

УДК 533.9

О.М. Єгоров<sup>1</sup>, Б.М. Гавриленко<sup>2</sup>, М.В. Грушенко<sup>2</sup>, В.В. Жук<sup>1</sup>, В.І. Карась<sup>1</sup>,  
Ю.Ф. Лонін<sup>1</sup>, В.І. Чумаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України

<sup>2</sup>Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

## ПУЧКОВІ ГЕНЕРАТОРИ ІМПУЛЬСНОГО НАДШИРОКОСМУГОВОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Проведено дослідження генерації надширокопasmових (НШС) імпульсних сигналів при збудженні ізольованої конічної спіральної антени короткоімпульсним сильнотрумовим релятивістським електронним пучком без його попередньої модуляції. Експериментальні дослідження генерації потужних НШС-електромагнітних імпульсів шляхом прямого збудження ізольованої конічної спіральної антени імпульсним РЕП були виконані на сильнотрумовому прискорювачі "Темп-А".

*сильнотрумовий релятивістський електронний пучок, надширокопasmове електромагнітне випромінювання, конічна спіральна антена, сильнотрумовий прискорювач, модуляція*

### Вступ

**Постановка проблеми.** Генерація та приймання несинусоїдальних НШС імпульсних сигналів - актуальна проблема, тому що вони знаходять широке застосування у сучасних системах радіолокації та радіозв'язку, можуть використовуватись для підземного зондування, вивчення дії потужних НШС електромагнітних імпульсів на різні об'єкти природного і штучного походження та для ряду інших застосувань [1 – 7]. Нами проведено дослідження генерації НШС імпульсних сигналів при збудженні ізольованої конічної спіральної антени короткоімпульсним сильнотрумовим релятивістським електронним пучком (СРЕП) без його попередньої модуляції.

### Основна частина

З цією метою було проведено теоретичний розрахунок та числовий аналіз спіральної антени, вхід якої був узгоджений з параметрами СРЕП прискорювача "Темп-А", а вихід з вільним простором. Смуга частот, котру здатна випромінювати така антена лежить у межах від 0,5 ГГц до 10 ГГц, тобто ( $\lambda_{\min} = 60\text{см}$ , а  $\lambda_{\max} = 3\text{см}$ ). Приймальна антена була аналогічною випромінювальній. Основні параметри спіральної антени мали такі величини:

$2a_{\min} = 0,2 \cdot \lambda_{\min}$  та  $2a_{\max} = 0,4 \cdot \lambda_{\max}$  – малий та великий радіуси антени,

$\Theta = 20^\circ$  – кут розкриття,  $(\alpha) = 18^\circ$  – кут намотки спіралі,

де  $\lambda_{\min}$  та  $\lambda_{\max}$  – мінімальна та максимальна довжини хвиль випромінювання.

Форма та конструкція ізольованої однозахідної конічної спіральної антени прямої хвилі показана на рис. 1.

Еквівалентну схему спіральної антени представимо у вигляді паралельного контура, що збуджу-

ється джерелом струму  $I(t)$  (рис. 2). Тут позначено:  $L$  – індуктивність антени,  $C$  – ємність антени,  $G_k = R_n / LC = (\rho Q)^{-1}$  – резонансна провідність, яка виражена через параметри контуру.

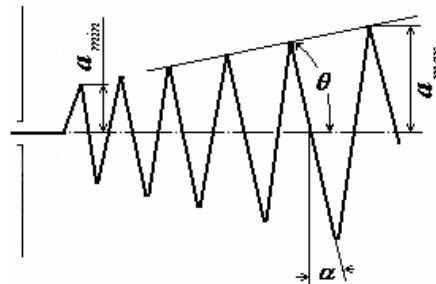


Рис. 1. Геометрія спіральної антени

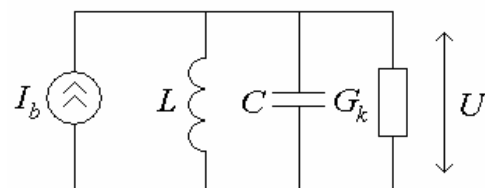


Рис. 2. Еквівалентна схема антени у вигляді паралельного контуру

У відповідності до [8, 9] опір витрат можна порівняти опору випромінювання  $R_n = R_\Sigma$ ; відносний діапазон частот, в якому спіральна антена прямої хвилі характеризується приблизною сталістю вхідного опору, складає  $f_v/f_n = 3$ . При цьому еквівалентна добротність контуру буде дорівнювати

$$Q = 2 \frac{f_e - f_H}{f_e + f_H} = 1. \quad (1)$$

Напруга на контурі визначається виразом [8]

$$u(t) = \int_0^t i'(t-x)h(x)dx, \quad (2)$$

де  $i'(t)$  – похідна функції струму електронного пучка, який збуджує антену;  $h(t)$  – перехідна характеристика контура, котра з урахуванням (1) може бути представлена як

$$h(t) = \rho \cdot \exp\left(-\frac{\pi t}{T}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{3}\pi \frac{t}{T}\right), \quad (3)$$

де  $\rho = T/(\sqrt{3}\pi C)$  – характеристичний опір контуру,  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ .

Розглянемо деякі випадки:

1. Нехай струм збудження характеризується функцією з лінійно зростаючим фронтом тривалістю  $\tau_f$ :

$$i(t) = \begin{cases} I_0 t / \tau_f, & 0 \leq t \leq \tau_f; \\ I_0, & t \geq \tau_f. \end{cases} \quad (4)$$

Тоді напруга на контурі складає

$$\begin{aligned} u(t) = & A \cdot \left\{ \sqrt{3} - \exp\left(-\frac{\pi t}{T}\right) \cdot \left[ \sin\left(\sqrt{3}\pi \frac{t}{T}\right) \right] \right\} - \\ & - A \left\{ \sqrt{3} - \exp\left(-\frac{\pi(t-t_f)}{T}\right) \sin\left(\sqrt{3}\pi \frac{t-t_f}{T}\right) \right\} \theta(t-t_f) - \\ & - A \left\{ \sqrt{3} - \exp\left(-\frac{\pi(t-t_f)}{T}\right) \sqrt{3} \sin\left(\sqrt{3}\pi \frac{t-t_f}{T}\right) \right\} \theta(t-t_f) + \\ & + A \left\{ \sqrt{3} - \exp\left(-\frac{\pi t}{T}\right) \cdot \left[ \sqrt{3} \cdot \cos\left(\sqrt{3}\pi \frac{t}{T}\right) \right] \right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

де  $A = I_0 \rho T / (4\pi \tau_f)$ ;  $\theta(t)$  – одинична функція Хевісайда.

Графіки, які отримані за результатами розрахунків (5), наведені на рис. 3.

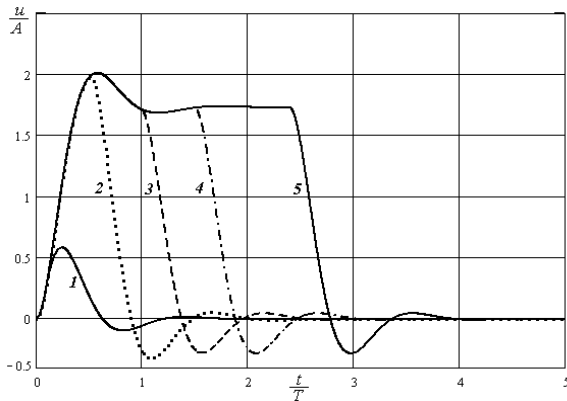


Рис. 3. Напруга на контурі при збудженні антени струмом з лінійно зростаючим фронтом: 1 –  $\tau/T = 0,1$ ; 2 –  $\tau/T = 0,5$ ; 3 –  $\tau/T = 1,0$ ; 4 –  $\tau/T = 1,5$ ; 5 –  $\tau/T = 2,5$

2). Для струму збудження з гаусовим зростанням переднього фронту

$$i(t) = I_0 \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(x-3\sigma)^2}{2\sigma^2}\right) dx \right), \quad (6)$$

де  $\sigma^2$  – дисперсія гаусового розподілу;

Часові залежності напруги на контурі отримуємо за допомогою (2) підстановкою в цей вираз фо-

рмул (3) або (6). Результати розрахунків для гаусового профілю струму наведені на графіках рис. 4.

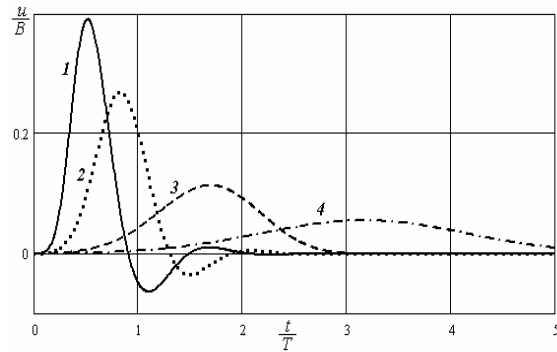


Рис. 4. Залежності напруги від часу: 1 –  $\tau/T = 0,1$ ; 2 –  $\tau/T = 0,5$ ; 3 –  $\tau/T = 1,0$ ; 4 –  $\tau/T = 1,5$ ; 5 –  $\tau/T = 2,5$

Експериментальні дослідження генерації потужних НШС-електромагнітних імпульсів шляхом прямого збудження ізольованої конічної спіральної антени імпульсним РЕП були виконані на сильнотривовому прискорювачі "Темп-А" подібно [10].

Збудження ізольованої конічної спіральної антени відбувається електронним пучком, що сформований у катод-анодному проміжку прискорювача (поз. 1-2, рис. 5), та який приходить на колектор (3), котрий зв'язано з випромінюючою конічною спіральною антеною (5).

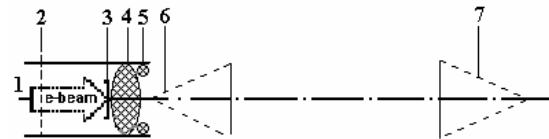


Рис. 5. Схема проведення експерименту: 1 – катод; 2 – анод; 3 – колектор; 4, 5 – ізолятори; 6 – випромінююча антена; 7 – приймальна антена

Форма сигналу напруги, що знімається з подільовача напруги на випромінюючій антені приведена на рис. 6. Слід відмітити, що часовий розподіл напруги практично точно передає форму струму пучка та знаходиться в узгодженні з розрахунковими (рис. 4, крива 1). Типові параметри пучка при цьому такі:  $E_b \sim 0,7 \div 0,8$  МэВ,  $I_b \sim 7$  кА, тривалість пучка  $\sim 15$  нс за величини переднього фронту  $\sim 1 \div 2$  нс.

## Висновки

Проведено теоретичний розрахунок та числовий аналіз спіральної антени, вхід якої був узгоджений з параметрами СРЕП прискорювача "Темп-А", а вихід з вільним простором. Експериментальні дослідження генерації потужних НШС-електромагнітних імпульсів шляхом прямого збудження ізольованої конічної спіральної антени імпульсним РЕП без попередньої модуляції виконані на сильнотривовому прискорювачі "Темп-А".

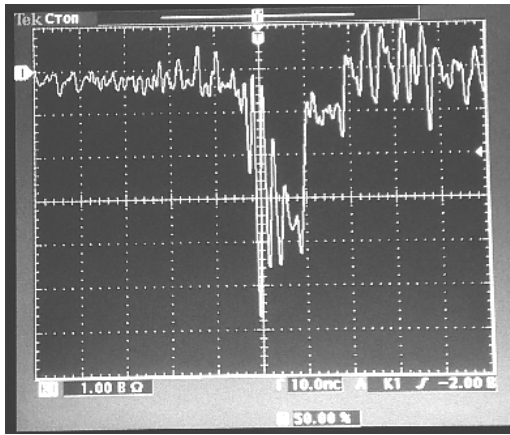


Рис. 6. Осцилограма напруги на випромінюючій спіральній антені

Для параметрів пучка:  $E_b \sim 0,7 \div 0,8$  МэВ,  $I_b \sim 7$  кА, тривалість пучка  $\sim 15$  нс за величини переднього фронту  $\sim 1 \div 2$  нс часовий розподіл напруги на випромінюючій спіральній антені практично точно передає форму струму пучка та знаходиться в узгодженні з розрахунковими залежностями.

### Список літератури

1. Harmut H.F. *Nonsinusoidal Wave for Radar and Radio Communications*. – New York/Lodon/Toronto/Sydney/San-Francisco: Academic Press, 1981.

2. Sulakshin A.S. // *JTF*. – 1983. – V. 53, № 11. – P. 56-67.
3. Didenko A.N., Yushkov Yu.G. *Powerful microwaves impulses nanosecond of duration*. – Moscow. Energoatomizdat, 1984, 112 p. (Russian).
4. Gadetskij N.P., Magda I.I., Naisteter S.I., Prokopenko Yu.V. and Chumakov V.I. // *Plasma Phys. Rep.* – 1993. – V. 19. – P. 273-278.
5. Friedman M., Krall J., Lau J.J., Serlin V. // *Rev. Sc. Instr.* – 1990. – V. 61, № 1. – P. 171-176.
6. Grachov K.P. et al. // *Radio engineering and electronics*. – 1994. – No. 12. – P. 2044-2049. (Russian).
7. Gilman Charles, Lam S.K., Naff J.T., Klatt M., Nielsen K. // *12-th IEEE International Pulsed Power Conference, Monterey, California, 1999*. – V. 2. – P. 1437-1439.
8. Юрьев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. *Спиральные антенны*. – М.: Сов. радио, 1974. – 224 с.
9. Зернов Н.В., Карпов В.Г. *Теория радиотехнических цепей*. – Л.: Энергия, 1972. – 816 с.
10. Garonenko N.I., Gorban` A.M., Gorozhanin D.V., Kurilko V.I., Latinskii S.M., Lonin Yu.F., and Kharchenko I.F. *Formation and Emission of Intense Electromagnetic Pulses by Means of an Insulated Rod Antenna Excited by a Short-Duration High-Current Relativistic Electron Beam*. // *Plas. Phys. Rep.* – 2000. – V. 26, No 4. – P.360-362.

Надійшла до редколегії 2.03.2007

**Рецензент:** д-р фіз.-мат. наук, проф. Є.О. Корнілов, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків.