

ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ РАДІОАСТРОНОМІЇ, РАДІОФІЗИКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra26.04.358>

УДК 621.391.82, 629.396.966

Л. Ф. ЧОРНОГОР

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

ФУНКЦІОНАЛЬНЕ УРАЖЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

Предмет і мета роботи: Найважливішою проблемою держави є захист систем управління країною, збройними силами, об'єктами підвищеної небезпеки (атомними електростанціями, великими хімічними виробництвами, аеропортами тощо). При цьому слід враховувати, що засоби нападу можуть бути розміщені на балістичних і крилатих ракетах, літаках і дронах, висота польоту яких варіює від ≈ 300 км до ≈ 10 м. Будь-який засіб нападу містить складне радіоелектронне обладнання, яке складається з чутливих до електромагнітних полів радіоелементів. Починаючи з 1980-х рр. розвивається новий науково-технічний напрям, який отримав назву “функціональне ураження радіоелектронних систем”. У його основі лежить створення потужних засобів електромагнітного випромінювання з енергетичними можливостями виведення з ладу радіоелектронних систем на значних відстанях (від ~ 100 м до ~ 1000 км). Мета роботи – аналіз можливостей функціонального ураження радіоелектронних систем з урахуванням тенденцій, які спостерігаються в радіоелектронних технологіях.

Методи і методологія: Проаналізовано можливість функціонального ураження радіоелектронних систем з урахуванням сучасних тенденцій розвитку потужних засобів генерації електромагнітної енергії в НВЧ і більш короткохвильовому діапазоні, мініатюризації та інтеграції радіоелектронних елементів. Побудовано регресію для залежності критичної енергії від часу. Встановлено, що впродовж десятиліть спостерігається тенденція до зменшення критичної енергії, за якої відбувається пошкодження радіоелементів. Це пов'язано з подальшою мініатюризацією та інтеграцією мікросхем згідно закону Мура, який справедливий і понині. Для низки виробів значення критичної енергії знаходиться в межах $10^{-11} \div 10^{-10}$ Дж. Водночас спостерігається й зворотна тенденція щодо посилення захисту радіоелектронних систем від можливості функціонального ураження. При цьому критична енергія складає $10^{-7} \div 10^{-6}$ Дж і більше. Із отриманого різновиду основного рівняння функціонального ураження радіоелектронних систем оцінена максимальна відстань, на якій можливе ураження за енергетичних потенціалів існуючих радіокомплексів. Для стаціонарних комплексів ця відстань може досягати сотень кілометрів. Для мобільних засобів вона становить до $10 \div 100$ км. Обґрунтовано доцільність поєднання в одному радіокомплексі функцій виявлення й ідентифікації цілі та її ураження. Перехід від першого режиму до другого здійснюється на менших відстанях зі збільшенням на 2–3 порядки енергії імпульсів.

Результати: Отримано рівняння регресії для залежності критичної енергії функціонального ураження радіоелектронних систем від поточного часу. Підтверджено її незмінне спадання. Така поведінка тісно пов'язана із законом Мура, який характеризує ступінь мініатюризації та інтеграції радіоелектронних пристроїв. Прогнозується, що для низки пристроїв критична енергія може бути меншою ніж $10^{-11} \div 10^{-10}$ Дж. Отримано різновид основного рівняння функціонального ураження радіоелектронних систем. Показано, що максимальна відстань ураження сучасних радіокомплексів може досягати багатьох сотень кілометрів. Для рухомих засобів ця відстань складає $10 \div 100$ км. Обґрунтовано, що функції виявлення, супроводження й ідентифікації цілі, а також її ураження доцільно поєднати в одному радіокомплексі. Для ураження на певній відстані слід збільшити енергію імпульсу в $10^2 \div 10^3$ разів.

Висновок: Маємо всі науково-технічні передумови, необхідні для створення ефективного радіокомплексу функціонального ураження радіоелектронних систем і захисту державних систем управління, систем управління збройними силами й об'єктами підвищеної небезпеки.

Ключові слова: функціональне ураження, радіоелектронні системи, критична енергія, закон Мура, рівняння функціонального ураження, рівняння радіолокації, дальність виявлення й ураження

1. Вступ

Найважливішою проблемою держави є захист систем управління країною, збройними силами, об'єктами підвищеної небезпеки (атомними електростанціями, великими хімічними виробництвами, аеропортами тощо). Необхідність захисту існує як у мирний час, так і в особливий період [1, 2]. При цьому слід враховувати, що засоби нападу можуть бути розміщені на балістичних і крилатих ракетах, літаках і дронах, висота польоту яких варіює від ≈ 300 км до ≈ 10 м.

Будь-який засіб нападу містить в собі складне радіоелектронне обладнання, яке складається з чутливих до електромагнітних полів радіоелементів.

Починаючи з 1980-х рр. розвивається новий науково-технічний напрям, який отримав назву “функціональне ураження (ФУ) радіоелектронних систем (РЕС)” [3]. У його основі лежить створення потужних засобів електромагнітного випромінювання з енергетичними можливостями повного виведення з ладу РЕС на значних відстанях (від ~ 10 м до ~ 1000 км). Тимчасове виведення з ладу РЕС відносять до “функціонального придушення”. Для ФУ потрібен енергопотенціал на 1–2 порядки більший, ніж для функціонального придушення.

ФУ РЕС у порівнянні з традиційними засобами істотно розширює коло розв'язуваних задач. За допомогою цього методу вдається вивести з ладу РЕС, що не випромінюють у простір, а також радіоелементи, що входять до системи управління різного призначення. ФУ РЕС може бути ефективним для придушення систем з високим ступенем захищеності. Для ФУ РЕС не потрібні жорсткі вимоги щодо апріорного знання параметрів придушеної РЕС. При ФУ РЕС відсутні руйнування, супроводжувані вибухами.

З кінця 1980-х рр. обговорюється проблема, що є ефективнішим – ударна хвиля від вибуху чи гігаватні електромагнітні імпульси [4, 5]. Вплив потужних електромагнітних імпульсів має дві найважливіші відмінності від впливу вибухів. По-перше, енергія протидії (руйнування) доставляється практично миттєво, точніше, зі швидкістю світла в повітрі. По-друге, електромагнітний вплив не є летальним, він не руйнує будівлі та споруди.

Проблемі ФУ РЕС та пов'язаним з нею питанням присвячено величезну кількість наукових праць. У роботах [6–16] розглянуті загальні пи-

тання радіоелектронної боротьби. Можливості функціонального придушення і ФУ РЕС обговорюються в [3, 6, 12–14, 17–30]. У роботах [31–38] описано вплив потужних електромагнітних імпульсів на радіоелектронні пристрої, а в [39] – на комп'ютери.

У роботах [40, 41] представлено результати дослідження проблем НВЧ енергетики.

Можливості генерації надпотужних радіоімпульсів описано в [42–54].

Мета цієї роботи – аналіз можливостей ФУ РЕС з огляду на тенденції, що спостерігаються в радіоелектронних технологіях. До таких тенденцій належать:

- подальше зростання імпульсної потужності генераторів (від $1 \div 10$ ГВт аж до $1 \div 10$ ТВт);
- подальше зростання мініатюризації й інтеграції радіоелектронних елементів і пов'язане з цим зростання вразливості РЕС;
- застосування надширококутових надкоротких (1 пс \div 1 нс) імпульсів без носійної;
- застосування надкоротких (менш 1 нс) радіоімпульсів, котрі перестроюються за частотою в широких межах (у діапазоні частот $f > 1$ ГГц).

2. Рівняння функціонального ураження

За імпульсної потужності генератора P , коефіцієнта підсилення передавальної антени G на відстані R від цілі густина потоку потужності

$$\Pi_t = \frac{PG}{4\pi R^2 L_{af} L_p}, \quad (1)$$

де L_{af} і L_p – втрати в антенно-хвильоводному тракті та при поширенні електромагнітної енергії в атмосфері відповідно. З площею S_t впливу (площею проникнення, тобто площею рознімачів, площею щілин, ефективною площею антени приймача цілі тощо) потужність становить

$$P_t = \Pi_t S_t,$$

та впливаюча енергія –

$$E_t = P_t \tau, \quad (2)$$

де τ – тривалість впливу.

ФУ настає при

$$E_t = k_t E_{cr}, \quad (3)$$

де E_{cr} – критична енергія, за якої відбувається пошкодження радіоелементів; k_t – запас міцності. З (1)–(3) випливає рівняння для максимальної дальності ФУ (основне рівняння ФУ):

$$R = \sqrt{\frac{P\tau GS_t}{4\pi L_{af} L_p k_t E_{cr}}} = \sqrt{\frac{EGS_t}{4\pi L_{af} L_p k_t E_{cr}}} = \sqrt{\frac{EG}{4\pi L_{af} L_p k_t \varepsilon_{cr}}} \quad (4)$$

Тут $E = P\tau$ – енергія імпульсу, $\varepsilon_{cr} = E_{cr}/S_t$ – питома критична енергія. Врахуємо, що

$$G = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \eta, \quad (5)$$

де S – геометрична площа передавальної антени, λ – довжина хвилі, η – коефіцієнт використання антени. Тоді з (4) і (5) маємо:

$$R = \sqrt{\frac{P\tau SS_t \eta}{\lambda^2 L_{af} L_p k_t E_{cr}}} = \sqrt{\frac{ESS_t \eta}{\lambda^2 L_{af} L_p k_t E_{cr}}} = \sqrt{\frac{ES\eta}{\lambda^2 L_{af} L_p k_t \varepsilon_{cr}}} \quad (6)$$

З (4) і (6) випливає, що $R \sim (P\tau SS_t)^{1/2} \sim (ESS_t)^{1/2}$, а також, що $R \sim \lambda^{-1} E_{cr}^{-1/2} \sim \lambda^{-1} \varepsilon_{cr}^{-1/2}$.

3. Критична енергія

Значення критичної енергії ФУ істотно змінювалося в часі (див. рис. 1). У 1950–1960-і рр. значення E_{cr} різко зменшилося від $\sim 10^{-2}$ до 10^{-7} Дж. Це було пов'язано з переходом від електровакуумних приладів до напівпровідникових. Подальше зменшення E_{cr} обумовлене мініатюризацією радіоелементів, зростанням щільності радіоелементів на одиниці площі, а значить – зі зменшенням можливості відведення тепла.

Як відомо (див., наприклад, [55]), число транзисторів на 1 см^2 з 1970 р. збільшується за законом Мура, який можна апроксимувати наступною залежністю:

$$N = N_0 \cdot 2^{(t-1970)/t_0}, \quad t_0 \approx (2 \pm 0.5) \text{ років},$$

де $N_0 = N(1970) \approx 3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$. У 2020 р. $N \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Ця оцінка добре узгоджується

з даними для виробів, які розробляються різними фірмами. За цими даними у 2020 р. $N \approx (1 \div 5) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ [55].

Характерний розмір одного елемента $l \approx 1/N^{1/2}$ за 50 років зменшився в тисячі разів. За даними [55] в 1970 р. $l \approx 2 \cdot 10^4 \text{ нм}$, а в 2020 р. – $l \approx 9 \text{ нм}$, що підтверджує тривалу тенденцію до мініатюризації виробів та надінтеграцію пристроїв.

Нові технології обговорюються, наприклад, у роботі [56].

Наведемо приклади різних значень E_{cr} . За даними [3] при $E_{cr} \approx 0.1 \div 1 \text{ мкДж}$ і $\tau \geq 10 \text{ нс}$ відбувається вигорання напівпровідникових приладів, які використовуються в діапазоні частот $f = 1 \div 10 \text{ ГГц}$. При $f > 10 \text{ ГГц}$ значення E_{cr} зменшуються ще на порядок, тобто до $0.01 \div 0.1 \text{ мкДж}$.

За даними [5] для вигорання змішувальних діодів досить потужності $1 \div 35 \text{ Вт}$ з $\tau = 1 \div 10 \text{ нс}$, при цьому $E_{cr} \sim 10^{-9} \text{ Дж}$.

Важливо зазначити, що із впливом не поодиноким імпульсом, а послідовністю імпульсів з частотою повторення $1 \div 100 \text{ Гц}$ значення E_{cr} при ФУ РЕС зменшується в $1 \div 100$ разів, тобто до $1 \text{ нДж} \div 0.1 \text{ мкДж}$ [3].

З урахуванням тенденції до мініатюризації та надінтеграції E_{cr} може досягти значень $0.01 \div 0.1 \text{ нДж}$ (див. рис. 1).

З іншого боку, атакуюча сторона докладає зусиль для захисту РЕС від ФУ. Це враховує в співвідношеннях (4) і (6) коефіцієнт k_t , який може змінюватися від 1 до 10^5 .

Вважаючи, що $E_{cr} \approx 10^{-8} \div 10^{-12} \text{ Дж}$, а $S_t \approx 10^{-4} \div 10^{-2} \text{ м}^2$, отримаємо $\varepsilon_{cr} \approx 10^{-10} \div 10^{-4} \text{ Дж/м}^2$.

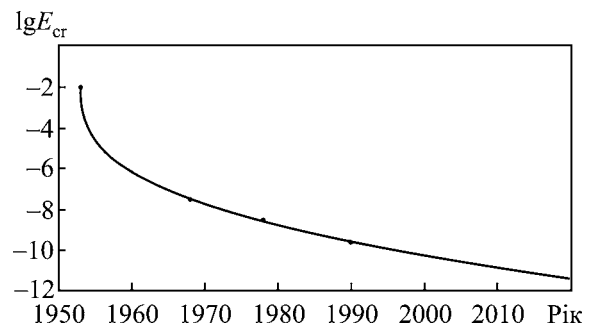


Рис. 1. Залежність критичної енергії (в джоулях) від часу. Дані експериментів запозичені з роботи [9]. Рівняння регресії має вигляд: $\lg E_{cr} = -2.06(t-1953)^{-0.36} - 2$, коефіцієнт достовірності $R^2 = 0.9998$, $\sigma = 0.06$

4. Система функціонального ураження

Основні складові системи ФУ такі: потужний генератор, передавальна антена, накопичувач енергії, джерело енергії, швидкодіючі засоби комутації, а також система цілевказання (радар). Розглянемо ці складові докладніше.

4.1. Потужні генератори

Наведемо співвідношення, які дозволяють оцінити граничну потужність генераторів [9]. Для традиційних електровакуумних приладів

$$P_1 \approx 10^7 \lambda^2, \quad (7)$$

для релятивістських імпульсних НВЧ генераторів при одномодовому та багатомодовому режимах відповідно

$$P_2 \approx 10^9 \lambda^2, \quad P_3 \approx 3 \cdot 10^{11} \lambda^2. \quad (8)$$

У співвідношеннях (7) і (8) значення потужності надаються у ватах, а довжини хвилі – в сантиметрах. Результати оцінок P_1 , P_2 і P_3 наведено в табл. 1.

Кращі генератори забезпечують потік потужності ~ 1 ГВт/см² [53]. При цьому доводиться мати справу з напругою $1 \div 10$ МВ і силою струму $10 \div 100$ кА.

Як потужні генератори можуть використовуватися лінійні індукційні прискорювачі електронів, релятивістські клістри, магнетрони, лампи зворотної хвилі, релятивістські НВЧ генератори різних типів і НВЧ генератори з віртуальним катодом (віркатори).

Для ФУ РЕС становлять інтерес останні два типи. Дані про віркатори та релятивістські магнетрони наведено в табл. 2 [3].

З табл. 2 видно, що максимально досягнута потужність для віркатора становить 4 ГВт, а для релятивістського магнетрона – 6.9 ГВт. З огляду на тенденції розвитку цих приладів можна вважати, що ця потужність складає щонайменш 10 ГВт. З тривалістю імпульсу $10 \div 100$ нс маємо $E \approx 10^2 \div 10^3$ Дж.

Параметри віркаторів наведені також в табл. 3 [6, 21].

На особливу увагу заслуговують прилади тераватної потужності [53].

Таблиця 1. Залежність граничної потужності генераторів від довжини хвилі

| λ , см | 0.3 | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 |
|----------------|-------------------|---------------------|-----------|------------------|------------------|------------------|----------------|
| P_1 , ГВт | $9 \cdot 10^{-4}$ | $2.5 \cdot 10^{-3}$ | 10^{-2} | 0.04 | 0.09 | 0.25 | 1 |
| P_2 , ГВт | 0.09 | 0.25 | 1 | 4 | 9 | 25 | 10^2 |
| P_3 , ГВт | 27 | 75 | 300 | $1.2 \cdot 10^3$ | $2.7 \cdot 10^3$ | $7.5 \cdot 10^3$ | $3 \cdot 10^4$ |

Таблиця 2. Параметри надпотужних НВЧ генераторів

| Тип приладу | Потужність, ГВт | Частота, ГГц | Тривалість імпульсу, нс | Частота повторення, Гц | ККД, % |
|---------------------------|-----------------|---------------|-------------------------|------------------------|--------------|
| Віркатор | 1 | $8 \div 12$ | – | моноімпульс | 1 |
| Віркатор | 0.35 | $8 \div 12$ | 30 | моноімпульс | 0.6 |
| Віркатор | 1.4 | 3.9 | 40 | моноімпульс | 2 |
| Віркатор | 4.0 | 6.5 | 40 | моноімпульс | 3.3 |
| Віркатор | 4 | $1 \div 10.6$ | 180 | моноімпульс | 1 |
| Релятивістський магнетрон | 6.9 | 4.5 | $20 \div 40$ | – | $10 \div 35$ |
| Релятивістський магнетрон | 3.2 | 2.8 | 20 | – | 11 |
| Релятивістський магнетрон | $0.5 \div 0.7$ | $3 \div 5$ | 50 | 10 | $3 \div 15$ |
| Релятивістський магнетрон | 0.5 | 1 | 50 | 100 | – |

Таблиця 3. Характеристики віркаторів [6, 21]

| Тип віркатора | Потужність, ГВт | Частота, ГГц | Тривалість, нс | Метод переналаштування частоти |
|--|-----------------|--------------|----------------|--|
| Планарний тріод з віртуальним катодом | 1.1 | 2.9 | 100 | Зміною робочої напруги або зазору катод–анод |
| | 0.45 | 2.8 | 1100 | |
| Коаксіальний тріод з віртуальним катодом | 0.2 | 2.9 | 70 | Зміною робочої напруги |
| Віркатор на циклотронному резонансі | 1.5 | 3.1 | 30 | Зміною керуючого магнітного поля |
| | 0.9 | 5.4 | 30 | |
| Редітрон | 0.25 | 16.0 | 50 | Зміною керуючого магнітного поля |
| Турботрон | 0.2 | 40.0 | 40 | Зміною зазору катод–анод |

4.2. Антени

Для ФУ РЕС доцільно застосовувати фазовані антенні решітки, які забезпечують електронне сканування простору. Для стаціонарних комплексів ФУ розмір антени d може становити $10 \div 100$ м, а для мобільних засобів $d \approx 1 \div 3$ м. Коефіцієнт підсилення антени надається співвідношенням (5). Ширина діаграми спрямованості антени

$$\alpha \approx \lambda/d.$$

Результати оцінок G і d при $\lambda = 3$ см та $\eta = 0.6$ наведено в табл. 4.

З табл. 4 видно, що для мобільного комплексу $G \approx 10^4 \div 10^5$, $\alpha \approx (3 \div 1) \cdot 10^{-2}$ рад, а для стаціонарного засобу $G \approx 10^6 \div 10^8$, $\alpha \approx 3 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-4}$ рад.

4.3. Накопичувачі енергії

Для збільшення дальності ФУ потрібно збільшувати енергію імпульсів. Для цього використовують накопичувачі енергії. Розрізняють ємнісні й індуктивні накопичувачі. Ємнісні накопичувачі дозволяють генерувати імпульси з напругою $10^5 \div 10^6$ В [20, 53]. При цьому густина електромагнітної енергії $\epsilon_e \approx 10^6 \div 10^7$ Дж/м³. У разі індуктивного накопичувача $\epsilon_e \approx 4 \cdot 10^8$ Дж/м³ [3, 20].

Таблиця 4. Основні параметри антени

| | | | | | | | |
|----------------------|-------------------|------------------|-------------------|---------------------|------------------|-------------------|---------------------|
| d , м | 1 | 3 | 6 | 9 | 30 | 60 | 90 |
| S , м ² | 1 | 9 | 36 | 81 | $9 \cdot 10^2$ | $3.6 \cdot 10^3$ | $8.1 \cdot 10^3$ |
| G | $8.4 \cdot 10^3$ | $7.5 \cdot 10^4$ | $3 \cdot 10^5$ | $6.8 \cdot 10^5$ | $7.5 \cdot 10^6$ | $3 \cdot 10^7$ | $6.8 \cdot 10^7$ |
| α , рад | $3 \cdot 10^{-2}$ | 10^{-2} | $5 \cdot 10^{-3}$ | $3.3 \cdot 10^{-3}$ | 10^{-3} | $5 \cdot 10^{-4}$ | $3.3 \cdot 10^{-4}$ |

Це означає, що індуктивні накопичувачі мають розмір на 1–2 порядки менше, ніж ємнісні. Вони кращі в мобільних (і не лише мобільних) засобах ФУ РЕС.

У комплексах ФУ РЕС високі вимоги ставляться також до швидкодіючих засобів комутації. Особливо це стосується приладів пікосекундної електроніки надвеликих потужностей [53].

4.4. Радари

Для виявлення, супроводу та ідентифікації цілі потрібна наявність радара. При цьому максимальна дальність дії радара R_r має бути суттєво більшою за максимальну дальність ФУ. Основне рівняння радіолокації можна надати таким чином:

$$R_r = \sqrt[4]{\frac{P_r G_r S_r \sigma}{(4\pi)^2 q P_n L_{af} L_p}} = \sqrt[4]{\frac{P_r G_r^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 q P_n L_{af} L_p \eta}} = \sqrt[4]{\frac{E_r G_r^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 q k_B T_n L_{af} L_p \eta}}, \quad (9)$$

де P_r , G_r , S_r і E_r – відповідно імпульсна потужність, коефіцієнт підсилення антени, геометрична площа антени й енергія імпульсу радара; σ – ефективна площа розсіяння цілі; q – відношення сигнал/шум; $P_n = k_B T_n \tau^{-1}$ – потужність шуму в смузі частот $\Delta f \approx \tau^{-1}$, k_B – стала Больцма-

на, T_n – температура шуму. З (9) випливає, що $R_r \sim P^{1/4} G_r^{1/2} \lambda^{1/2} \sigma^{1/4} / (qP_n)^{1/4}$. Зокрема, $R_r \sim d$.

5. Результати розрахунків

Приклад результатів розрахунків максимальної дальності ФУ РЕС для різних значень E і ϵ_{cr} наведено в табл. 5. Припускалося, що для стаціонарного комплексу $d=9$ м, $\lambda=3$ см, $L_{af}=1.4$, $L_p=1.4$, $\eta=0.6$ і $k_t=1$. З табл. 5 видно, що для добре захищених РЕС (тобто при $\epsilon_{cr} \approx 10^{-4}$ Дж/м²) ФУ фактично неможливе, оскільки $R \approx 19 \div 600$ м. Лише за $E \approx 1$ кДж максимальна дальність ФУ $R \approx 600$ м. Для незахищених РЕС (тобто за $\epsilon_{cr} \leq 10^{-7}$ Дж/м²) значення $R \approx 0.6 \div 600$ км.

Приклад результатів розрахунків максимальної дальності виявлення цілі радаром для різних значень E і σ наведено в табл. 6. У розрахунках вважалось, що $d=9$ м, $\lambda=3$ см, $L_{af}=1.4$, $L_p=1.4$, $q=10$, $T_n=100$ К і $\eta=0.6$. З табл. 6 випливає, що навіть при $\sigma \approx 0.01$ м² (малопомітна ціль) $R_r \approx 600 \div 3600$ км. Зі збільшенням σ до 5 м² R_r збільшується до $(3 \div 16.8) \cdot 10^3$ км. Це означає, що для розв'язання практичних задач виявлення ці-

лей достатньо енергії $E \approx 0.1 \div 1$ Дж. Ця умова реалізується, наприклад, при $P=0.1 \div 1$ ГВт і $\tau=1$ нс або $P=10 \div 100$ кВт і $\tau=10$ мкс.

Раціонально поєднати можливості комплексу ФУ РЕС і радара. Після виявлення й ідентифікації цілі слід збільшити енергію імпульсу від 0.1 ÷ 1 Дж до 100 ÷ 1000 Дж.

Для рухомих комплексів ФУ РЕС розмір фазованої антенної решітки можна істотно зменшити, наприклад, до $d=3$ м. За такої умови R і R_r зменшаться порівняно зі значеннями в табл. 4 і 5 утричі. Важливо, що R і $R_r \sim d$.

Зауважимо, що виявлення цілі та ФУ можливе лише в межах прямої видимості. На відкритій місцевості відстань R_r визначається двома складовими:

$$R_1 \approx \sqrt{2R_E z_a}, \quad R_2 \approx \sqrt{2R_E z_{min}}$$

Тут z_a – висота розташування антени; $R_E \approx 6400$ км – радіус Землі; z_{min} – мінімальна висота, на якій може бути виявлено ціль. Наприклад, при $z_a=5$ м маємо $R_1 \approx 8$ км.

Таблиця 5. Максимальна дальність функціонального ураження (кілометри) для стаціонарного комплексу

| E, Дж | $\epsilon_{cr}, \text{ Дж/м}^2$ | | | | | | |
|-------|---------------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 10^{-10} | 10^{-9} | 10^{-8} | 10^{-7} | 10^{-6} | 10^{-5} | 10^{-4} |
| 1 | 19.0 | 6.0 | 1.9 | 0.6 | 0.19 | 0.06 | 0.019 |
| 3 | 32.9 | 10.4 | 3.3 | 1.0 | 0.3 | 0.1 | 0.03 |
| 10 | 60.1 | 19.0 | 6.0 | 1.9 | 0.6 | 0.19 | 0.06 |
| 30 | 10^2 | 33.0 | 10.0 | 3.3 | 1.0 | 0.3 | 0.1 |
| 100 | $1.9 \cdot 10^2$ | 60.0 | 19.0 | 6.0 | 1.9 | 0.6 | 0.19 |
| 300 | $3.3 \cdot 10^2$ | 10^2 | 33.0 | 10.0 | 3.3 | 1.0 | 0.3 |
| 1000 | $6 \cdot 10^2$ | $1.9 \cdot 10^2$ | 60.0 | 19.0 | 6.0 | 1.9 | 0.6 |

Таблиця 6. Максимальна дальність виявлення цілі радаром (тис. кілометрів)

| E, Дж | $\sigma, \text{ м}^2$ | | | | | | | | | |
|-------|-----------------------|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 1 | 3 | 5 | 10 |
| 1 | 0.6 | 0.8 | 0.9 | 1.1 | 1.5 | 1.7 | 2.0 | 2.6 | 3.0 | 3.6 |
| 3 | 0.8 | 1.1 | 1.2 | 1.5 | 1.9 | 2.2 | 2.6 | 3.5 | 3.9 | 4.6 |
| 10 | 1.1 | 1.5 | 1.7 | 2.0 | 2.6 | 3.0 | 3.6 | 4.6 | 5.3 | 6.3 |
| 30 | 1.4 | 1.9 | 2.2 | 2.6 | 3.4 | 3.9 | 4.6 | 6.2 | 7.0 | 8.3 |
| 100 | 2.0 | 2.6 | 3.0 | 3.6 | 4.6 | 5.3 | 6.3 | 8.3 | 9.5 | 11.2 |
| 300 | 2.6 | 3.4 | 3.9 | 4.7 | 6.2 | 7.0 | 8.3 | 11.0 | 12.4 | 14.8 |
| 1000 | 3.6 | 4.7 | 5.3 | 6.3 | 8.3 | 9.5 | 11.2 | 14.8 | 16.8 | 20.0 |

Результати розрахунку R_2 і R_r наведено в табл. 7.

Оскільки найчастіше $R_1 \ll R_2$, співвідношення для z_{\min} має вигляд

$$z_{\min} \approx \frac{R_r^2}{2R_E}. \quad (10)$$

Наприклад, для $R_r = 5 \cdot 10^3$ км з (10) отримаємо, що $z_{\min} \approx 2 \cdot 10^3$ км.

6. Обговорення

У роботі проаналізовано можливість ФУ РЕС з урахуванням сучасних тенденцій розвитку потужних засобів генерації електромагнітної енергії в НВЧ і більш короткохвильовому діапазоні, мініатюризації й інтеграції радіоелектронних елементів. Отримано регресію для залежності критичної енергії від поточного часу. Встановлено, що впродовж п'яти десятиліть спостерігається тенденція щодо зменшення E_{cr} . Це пов'язано з подальшою мініатюризацією й інтеграцією мікросхем відповідно до закону Мура, який і наразі є справедливим. Для низки виробів $E_{cr} \approx 10^{-11} \div 10^{-10}$ Дж.

Водночас спостерігається й зворотна тенденція, спрямована на підсилення захисту РЕС від можливості ФУ. При цьому $E_{cr} \approx 10^{-7} \div 10^{-6}$ Дж і більше.

Отримано різновид основного рівняння ФУ РЕС, що дозволяє оцінити максимальну відстань, на якій можливе ураження за існуючих енергетичних потенціалів радіокомплексів. Для стаціонарних комплексів ця відстань може досягати сотень кілометрів. Для мобільних засобів вона не перевищує $10 \div 100$ км.

Таблиця 7. Залежність максимальної дальності дії радара R_r та її складової R_2 від мінімальної висоти цілі z_{\min}

| Літальний апарат | z_{\min} , км | R_2 , км | R_r , км |
|------------------------|-----------------|------------|------------|
| Дрон, крилата ракета | 0.01 | 11 | 19 |
| Дрон, крилата ракета | 0.02 | 16 | 24 |
| Дрон, крилата ракета | 0.05 | 25 | 33 |
| Дрон, крилата ракета | 0.1 | 36 | 44 |
| Літак | 1 | 113 | 121 |
| Літак | 10 | 360 | 368 |
| Літак | 20 | 506 | 514 |
| Балістична ракета | 200 | 1600 | 1608 |
| Штучний супутник Землі | 300 | 1960 | 1968 |

Обґрунтовано, що функції виявлення й ідентифікації цілі, а також її ураження доцільно поєднати в одному радіокомплексі. Перехід від першого режиму до другого здійснюється на менших відстанях зі збільшенням на 2–3 порядки енергії імпульсів.

7. Основні результати

1. Отримано рівняння регресії для залежності критичної енергії ФУ РЕС від поточного часу. Підтверджено незмінне її спадання. Така поведінка тісно пов'язана з законом Мура, який характеризує ступінь мініатюризації й інтеграції радіоелектронних пристроїв. Передбачено, що для низки пристроїв критична енергія може бути меншою за $10^{-11} \div 10^{-10}$ Дж.

2. Отримано різновид основного рівняння ФУ РЕС. Показано, що максимальна відстань ураження сучасних радіокомплексів може досягати багатьох сотень кілометрів. Для рухомих засобів ця відстань не перевищує $10 \div 100$ км.

3. Обґрунтовано, що функції виявлення й ідентифікації цілі, а також її ураження доцільно поєднати в одному радіокомплексі. Для ураження на певній відстані слід збільшити енергію імпульсу в $10^2 \div 10^3$ разів.

4. Існують всі науково-технічні передумови, необхідні для створення ефективного радіокомплексу ФУ РЕС та захисту державних систем управління, систем управління збройними силами та об'єктами підвищеної небезпеки.

Дослідження виконано в рамках проєкту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 “Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля – атмосфера – іоносфера”), а також частково підтримане в рамках держбюджетної НДР, заданої МОН України (номер держреєстрації 0121U109881).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Барсуков В. С. Электромагнитный терроризм: защита и противодействие. *Специальная техника*. 2003. Т. 6. С. 25–36.
- Белоус В. Угроза использования ЭМИ-оружия в военных и террористических целях. *Ядерный контроль*. 2005. Т. 11, № 1(75). С. 133–140.
- Панов В. В., Саркисян А. П. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ средств функционального поражения. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1993. № 10-12. С. 3–10.

4. Florig H. K. The future battlefield: a blast of gigawatts? [microwave-based weapons]. *IEEE Spectr.* 1988. Vol. 25, Is. 3. P. 50–54. DOI: 10.1109/6.4523
5. Florig H. K. High-power microwave coupling and effects on electronics. *Annales de Physique, Colloque.* 1989. Vol. 14, no. 2, Supplement au № 6.
6. Протасевич Е. Т. *Электромагнитное оружие.* Томск: Изд-во ТПУ, 2004. 90 с.
7. Палий А. И., Куприянов А. И. *Очерки истории радиоэлектронной борьбы.* Москва: Вузовская книга, 2006. 284 с.
8. Корп С. *The Electromagnetic Bomb – a Weapon of Electrical Mass Destruction.* 1996. Melbourne, Australia: Monash University Australia. URL: <https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/ASPJ/journals/Chronicles/apjemp.pdf> (дата звернення: 5.07.2021).
9. Добыкин В. Д., Куприянов А. И., Пономарев В. Г., Шустов Л. Н. *Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем.* Москва: Вузовская книга, 2007. 468 с.
10. Макаренко С. И. *Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетевых войнах XXI века. Монография.* Санкт-Петербург: Научное издание, 2017. 546 с.
11. Михайлов Р. Л. *Радиоэлектронная борьба в Вооруженных силах США: военно-теоретический труд.* Санкт-Петербург: Научное издание, 2018. 131 с.
12. Anil K. M. Directed Energy Weapons. *Handbook of Defence Electronics and Optronics: Fundamentals, Technologies and Systems.* Padstow, Cornwall: John Wiley & Sons Ltd., 2018. P. 1013–1105. DOI: 10.1002/9781119184737.ch12
13. Lazarov L. Perspectives and Trends for the Development of Electronic Warfare Systems. *Proceedings of the IEEE 2019 International Conference on Creative Business for Smart and Sustainable Growth (CREBUS).* (March 18–21, 2019. Sandanski, Bulgaria). 2019. P. 1–3. DOI: 10.1109/CREBUS.2019.8840074
14. Kou C., Tang X., Shao K., and Liu J. High power microwave interference effect of radar system. *Proceedings of the 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC).* (February 20–22, 2019. Chengdu, China). 2019. P. 422–427. DOI: 10.1109/IAEAC47372.2019.8997669
15. Кочеров А. Н., Солдатов В. П., Поляков А. О. Принципы построения интегрированных систем средств радиоэлектронной борьбы. *Радиотехника.* 2020. Т. 84, № 7(13). С. 45–52. DOI: 10.18127/j00338486-202007(13)-06
16. Леньшин А. В. *Бортовые комплексы радиоэлектронной борьбы самолетов и вертолетов: учебное пособие.* Воронеж: ВУНЦ ВВС “ВВА”, 2021. 298 с.
17. Перунов Ю. М., Фомичев К. И., Юдин Л. М. *Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием.* Москва: Радиотехника, 2003. 416 с.
18. Abrams M. Dawn of the E-Bomb. *IEEE Spectr.* 2003. Vol. 40, Is. 11. P. 24–30. DOI: 10.1109/MSPEC.2003.1242953
19. Меркулов В. И., Добыкин В. Д., Дрогалов В. В. Функциональное поражение радиоэлектронных систем. *Фазотрон.* 2006. № 3–4.
20. Кравченко В. И. *Электромагнитное оружие.* Харьков: Изд-во НТУ “ХПИ”, 2008. 185 с.
21. Кравченко В. И. *Оружие на нетрадиционных физических принципах. Электромагнитное оружие.* Харьков: Изд-во “НТМТ”, 2009. 266 с.
22. Орлянский В. И., Дульнев П. А. Энергетическое воздействие – важная составляющая комплексного поражения противника. *Военная мысль.* 2017. № 8. С. 83–93.
23. Namamah F., Ahmad W. F. H. W., Gomes C., Isa M. M., and Homam M. J. High power microwave devices: Development since 1880. *Proceedings of the 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC).* (November 13–16, 2017. Kuala Lumpur, Malaysia). 2017. P. 825–828. DOI: 10.1109/APMC.2017.8251576
24. Сидоренко Р. Г., Грідін В. І., Мегельбей Г. В., Резніченко А. І. Основні напрямки створення систем силової радіоелектронної боротьби для ураження різнотипних радіоелектронних засобів. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил.* 2018. № 1(55). С. 91–96. DOI: 10.30748/zhups.2018.55.12
25. Sakharov K. Y., Sukhov A. V., Ugolev V. L., and Gurevich Y. M. Study of UWB Electromagnetic Pulse Impact on Commercial Unmanned Aerial Vehicle. *Proceedings of the 2017–2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE).* (August 27–30, 2018. Amsterdam, Netherlands). 2018. P. 40–43. DOI: 10.1109/EMCEurope.2018.8484992
26. Перунов Ю. М., Дмитриев В. Г., Куприянов А. И. Анализ методов и технических решений систем функционального поражения РЭС. *Известия Института инженерной физики.* 2019. № 3(53). С. 38–42.
27. Дмитриев В. Г. Функциональное поражение радиоэлектронных средств – одно из направлений обеспечения военной безопасности. *Актуальные проблемы защиты и безопасности. Пленарные доклады XXIII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН.* Санкт-Петербург: Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2020. С. 150–157.
28. Макаренко С. И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 4. Функциональное поражение сверхвысокочастотным и лазерным излучениями. *Системы управления, связи и безопасности.* 2020. № 3. С. 122–157. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10304
29. Белоусов А. О., Газизов Т. Р. Подходы к созданию методологии обеспечения электромагнитной совместимости средств функционального поражения электромагнитным излучением с другими радиоэлектронными средствами в составе комплекса противодействия беспилотным летательным аппаратам. *Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов: сборник докладов XI Международной юбилейной научно-технической конференции.* Москва: Эдитус, 2021. С. 309–313.
30. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Петров С. В. Описательная модель подсистемы радиоэлектронного подавления в составе средств воздушно-космического нападения, используемых для нарушения функционирования элементов системы воздушно-космической обороны. *Системы управления, связи и безопасности.* 2021. № 2. С. 76–95. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-2-76-95
31. Antinone R. J. A Review of the Phenomenology of High Power Microwave Effects on Electronic Components. *Pro-*

- ceedings of the International Symposium on Electromagnetic Environments and Consequence.* (Jan 17–21, 1994. Bordeaux). Bordeaux, France, 1994. P. 344–350.
32. Антипин В. В., Годовицын В. А., Громов Д. В., Кожевников А. С., Раваев А. А. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы. *Зарубежная радиоэлектроника.* 1995. № 1. С. 37–53.
 33. Бердышев А. В., Ивойлов В. Ф., Исайкин А. В., Козирацкий Ю. Л., Щеренков В. В., Ярыгин А. П. Экспериментальные исследования воздействия СВЧ-импульсов на содержащие микросхемы радиоэлектронные устройства. *Радиотехника.* 2000. № 6. С. 85–88.
 34. Добыкин В. Д. Исследование теплового механизма поражения полупроводниковых структур мощным сверхвысокочастотным излучением. *Радиотехника и электроника.* 2000. Т. 45, № 11. С. 1389–1392.
 35. Вдовин В. А., Кулагин В. В., Черепенин В. А. Помехи и сбои при нетепловом воздействии коротких СВЧ-импульсов на радиоэлектронные устройства. *Электромагнитные волны и электронные системы.* 2003. Т. 8, № 1. С. 64–73.
 36. Vdovin V. A., Gulyaev Y. V., Chanturiya V., and Cherepenin V. A. Nonthermal action of high-powered electromagnetic pulses on gold-bearing rock. *J. Commun. Tech. Electron.* 2005. Vol. 50, Is. 9. P. 1044–1047.
 37. Добыкин В. Д. Развитие теории теплового поражения полупроводниковых структур мощным сверхвысокочастотным излучением. *Радиотехника и электроника.* 2008. Т. 53, № 1. С. 108–111.
 38. Kichouliya R. and Thomas M. J. Interaction of high power electromagnetic pulses with power cables and electronic systems. *Proceedings of 2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC).* 2016. P. 159–163. DOI: 10.1109/ISEMC.2016.7571636
 39. Gadetski N. P., Kravtsov K. A., and Magda I. I. Personal computer functional disorders under effect of ultra-short duration electromagnetic pulses. *Proceedings of 1999 9th International Crimean Microwave Conference “Microwave and Telecommunication Technology” (IEEE Cat. No.99EX363).* 1999. P. 326–328, DOI: 10.1109/CRMICO.1999.815254
 40. Грецких Д. В., Цикаловский Н. М., Гладченко Е. И. Применение и перспективы развития беспроводной передачи энергии микроволновым лучом. *Радиотехника.* 2016. Вып. 184. С. 100–118.
 41. Диденко А. Н. *СВЧ-энергетика. Теория и практика.* Москва: Наука, 2003. 448 с.
 42. Месяц Г. А. *Генерирование мощных наносекундных импульсов.* Москва: Сов. радио, 1974. 256 с.
 43. Кулагин И. С., Милославский П. Ю., Новожилова Ю. В., Сморгонский А. В., Шмелев М. Ю. Релятивистская высокочастотная электроника. *Зарубежная радиоэлектроника.* 1986. № 12. С. 3–34.
 44. Benford J., Sze H., Woo W., Smith R. R., and Harteneck V. Phase Locking of Relativistic Magnetrons. *Phys. Rev. Lett.* 1989. Vol. 62, Is. 8. P. 969–971.
 45. Бугаев С. П., Канавец В. И., Кошелев В. И., Черепенин В. А. *Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы.* Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1991. 296 с.
 46. Гинзбург Н. С., Новожилова Ю. В., Сергеев А. С. Генерация коротких электромагнитных импульсов электронным ступком в замедляющей системе типа лампы обратной волны. *Письма в ЖТФ.* 1996. Т. 22, № 9. С. 39–44.
 47. Коровин С. Д., Месяц Г. А., Ростов В. В., Ульмаскулов М. Р., Шарыпов К. А., Шпак В. Г., Шунайлов С. А., Яландин М. И. Высокоэффективная генерация импульсов субнаносекундной длительности в релятивистской ЛОВ миллиметрового диапазона длин волн. *Письма в ЖТФ.* 2002. Т. 28, № 2. С. 81–89.
 48. Калинушкин В. П., Рухадзе А. А., Кузелев М. В., Минаяв И. М. Мощные плазменные СВЧ-источники, перспективы их применения. *Прикладная физика.* 1997. № 1. С. 3–22.
 49. Bromborsky A., Agee F., Bollen M., Cameron J., Clark C., Davis H., Destler W., Graybill S., Huttlin G., Judy D., Kehs R., Kribel R., Libelo L., Pasour J., Pereira N., Rogers J., Rubush M., Ruth B., Schlesiger C., Sherwood E., Smutek L., Still G., Thode L., and Weidenheimer D. On The Path To A Terawatt: High Power Microwave Experiments At Aurora'. *Proceedings of the SPIE Microwave and Particle Sources and Propagation.* 1988. Vol. 873. P. 51–61. DOI: 10.1117/12.965080
 50. Фортов В. Е. *Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока.* Москва: Наука, 2002. 399 с.
 51. Ельчанинов А. А., Коровин С. Д., Пегель И. В., Ростов В. В., Рукин С. Н., Шпак В. Г., Яландин М. И. Сверхизлучательный режим релятивистской ЛОВ с высокой пиковой мощностью микроволновых импульсов. *Известия вузов. Радиоэлектроника.* 2003. Т. 46, № 3. С. 55–65.
 52. Месяц Г. А. *Импульсная энергетика и электроника.* Москва: Наука, 2004. 704 с.
 53. Месяц Г. А., Яландин М. И. Пикосекундная электроника больших мощностей. *УФН.* 2005. Т. 175, № 3. С. 225–246. DOI: 10.3367/UFNr.0175.200503a.0225
 54. Кузелев М. В., Рухадзе А. А., Стрелков П. С. *Плазменная релятивистская СВЧ-электроника.* Москва: Ленанд, 2018. 624 с.
 55. Alam N. and Alam M. The trend of different parameters for designing integrated circuits from 1973 to 2019 and linked to Moore's law. *Aust. J. Eng. Innov. Technol.* 2020. Vol. 2, Is. 2. P. 16–23. DOI: 10.34104/ajeit.020.016023
 56. Велихов Е. П. Нанoeлектронные приборы и технологические процессы. *Вестник Российской академии наук.* 2003. Т. 73, № 5. С. 395–399.

REFERENCES

1. BARSUKOV, V. S., 2003. Electromagnetic terrorism: protection and counteraction. *Spetsialnaya tekhnika.* vol. 6, pp. 25–36. (in Russian).
2. BELOUS, V., 2005. The threat of using EMP weapons for military and terrorist purposes. *Yadernyi control.* vol. 11, is. 1(75), pp. 133–140. (in Russian).
3. PANOV, V. V. and SARKISYAN, A. P., 1993. Some aspects of the problem of creating microwave devices for functional damage. *Zarubezhnaya radioelektronika* vol. 10–12, pp. 3–10. (in Russian).

4. FLORIG, H. K., 1988. The future battlefield: a blast of gigawatts? [microwave-based weapons]. *IEEE Spectr.* vol. 25, is. 3, pp. 50–54. DOI: 10.1109/6.4523
5. FLORIG H. K., 1989. High-power microwave coupling and effects on electronics. *Annales de Physique, Colloque.* vol. 14, no. 2, Supplement au № 6.
6. PROTASEVICH, E. T., 2004. *Electromagnetic weapon.* Tomsk, Russia: TPU Publ. (in Russian).
7. PALYI, A. I. and KUPRIYANOV, A. I., 2006. *Essays on the history of electronic warfare.* Moscow, Russia: Vuzovskaya kniga Publ. (in Russian).
8. KOPP, C., 1996. *The Electromagnetic Bomb – a Weapon of Electrical Mass Destruction* [online]. Melbourne, Australia: Monash University Australia. [viewed 5 July 2021]. Available from: <https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/ASPJ/journals/Chronicles/apjemp.pdf>
9. DOBYKIN, V. D., KUPRIYANOV, A. I., PONOMAREV, V. G. and SHUSTOV, L. N., 2007. *Electronic warfare. Forceful defeat of electronic systems.* Moscow, Russia: Vuzovskaya kniga Publ. (in Russian).
10. MAKARENKO, S. I., 2017. *Information confrontation and electronic warfare in network-centric wars of the XXI century. Monograph.* Saint Petersburg, Russia: Naukoemkie tekhnologii Publ. (in Russian).
11. MIKHAILOV, R. L., 2018. *Electronic warfare in the US Armed Forces: a military theoretical work.* Saint Petersburg, Russia: Naukoemkie tekhnologii Publ. (in Russian).
12. ANIL, K. M., 2018. Directed Energy Weapons. In: *Handbook of Defence Electronics and Optronics: Fundamentals, Technologies and Systems.* pp. 1013–1105. DOI: 10.1002/9781119184737.ch12
13. LAZAROV, L., 2019. Perspectives and Trends for the Development of Electronic Warfare Systems. In: *IEEE 2019 International Conference on Creative Business for Smart and Sustainable Growth (CREBUS) Proceedings.* pp. 1–3. DOI: 10.1109/CREBUS.2019.8840074
14. KOU, C., TANG, X., SHAO, K. and LIU, J., 2019. High power microwave interference effect of radar system. In: *2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC) Proceedings.* pp. 422–427. DOI: 10.1109/IAEAC47372.2019.8997669
15. KOCHEROV, A. N., SOLDATOV, V. P. and POLYAKOV, A. O., 2020. High-level design principles of electronic warfare meansintegrated systems. *Radiotekhnika.* vol. 84, no. 7(13), pp. 45–52. (in Russian). DOI: 10.18127/j00338486-202007(13)-0
16. LENSIN, A. V., 2021. *Onboard electronic warfare systems for aircraft and helicopters: a textbook.* Voronezh, Russia: MESC MAF “MAA” Publ. (in Russian).
17. PERUNOV, YU. M., FOMICHEV, K. I. and YUDIN, L. M., 2003. *Electronic suppression of information channels of weapon control systems.* Moscow, Russia: Radiotekhnika Publ. (in Russian).
18. ABRAMS, M., 2003. Dawn of the E-Bomb. *IEEE Spectr.* vol. 40, is. 11, pp. 24–30. DOI: 10.1109/MSPEC.2003.1242953
19. MERKULOV, V. I., DOBYKIN, V. D. and DROGALIN, V. V., 2006. Functional destroying of radio electronic systems. *Phasotron.* is. 3–4. (in Russian).
20. KRAVCHENKO, V. I., 2008. *Electromagnetic weapon.* Kharkiv: NTU “KhPI” Publ. (in Russian).
21. KRAVCHENKO, V. I., 2009. *Weapons based on unconventional physical principles. Electromagnetic weapon.* Kharkiv, Ukraine: NTMT Publ. (in Russian).
22. ORLYANSKY, V. I. and DULNEV, P. A., 2017. Energy impact is an important component of the enemy’s complex destruction. *Voennaya mysl’.* is. 8, pp. 83–93. (in Russian).
23. HAMAMAH, F., AHMAD, W. F. H. W., GOMES, C., ISA, M. M. and HOMAM, M. J., 2017. High power microwave devices: Development since 1880. In: *2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC) Proceedings.* pp. 825–828. DOI: 10.1109/APMC.2017.8251576
24. SYDORENKO, R. G., HRIDIN, V. I., MEGELBEY, G. V. and REZNICHENKO, A. I., 2018. Basic directions of creation of systems of power radio electronic fight for defeat of different types radio electronic facilities. *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University.* is. 1(55), pp. 91–96. (in Ukrainian). DOI: 10.30748/zhups.2018.55.12
25. SAKHAROV, K. Y., SUKHOV, A. V., UGOLEV, V. L. and GUREVICH, Y. M., 2018. Study of UWB Electromagnetic Pulse Impact on Commercial Unmanned Aerial Vehicle. In: *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE) Proceedings.* pp. 40–43. DOI: 10.1109/EMCEurope.2018.8484992
26. PERUNOV, Y. M., DMITRIEV, V. G. and KUPRIYANOV, A. I., 2019. Analysis of methods and technical solutions of systems of functional destruction of REM. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki.* no. 3(53), pp. 38–42. (in Russian).
27. DMITRIEV, V. G., 2020. Functional destroying of radio-electronic equipment is one of the directions of ensuring military security. In: *Actual problems of protection and security. Plenary reports of the XXIII All-Russian scientific-practical conference RARAN.* Saint Petersburg, Russia: Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences Publ., pp. 150–157. (in Russian).
28. MAKARENKO, S. I., 2020. Counter unmanned aerial vehicles. Part 4. Functional destroying with microwave and laser weapons. *Syst. Control Commun. Security.* is. 3, pp. 122–157. (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10304
29. BELOUSOV, A. O. and GAZIZOV, T. R., 2021. Approaches to the methodology creation for ensuring electromagnetic compatibility of technique of functional destruction by electromagnetic radiation with other radioelectronic techniques as part of a complex for countering unmanned aerial vehicles. In: *XI International Scientific and Technical Conference on Robotic and Intelligent Aircraft Systems Improving Challenges (RIASIC’2020) Poceedings.* Moscow, Russia: Editus Publ., pp. 309–313. (in Russian).
30. AFONIN, I. E., MAKARENKO, S. I. and PETROV, S. V., 2021. Descriptive model of the electronic warfare subsystem as part aerospace attack means used to suppression elements of an aerospace defense system. *Syst. Control Commun. Security.* is. 2, pp. 76–95. (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-2-76-95
31. ANTINONE, R. J., 1994. A Review of the Phenomenology of High Power Microwave Effects on Electronic Components. In: *International Symposium on Electromagnetic Environments and Consequence Proceedings.* Bordeaux, France, Jan 17–21, 1994. pp. 344–350.

32. ANTIPIN, V. V., GODOVITSYN, V. A., GROMOV, D. V., KOZHEVNIKOV, A. S. and RAVAEV, A. A., 1995. Impact of high-power pulsed microwave interferences on semiconductor devices and integrated circuits. *Zarubezhnaya radioelektronika*. is. 1, pp. 37–53. (in Russian).
33. BERDYSHEV, A. V., IVOYLOV, V. F., ISAYKIN, A. V., KOZIRATSKIY, YU. L., SHCHERENKOV, V. V. and YARYGIN, A. P., 2000. Experimental studies of the effect of microwave pulses on electronic devices containing microcircuits. *Radiotekhnika*. no. 6, pp. 85–88. (in Russian).
34. DOBYKIN, V. D., 2000. Analysis of the Thermal Degradation Mechanism of Semiconductor Structures under Intense Microwave Radiation. *Radiotekhnika i Elektronika*. vol. 45, is. 11, pp. 1389–1392. (in Russian).
35. VDOVIN, V. A., KULAGIN, V. V. and CHEREPENIN, V. A., 2003. Noises and malfunctions under non-thermal action of a short electromagnetic pulse on radioelectronic devices. *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy*. no. 1, pp. 64–73. (in Russian).
36. VDOVIN, V. A., GULYAEV, Y. V., CHANTURIYA, V. and CHEREPENIN, V. A., 2005. Nonthermal action of high-powered electromagnetic pulses on gold-bearing rock. *J. Commun. Technol. Electron.* vol. 50, is. 9, pp. 1044–1047.
37. DOBYKIN, V. D., 2008. Development of the theory of thermal damage to semiconductor structures by powerful microwave radiation. *J. Commun. Technol. Electron.* vol. 53, is. 1, pp. 100–103. DOI: 10.1134/S1064226908010129
38. KICHOULIYA, R. and THOMAS, M. J., 2016. Interaction of high power electromagnetic pulses with power cables and electronic systems. In: *2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC) Proceedings*. pp. 159–163. DOI: 10.1109/ISEMC.2016.7571636
39. GADETSKI, N. P., KRAVTSOV, K. A. and MAGDA, I. I., 1999. Personal computer functional disorders under effect of ultra-short duration electromagnetic pulses. In: *1999 9th International Crimean Microwave Conference “Microwave and Telecommunication Technology” Proceedings (IEEE Cat. No.99EX363)*. 1999, pp. 326–328, DOI: 10.1109/CRMICO.1999.815254
40. GRETSKIKH, D. V., TSYKALOVSKIY, N. M. and GLADCHENKO, E. I., 2016. Application and development perspectives of wireless power transmission by microwave beam. *Radiotekhnika*. vol. 184, pp. 100–118. (in Russian).
41. DIDENKO, A. N., 2003. *Microwave energetics: theory and practice*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
42. MESYATS, G. A., 1974. *Generation of powerful nanosecond pulses*. Moscow, Russia: Sov. Radio Publ. (in Russian).
43. KULAGIN, I. S., MILOSLAVSKIY, P. YU., NOVOZHILOVA YU. V., SMORGONSKIY A. V. and SHMELEV, M. YU., 1986. Relativistic HFelectronics. *Zarubezhnaya radioelektronika*. no. 12, pp. 3–34. (in Russian).
44. BENFORD, J., SZE, H., WOO, W., SMITH, R. R. and HARTENECK, B., 1989. Phase Locking of Relativistic Magnetrons. *Phys. Rev. Lett.* vol. 62, is. 8, pp. 969–971.
45. BUGAEV, S. P., KANAVETS, V. I., KOSHELEV, V. I. and CHEREPENIN, V. A., 1991. *Relativistic multiwave UHF generators*. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
46. GINZBURG, N. S., NOVOZHILOVA, YU. V. and SERGEEV, A. S., 1996. Generation of short electromagnetic pulses by an electron bunch in a backward-wave-tube slow-wave system. *Tech. Phys. Lett.* vol. 22, is. 5, pp. 359–361.
47. KOROVIN, S. D., MESYATS, G. A., ROSTOV, V. V., UL'MASKULOV, M. R., SHARYPOV, K. A., SHPAK, V. G., SHUNAILOV, S. A. and YALANDIN, M. I., 2002. High-efficiency subnanosecond microwave pulse generation in a relativistic backward wave tube. *Tech. Phys. Lett.* vol. 28, is. 1, pp. 76–79. DOI: 10.1134/1.1448650
48. KALINUSHKIN, V. P., RUKHADZE, A. A., KUZELEV, M. V. and MINAEV, I. M., 1997. Powerful plasma microelectronics and its applications perspectives. *Prikladnaya fizika*. is. 1, pp. 3–22. (in Russian).
49. BROMBORSKY, A., AGEE, F., BOLLEN, M., CAMERON, J., CLARK, C., DAVIS, H., DESTLER, W., GRAYBILL, S., HUTTLIN G., JUDY, D., KEHS, R., KRIBEL, R., LIBELO, L., PASOUR, J., PEREIRA, N., ROGERS, J., RUBUSH, M., RUTH, B., SCHLESINGER, C., SHERWOOD, E., SMUTEK, L., STILL, G., THODE, L. and WEIDENHEIMER, D., 1988. On The Path To A Terawatt: High Power Microwave Experiments At Aurora'. In: *SPIE Microwave and Particle Sources and Propagation Proceedings*. vol. 873, pp. 51–61. DOI: 10.1117/12.965080
50. FORTOV, V. E., 2002. *Explosive-Driven Generators of Powerful Electric Current Pulses*. Cambridge: Cambridge International Science Pub.
51. YEL'CHANINOV, A. A., KOROVIN, S. D., PEGEL', I. V., ROSTOV, V. V., RUKIN, S. N., SHPAK, V. G. and YALANDIN, M. I., 2003. The superradiative condition of a relativistic BWT with high peak power of microwave pulses. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radioelektronika*. vol. 46, is. 3, pp. 55–65. (in Russian).
52. MESYATS, G. A., 2004. *Pulsed power and electronics*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
53. MESYATS, G. A. and YALANDIN, M. I., 2005. High-power picosecond electronics. *Phys. Uspekhi*. vol. 48, is. 3, pp. 211–229. DOI: 10.1070/PU2005v048n03ABEH002113
54. KUZELEV, M. V., RUKHADZE, A. A. and STRELKOV, P. S., 2018. *Plasma relativistic microwave electronics*. Moscow, Russia: Lenand Publ. (in Russian).
55. ALAM, N. and ALAM, M., 2020. The trend of different parameters for designing integrated circuits from 1973 to 2019 and linked to Moore's law. *Aust. J. Eng. Innov. Technol.* vol. 2, is. 2, pp. 16–23. DOI: 10.34104/ajeit.20.016023
56. VELIKHOV, YE. P., 2003. Nanoelectronic instruments and engineering processes. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. vol. 73, is. 5, pp. 395–399. (in Russian).

L. F. Chernogor

V. N. Karazin Kharkiv National University,
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61002, Ukraine

FUNCTIONAL DAMAGE OF RADIO ELECTRONIC SYSTEMS

Purpose: The most important problem of any state is protection of the control and management systems used for the country, national armed forces, high-risk facilities (nuclear power plants, large chemical plants, airports, etc.). Here, the fact that the means of attack can be deployed on ballistic and cruise mis-

siles, aircraft, and drones should be accounted for. The flight altitude of these vehicles varies from ≈ 300 km to ≈ 10 m. Any attack vehicle is equipped with complex avionics consisting of circuit elements sensitive to electromagnetic fields. Since the 1980s, a new scientific and engineering direction has been developing, being termed as a “functional damage to avionics”. It is based on the creation of powerful means of electromagnetic radiation possessing the energetic capabilities of incapacitating avionics at significant distances (from ~ 100 m to ~ 1000 km). The purpose of this work is to analyze the possible functional damage to avionics with account for the tendencies in avionics technologies.

Design/methodology/approach: The analysis is made on the capability of inflicting functional damage to avionics accounting for the modern trends in developing the powerful means of electromagnetic energy generation in the microwave and shorter wavelength ranges, miniaturization and integration of avionics circuit elements. The regression is constructed for the critical energy time dependence. It has been determined that for decades the critical energy required to damage the circuit elements shows a tendency to decrease. This is due to the further miniaturization and integration of microcircuits according to the Moore’s law, which is still valid for now. For a number of circuit elements, the critical energy is found to be in the range of $10^{-11} - 10^{-10}$ J. At the same time, a reverse tendency arises to protect avionics from being functionally damaged. In this case, the critical energy makes $10^{-7} - 10^{-6}$ J and greater. From the derived version of the basic equation of functional damage to avionics, the maximum distance at which the damage is possible with the energetics of the existing radio systems is estimated. For the ground-based facilities, this distance can attain hundreds of kilometers. For

mobile vehicles, it can reach 10–100 km. Combining target detection, identification and avionics damage capabilities in one radio system has been validated and advised. The transition from the first mode of operation to the second one occurs at shorter distances with an increase of 2–3 orders of magnitude in the pulse energy.

Findings: The regression equation has been obtained for the time dependence of the critical energy required for inflicting functional damage to avionics. Its constant decrease has been confirmed. Such a behavior is closely related to the Moore’s law, which characterizes the degree of miniaturization and integration of avionics circuit elements. It has been predicted that for a number of instruments the critical energy can be smaller than $10^{-11} - 10^{-10}$ J. A version of the basic equation of functional damage to avionics has been obtained. The maximum distance for a modern radio system to damage the avionics has been shown to attain many hundreds of kilometers. For the radio systems installed on mobile vehicles, this distance makes 10–100 km. Target detection, tracking and identification, as well as avionics damage capabilities, have been proved to be rationally combined in one radio system. To cause damage at a corresponding range, the pulse energy needs to be increased by a factor of $10^2 - 10^3$.

Conclusions: There are all science and technology prerequisites for developing effective radio systems inflicting functional damage to avionics and for the state defense and protection, armed forces, and high-risk facility controlling systems.

Key words: functional damage, avionics, critical energy, Moore’s law, functional damage equation, radiolocation equation, detection and destruction range

Стаття надійшла до редакції 07.07.2021