припустимо, що радіочастоти діапазону 20 ... 50 МГц не використовуватимуться на відкритих ділянках дороги для ураження колони військової техніки (бронетехніки) з міркувань скритності. Тому для подальших розрахунків виберемо робочий діапазон РБП 100 ... 3000 МГц. Для визначення можливостей функціонального ураження РБП скористаємося результатами робіт [7], в яких визначені відповідні рівні потужності, що викликають деградацію напівпровідникових приладів приймальних пристроїв при внутрішньосмуговому та позасмуговому впливах електромагнітного випромінювання.

Енергетичний поріг для досягнення ефекту деградації радіоелектронних елементів визначається часом релаксації теплових процесів, яке для напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем становить  $\tau_p \geq 10 \dots 100$  нс [8]. При виконанні умови

$\tau_n \leq \tau_p$  для посилення теплового впливу, що викликає деградацію радіоелементів, потрібні періодичні послідовності надширокопasmових (НШС) сигналів. Вираз для оцінки необхідної потужності на вході напівпровідникового приладу, що приводить до його деградації, має вигляд [9]:

$$P_{дегр} = K_n S_{p-n} / \sqrt{\tau_\Sigma}, \quad (3)$$

де  $K_n$  - постійна пошкодження, що залежить від типу напівпровідникового приладу;  $\tau_\Sigma$  - сумарний час впливу послідовності імпульсів на РЕЗ, що вражаються;  $S_{p-n}$  - площа p-n переходу в см<sup>2</sup>.

Вираз (3) дозволяє визначити сумарну потужність, необхідну для деградації елементів при впливі на неї періодичної послідовності імпульсів при внутрішньосмуговому впливі

$$P_{дегр}^{int} = P_{дегр} K_{сн} \quad (4)$$

і позасмуговому впливі

$$P_{дегр}^{ext} = P_{дегр} K_{сч}, \quad (5)$$

де  $K_{сн}$  - коефіцієнт, що враховує розбіжність ширини спектра НШС сигналу і смуги пропускання приймального тракту;  $K_{сч}$  - коефіцієнт, що враховує величину розбіжності середньої частоти спектра НШС сигналу і робочої частоти приймального пристрою РБП. У табл. 2, 3 наведено оцінки значень потужності при внутрішньосмуговому і позасмуговому впливі, достатньому для деградації радіоелектронних елементів при впливі пачки ультракоротких імпульсів тривалістю  $\tau_\Sigma = 100$  мс (НП - напівпровідникові, ІС - інтегральні, ВІС - великі інтегральні схеми) [7].

Порівняльний аналіз табл. 2 і 3 показує, що енергетично більш вигідним є режим внутрішньосмугового впливу, який називається також режимом "через вхідні двері". У разі ФП РБП саме цей режим буде мати місце, оскільки передбачається, що кожне вибуховий пристрій забезпечений антеною і налаштований на конкретну, заздалегідь невідому довжину хвилі.

Таблиця 2 - Оцінка потужності  $P_{дегр}^{int}$ , мВт

Тип НП приладу	$K_n$	$S_{p-n}$ , см <sup>2</sup>	$\tau_\Sigma$ , мс	$P_{дегр}^{int}$	
				$K_{сн} = 10$ дБ	$K_{сн} = 15$ дБ
Діоди НП, транзистори	0,1	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	$10^2$	$3 - 2 \cdot 10^2$	$10 - 5 \cdot 10^2$
Діоди НВЧ	0,01	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	$10^2$	0,3 - 20	1 - 50
ІС та ВІС	0,1	$10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$	$10^2$	0,3 - 6	1 - 20

Таблиця 3 - Оцінка потужності  $P_{дегр}^{ext}$ , мВт

Тип НП приладу	$K_n$	$S_{p-n}$ , см <sup>2</sup>	$\tau_\Sigma$ , мс	$P_{дегр}^{ext}$ , мВт	
				$K_{ен} = 30$ дБ	$K_{ен} = 40$ дБ
Діоди НП, транзистори	0,1	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	$10^2$	$3 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$
Діоди НВЧ	0,01	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	$10^2$	$3 \cdot 10^1 - 2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^4$
ІС та ВІС	0,1	$10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$	$10^2$	$3 \cdot 10^1 - 6 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^2 - 6 \cdot 10^3$

Як видно з табл. 2, максимальна потужність для внутрішньосмугового придушення, необхідна для деградації напівпровідникових діодів і транзисторів

становить величину 500 мВт. Використовуючи дані табл. 1, можна розрахувати потужність сигналу, необхідну для ФП вибухового пристрою (табл. 4).

Таблиця 4 – Потужність сигналу, достатня для нормальної роботи РБП

$f$ , МГц	$\lambda$ , м	$L$ , м	$D$	$P_{np}^{max}$ , Вт
50	6	0,6	0,2	$3,13 \cdot 10^{-3}$
100	3	0,3	0,2	$3,13 \cdot 10^{-3}$
500	0,60	0,3	1	$3,13 \cdot 10^{-3}$
1000	0,30	0,15	1	$5 \cdot 10^{-4}$
2000	0,15	0,15	2	$5 \cdot 10^{-4}$
3000	0,10	0,1	2	$5 \cdot 10^{-4}$

Для досягнення максимальної потужності 500 мВт (табл. 2), що забезпечує деградацію діодів і транзисторів, відповідна напруженість електричного поля буде мати величину: для 50 МГц -  $E = 18$  В / м; для 100 МГц -  $E = 37$  В / м; для 500 МГц -  $E = 82$  В / м; для 1000 МГц -  $E = 165$  В / м; для 2000 МГц -  $E = 217$  В / м; для 3000 МГц -  $E = 308$  В / м [9].

Виходячи з тактичних міркувань розташування НШС засобу ФП РБП в бойових порядках колони, що рухається, виберемо максимальну дальність роботи постановника перешкод  $R_{non} = 20$  м.

Для оцінки геометричних розмірів антенної системи в якості розрахункової виберемо середню частоту спектра НШС сигналу [10]:  $f_0 = 1,5$  ГГц, для якої  $E_{non}(f_0) = 180$  В/мГц. Відповідно до формули ідеального радіозв'язку (2) для направлення головного максимуму антенною системою:

$$E_{ном} = \sqrt{60P_{\Sigma}D_{ном}}/R_{ном}, \quad (6)$$

де  $P_{\Sigma}$  – пікова потужність передавача перешкод (на частоті 1,5 ГГц),  $D_{ном}$  – максимальний КНД антени НШС засоби функціонального ураження, отримаємо, що  $P_{\Sigma}D_{ном} \approx 216$  кВт.

На рис. 1 наведена залежність між коефіцієнтом посилення (КУ) антенної системи і потужністю, що підводиться, розрахована відповідно до (2) для зазначених значень напруженості електричного поля і дальності. Як показує аналіз літератури [11], на сьогоднішній день реально досяжні мегаватні рівні потужності, що генерується для мобільних установок при допустимих масогабаритних розмірах. Діаграма спрямованості (ДС) антенної системи повинна бути якомога більш вузькою (КНД високим) для зменшення впливу на сусідні радіозасоби і системи зв'язку. Разом з тим збільшення КНД пов'язано з ростом геометричних розмірів антенної системи.

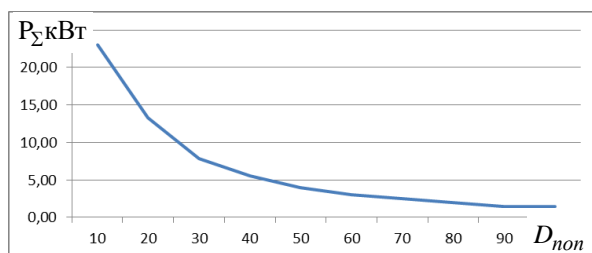


Рис. 1. Співвідношення між КНД антенної системи і потужністю, що підводиться

Необхідно враховувати, що для зменшення втрат по поляризації бажано використовувати антену з круговою поляризацією випромінюваного поля. В якості такої антени пропонується використовувати парабоїд обергання з опромінювачем у вигляді конічної спіральної антени, що збуджується НШС сигналом відеоімпульсного типу наносекундної тривалості. Припустимо, що КНД антенної системи  $D_{max} = 100$ . КУ, який визначається як  $G = D\eta$  ( $\eta$  – ККД), буде менше КНД і, в загальному випадку, залежить від електричних характеристик антенно-фідерної системи. Використовуючи співвідношення [1]:

$$D_{max} = 25000 \div 30000 / (2\Theta_{0,5P}^0 2\Phi_{0,5P}^0), \quad (7)$$

де  $2\Theta_{0,5P}^0, 2\Phi_{0,5P}^0$  - ширина ДС в кутомісцевій і азимутальній площинах відповідно в градусах, знайдемо, що для антени з голчастою ДС величина ширини діаграми спрямованості буде  $15,80^\circ$ . З огляду на те, що ширина ДС може бути оцінена як [1]

$$\Theta_{0,5P}^0 = \lambda/d, \quad (8)$$

де  $\lambda$  - середня довжина хвилі;  $d$  - діаметр апертури, знайдемо, що розмір апертури становить 0,875 м.

Для збільшення опору випромінювання необхідно збільшувати електричні розміри антенної системи, а також те, що найменша частота спектра  $f_{mer} = 100$  МГц ( $\lambda = 3$  м), остаточно виберемо діаметр дзеркальної антени  $d = 1$  м. При цьому далека зона антени складе  $R \geq 2d^2 / \lambda_{min} = 20$  м.

Відповідно до даних рис. 1 для КНД антени  $D = 100$  потужність надширококутвого засобу ФП РБП складе величину  $P_{\Sigma} = 2,2$  кВт з урахуванням втрат на трасі при поширенні уздовж поверхні Землі. При висоті антени 2 м і дальності дії  $D_{non} = 20$  м діаметр "плями", яка формується основною пелюсткою ДС НШС антени складе величину  $d_n = 24$  м. З огляду на те, що застосування іскрових генераторів має обмеження за кількістю випромінюваних сигналів (1 ÷ 3 млн спрацьовувань для бронзових і нікелевих електродів), припустимо, що використовується послідовність з 10 надширококутвих сигналів, період проходження яких складає  $T_n = 10$  мс. У підсумку сформована послідовність матиме тривалість  $\tau_{\Sigma} = 100$  мс. Таким чином, на 8 м руху колони буде використовуватися послідовність з 10 надширококутвих імпульсів, потужність кожного з яких складає  $P = 220$  Вт. Вважаючи кількість розрядів іскрового генератора Аркадьєва-Маркса рівним 1 млн., і з огляду на обмеження по потужності отримаємо, що безперервна дія НШС засобів функціонального ураження радіокерованих беспірипасів може використовуватися приблизно на 280 км шляху.

За наведених вище даних можна розрахувати величину коефіцієнта захисту (2). У припущенні, що  $P_n = 1$  Вт,  $G_n = 2$ ,  $\Delta f_{np} = 20$  кГц,  $P_{\Sigma}G_{non} = 2,16$  кВт,  $\Delta f_{non} = 3$  ГГц, отримаємо, що  $K = 0,4$ . Отримане значення є припустимим при віддаленні терориста від місця закладення РБП на 50 м.

## Висновки

Проаналізовано можливості застосування надширококузових сигналів для функціонального ураження радіокерованих боєприпасів. Показано, що найбільш перспективними НШС системами є системи дискретно-безперервної дії, які використовують суміщений смісний накопичувач енергії з використанням генераторів імпульсних напруг Аркадьєва-Маркса і узгоджену з ним антенну систему, що дозволяє випромінювати електромагнітні імпульси високої інтенсивності з напруженістю електричного поля до декількох кВ/м і тривалістю фронту близько 100 пс.

Оцінені енергетичні та просторові характеристики антенної системи засобу функціонального ураження радіокерованих боєприпасів. Встановлено, що при постановці загороджувальної НШС перешкоди на дальності у 20 м необхідно мати енергетичний потенціал величиною 220 кВт з урахуванням

втрат на поширення уздовж поверхні Землі. Для зменшення масо-габаритних розмірів передавача пропонується використовувати гостронаправлену антенну систему з КНД=100.

Запропоновано використовувати послідовність з 10 надширококузових сигналів, період проходження яких складає  $T_n = 10$  м/с. Сформована послідовність матиме тривалість  $\tau_s = 100$  мс. Показано, що при ширині пікової ДС дзеркальної антени  $8^\circ$ , при дальності дії засоби функціонального ураження радіокерованих боєприпасів 20 м ширина зони ураження, сформованої ДС антени, становить величину 16м. При використанні послідовності з 10 надширококузових імпульсів, пікова потужність кожного з яких буде  $P_{\text{пик}} = 220$  Вт і кількості розрядів іскрового генератора Аркадьєва-Маркса рівним 1 млн, отримаємо, що безперервна дія надширококузових засобів функціонального ураження радіокерованих боєприпасів розрахована на 280 км шляху.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шифрин Я.С. Антенны: Учеб. Пособие / Я.С. Шифрин. – Х.: ВИРТА, 1976. – 407 с.
2. Власик С.Н. Оценка энергетических и пространственных характеристик сверхширокополосной РТС для постановки заградительных помех / Г.В. Ермаков, С.Н. Власик // Системы обработки информации: 36. науч. пр. – Х.: ХУПС. – 2009. – Вып. 6 (80). – С. 43–48
3. Власик С.Н. Методика определения диаграммы направленности сверхширокополосной зеркальной антенны с учетом взаимного влияния облучателя и рефлектора / М.Г. Иванец, Г.В. Ермаков, В.В. Воинов, С.Н. Власик // 36. науч. пр. Хар. ун-ту Повітряних Сил. – Х.: ХУПС. – 2009. – Вып. 1 (19). – С. 39–41.
4. Хабаров В.Б. Еще раз о перспективах развития радиоуправляемых взрывных устройств и способов борьбы с ними / В.Б. Хабаров // Специальная техника. – 2004. – № 1. – С. 16–24.
5. Седышев Ю.Н. Приемные устройства радиолокационных сигналов / Ю.Н. Седышев, Л.К. Никонов, И.В. Васильев, В.И. Гапон. – М.: Воениздат, 1978. – Ч. 1. – 328 с
6. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 1972. – 464 с.
7. Сахаров К.Ю. Исследование функционирования персональных компьютеров в условиях воздействия сверхкоротких ЭМИ / К.Ю. Сахаров, О.В. Михеев, В.А. Туркин // Технологии ЭМС. – 2006. – № 2 – С. 44–49.
8. Титов С.В. Применение пространственно-фазово-частотного фокусирования плоской ФАР для функционального поражения радиотехнических средств короткими импульсами / С.В. Титов // 36. науч. пр. Харків. ун-ту Повітряних Сил. – 2003. – № 1(44). – С. 97–101.
9. Vlasik S.N. Estimation power and spatial characteristics of ultrawideband radar for statement of protecting handicaps / S.N. Vlasik, G.V. Yermakov, I.I. Zima // Матеріали 5-й науч.-техн. конф. ["Ultrawideband and Ultrashort impulse Signal"]: М-во образования и науки Украины, Сев. нац. техн. ун-т. – Севастополь: СевНТУ, 2008. – 92 с
10. Власик С.Н. Определение мощности сверхширокополосной непреднамеренной помехи на входе приемника системы связи / С.Н. Власик, Г.В. Ермаков // Системы управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НУ. – 2010. – Вып. 2 (14). – С. 44–48.
11. Магда И.И. Стендовая база для испытаний радиоэлектронной аппаратуры на электромагнитную совместимость и стойкость к излучениям сверхкороткой длительности // 3-й Межд. радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008: Сб. науч. тр. Том VI. – Х.: АНПРЭ, ХНУРЭ. – 2008. – С.7–11.

Received (Надійшла) 10.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.08.2021

## Justification of basic technical requirements for means of clearing radio-controlled ammunition

O. Iohov, V. Maliuk, Y. Kaplun

**Abstract.** The possibilities of using ultra-wideband signals for the functional destruction of radio-controlled ammunition for electronic protection of personnel of NSU subdivisions are analyzed. It is shown that the most promising are discrete-continuous systems that use a combined capacitive energy storage using Arkadyev-Marx pulse voltage generators and an antenna system matched to it, which makes it possible to emit high-intensity electromagnetic pulses. The energy and spatial characteristics of the antenna system of the means of functional destruction of radio-controlled ammunition are estimated. It is established that when setting up a barrier NSC obstacle at a distance of 20 meters, it is necessary to have an energy potential of 220 kW, taking into account the loss of propagation along the Earth's surface. To reduce the mass and dimensions of the transmitter, it is proposed to use a pointed antenna system. It is proposed to use a sequence of 10 ultra-wideband signals, the period of passage of which is  $T_n = 10$  m / s. The generated sequence will have a duration  $\tau_s = 100$ . It is shown that at the width of the peak DS of the mirror antenna  $8^\circ$ , at the range of the means of functional destruction of radio-controlled ammunition 20 meters, the width of the damage zone formed by the antenna pattern is 16 meters.

**Keywords:** anti-terrorist operation, radio-controlled ammunition, functional damage to radio equipment.