УДК 621.396.67:621.391.82:61 https://doi.org/10.15407/itm2026.03.089

П. І. ЗАБОЛОТНИЙ, https://orcid.org/0000-0002-6708-6369
В. П. КАМКОВ, https://orcid.org/0000-0001-6689-6653

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА БЕЗПЕКА ОПЕРАТОРІВ ПОРТАТИВНИХ ЗАСОБІВ РЕБ: ВИМОГИ ДО АНТЕННИХ ПІДСИСТЕМ

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна, https://ror.org/003ed9546; e-mail: mwave@ukr.net

Безпілотні авіаційні системи стали одним з ключових чинників сучасної війни. Широке застосування комерційних і спеціалізованих дронів для ведення розвідки, коригування вогню та безпосереднього ураження цілей зумовило критичну потребу в ефективних засобах протидії – системах радіоелектронної боротьби (РЕБ). Принципова конструктивна особливість переносних засобів «окопного РЕБ» полягає в тому, що антенна підсистема розміщується безпосередньо на тілі бійця або в безпосередній близькості від нього. Відстань від випромінювальної апертури до голови або торсу оператора є незначною і становить (0,05–0,3) м – зона реактивного ближнього та індукційного поля, де рівні електромагнітного поля суттєво перевищують значення, що передбачаються розрахунками у далекій зоні. Питання електромагнітної безпеки персоналу регулюються міжнародними стандартами ICNIRP та IEEE C95.1, а також вітчизняним нормативом ДСН 3.3.6.096–2002. Жоден з означених документів не встановлює специфічних вимог до конструкцій антен переносних засобів РЕБ з позиції мінімізації питомого коефіцієнта поглинання (SAR) в умовах ближнього поля, що визначає актуальність роботи.

Мета роботи – на основі аналізу механізмів взаємодії НВЧ-випромінювання з біологічними тканинами та аналітичних оцінок SAR сформулювати вимоги до антенних підсистем портативних засобів РЕБ проти безпілотних авіаційних систем, що забезпечують ефективне заглушення цілей при дотриманні нормативів електромагнітної безпеки.

У роботі розглянуто класифікацію переносних засобів заглушення безпілотних авіаційних систем, наведено діелектричні властивості тканин на частотах (0,43–5,8) ГГц, описано модель SAR на основі рівняння Пеннеса. Проведено параметричний аналіз SAR для чотирьох сценаріїв манпак-систем при потужності (1–30) Вт і побудовано карти мінімальних безпечних відстаней. Отримані оцінки верифіковано порівнянням з опублікованими FDTD-результатами для аналогічних конфігурацій. Сформульовано вимоги до діаграми спрямованості, рівня SAR, верифікації вимірювань, а також конструктивні та режимні вимоги.

Ключові слова: *радіоелектронна боротьба, безпілотні авіаційні системи, питомий коефіцієнт поглинання, антенна підсистема, штучний магнітний провідник (AMC), рівняння Пеннеса, IEC 62232, електромагнітна безпека.*

Unmanned aerial systems (UASs) have become one of the key factors in modern warfare. The widespread use of commercial and specialized drones for reconnaissance, fire control, and direct target engagement has created a critical need for effective countermeasures – electronic warfare (EW) systems. The fundamental design feature of portable “trench EW” systems is that the antenna subsystem is placed directly on the soldier’s body or in close proximity to it. The distance from the radiating aperture to the operator’s head or torso is small (0.05–0.3 m) and lies in the reactive near-field zone where the electromagnetic field levels significantly exceed the values predicted by calculations in the far-field zone. Issues of personnel electromagnetic safety are regulated by the international standards ICNIRP and IEEE C95.1 together with the domestic standard DSN 3.3.6.096–2002. None of the above documents establishes any specific requirements for the design of portable electronic warfare equipment antennas from the standpoint of minimizing the specific absorption rate (SAR) in near-field conditions, which determines the relevance of this work.

Based on an analysis of microwave radiation – biological tissues interaction mechanisms and analytical SAR estimates, this work formulates requirements for anti-UAS EW antenna subsystems such that effective target jamming is ensured while complying with the electromagnetic safety standards.

The paper classifies portable UAS-jamming devices, presents the dielectric properties of human tissues at frequencies of 0.43–5.8 GHz, and describes a SAR model based on the Pennes equation. A parametric SAR analysis was performed for four scenarios of manpack systems at a power of 1–30 W, and minimum safe distances were mapped. The obtained estimates were verified by comparison with published FDTD results for similar configurations. Radiation pattern, SAR level, and measurement verification requirements were formulated together with design and operating requirements.

Keywords: *electronic warfare, unmanned aerial systems, specific absorption rate (SAR), antenna subsystem, artificial magnetic conductor (AMC), Pennes bioheat equation, IEC 62232, electromagnetic safety.*

1. Вступ. Безпілотні авіаційні системи (БАС) стали одним із ключових

© П. І. Заболотний, В. П. Камков, 2026

The article is an open access article distributed underthe terms and conditions of the Creative Commons Attributions (CC BY) license (https/creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

чинників сучасної війни. Широке застосування комерційних і спеціалізованих дронів для ведення розвідки, коригування вогню та безпосереднього ураження цілей зумовило критичну потребу в ефективних засобах протидії – системах радіоелектронного заглушення [1, 2].

Принципова конструктивна особливість переносних засобів «окопного РЕБ» полягає в тому, що антенна підсистема розміщується безпосередньо на тілі бійця або в безпосередній близькості від нього. Відстань від випромінювальної апертури до голови або торсу оператора становить 0,05 м – 0,3 м – зона реактивного ближнього та індукційного поля, де рівні електромагнітного поля (ЕМП) суттєво перевищують значення, що передбачаються розрахунками у далекій зоні [3].

Питання електромагнітної безпеки (ЕМБ) персоналу регулюються стандартами ICNIRP та IEEE C95.1, а також вітчизняним нормативом ДСН 3.3.6.096–2002 [4–6]. Чинні документи не містять спеціалізованих вимог до конструкцій антен переносних засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) з позиції мінімізації питомого коефіцієнта поглинання (SAR) в умовах ближньопольового розташування відносно тіла оператора, що визначає актуальність роботи.

Мета роботи – на основі аналізу взаємодії надвисокочастотного (НВЧ) поля з біологічними тканинами та параметричного аналізу SAR сформулювати науково обґрунтовані вимоги до антенних підсистем переносних засобів РЕБ проти БАС, що забезпечують ефективне заглушення цілей при дотриманні нормативів ЕМБ оператора.

2. **Класифікація портативних засобів заглушення БАС**

2.1. Типи переносних систем РЕБ. Переносні засоби заглушення БАС поділяються на три класи за конструктивним виконанням і характером навантаження на оператора (таблиця 1).

Таблиця 1. Класифікація портативних засобів РЕБ проти БАС [1, 3, 7]

КЛАС I Наплічникові (manpack)	КЛАС II «Антидронові рушниці»	КЛАС III Переносні (wearable)
Потужність (5 – 50) Вт	Потужність (1 – 20) Вт	Потужність (0,5–5) Вт/канал
Відстань до тіла (0,05–0,4) м	Відстань до тіла (0,2 – 1,0) м	Відстань до тіла < 0,05 м
Діапазони 433 МГц; 915 МГц; 2,4 ГГц; 5,8 ГГц	Діапазони 433МГц; 915 МГц; 2,4 ГГц; 5,8 ГГц	Діапазони 433 МГц; 2,4 ГГц; 5,8 ГГц
Тип антени QHA, Патч	Тип антени LPDA, Рупор, Патч	Тип антени Плоска, Патч
Головний ризик SAR > ICNIRP	Головний ризик Бокове поле	Головний ризик Контактне поле
Захист AMC + щогла	Захист Поляризація, FBR	Захист AMC обов'язк.

QHA – Quadrifilar helix antenna.

FBR – це логарифмічне відношення коефіцієнта підсилення антени у напрямку головного (переднього) пелюстка до коефіцієнта підсилення у протилежному (задньому) напрямку:

$$\mathrm{FBR} = 10 \cdot \lg(G_{\mathrm{forward}} / G_{\mathrm{back}}),$$

де G_{forward} – підсилення антени у напрямку випромінювання (до цілі – до дрона), G_{back} – підсилення у зворотному напрямку (до тіла оператора).

AMC – Artificial magnetic conductor (штучний магнітний провідник). AMC є **штучною реалізацією PMC (ідеального магнітного провідника** – PMC) у обмеженій смузі частот: у цій смузі він відбиває спадну хвилю співфазно, як нібито вона відбилась від гіпотетичного магнітного провідника.

2.2. Діапазони частот та протоколи зв'язку БАС. БАС використовують обмежений перелік каналів керування та відео (табл. 2). Для ефективного заглушення рівень завади в точці антени дрона має перевищувати корисний сигнал на (6 – 10) дБ по критерію JSR (Jammer-to-Signal Ratio – **відношення завади до сигналу**). З урахуванням втрат у вільному просторі при відстані до цілі (50 – 500) м вихідна потужність засобу придушення становить (5 – 30) Вт на канал.

Таблиця 2. Основні канали керування БАС та відповідні діапазони засобів заглушення [3, 8]

Призначення сигналу	Частота	Тип модуляції	Потужність БАС
Управління (RC)	433 МГц	FHSS / FM	(10–100) мВт
Управління (RC)	868/915 МГц	FHSS	(10–500) мВт
Управління / відео	2,4 ГГц	DSSS / OFDM	(10–1000) мВт
Відео (FPV)	5,8 ГГц	FM / OFDM	(25–600) мВт
Навігація GPS	1,575 ГГц	BPSK	– (пасив.)
Навігація ГЛОНАСС	1,602 ГГц	BPSK	– (пасив.)

3. Взаємодія НВЧ-випромінювання з біологічними тканинами

3.1. Діелектричні властивості тканин та модель Коула–Коула. Взаємодія ЕМП з біологічними тканинами описується комплексною діелектричною проникністю:

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon' - j\cdot\varepsilon'' = \varepsilon_0\cdot\varepsilon_r\cdot(1 - j\cdot\sigma/(\omega\cdot\varepsilon_0\cdot\varepsilon_r)), \qquad (1)$$

де ε_r – відносна діелектрична проникність; ε_0 – діелектрична стала вакууму; σ – питома електрична провідність (С/м); $\omega = 2\pi f$ – кутова частота.

Частотна дисперсія параметрів описується моделлю Коула–Коула: α- та β-дисперсії (іонна провідність, поляризація клітинних мембран при $f < 1$ ГГц) та γ-дисперсія (дипольна релаксація молекул води при (0,5 – 10) ГГц). Саме γ-механізм зумовлює різке зростання σ з частотою та є основним джерелом теплового поглинання в діапазоні засобів РЕБ. Параметри тканин і їх діелектричні властивості у діапазонах РЕБ наведено в табл. 3 [9].

Таблиця 3. Параметри тканин і їх діелектричні властивості у діапазонах РЕБ (питома електрична провідність σ (С/м), густина тканин ρ (кг/м³) та глибина проникнення δ (мм) НВЧ-поля)

Тканина	ρ, кг/м³	433 МГц σ/δ	900 МГц σ/δ	2,4 ГГц σ/δ	5,8 ГГц σ/δ
М'яз	1050	0,80/28	0,97/18	1,74/11	3,10/5,5
Шкіра суха	1100	0,69/32	0,85/20	1,46/12	3,70/4,8
Жирова тканина	920	0,04/145	0,05/115	0,10/60	0,27/22
Кістка кортикальна	1900	0,08/80	0,13/55	0,39/24	0,89/11
Мозок, сіра речовина	1040	0,41/32	0,59/22	1,49/12	3,38/5,3
Кришталик ока	1100	0,35/36	0,60/21	1,30/13	3,10/5,6

Зростання частоти від 0,43 ГГц до 5,8 ГГц зменшує глибину проникнення в м'язову тканину у 5 разів: від 28 мм (0,43 ГГц) до 5,5 мм (5,8 ГГц) при зростанні σ у 4 рази. Кришталик ока та мозок – критичні органи-мішені.

3.2. Механізми поглинання. Механізми взаємодії електромагнітного випромінювання (ЕМВ) з біологічними тканинами традиційно поділяють на теплові та нетеплові. За умов, коли питома потужність поглинання перевищує порогові значення питомого коефіцієнту поглинання (SAR > (1 – 2) Вт/кг), домінуючим стає тепловий ефект. Його біофізичною основою є високочастотна переорієнтація дипольних молекул води та вільних іонів, що призводить до діелектричних втрат і локального підвищення температури тканин. Найбільш вразливими до такого нагріву є органи з обмеженою васкуляризацією та терморегуляцією; зокрема, високий (SAR ≥ 10 Вт/кг – 20 Вт/кг) становить ризик розвитку катаракти кришталика та функціональних порушень гонадотропної системи [10].

Поряд із цим, при нижчих рівнях випромінювання спостерігаються нетеплові ефекти, пов’язані з резонансним впливом на мембранні структури, зміною проникності іонних каналів та генерацією активних форм кисню без суттєвого підвищення температури [10]. Ці ефекти не нормовані і потребують подальшого вивчення.

4. Математична модель оцінювання SAR

Наведені у розд. 3 діелектричні властивості тканин є вхідними параметрами для кількісної оцінки електромагнітного навантаження на оператора. Тому потрібно визначити математичний апарат такої оцінки, який дозволить: визначити SAR через параметри поля і тканини, описати теплові наслідки поглинання та нормативні межі, яким отримані значення повинні відповідати.

4.1. Питомий коефіцієнт поглинання: фізичне обґрунтування та усереднення. SAR – фундаментальний дозиметричний показник, що кількісно описує швидкість перетворення електромагнітної енергії на теплоту в одиниці маси тканини:

$$\mathrm{SAR} = dP/dm = \sigma \cdot |E|^2 / (2 \cdot \rho) \quad [\text{Вт/кг}], \qquad (2)$$

де P – потужність електромагнітного поля, що поглинається елементом тканини, Вт; m – маса елемента тканини, кг; σ – провідність тканини, С/м; E – амплітуда поля в тканині, В/м; ρ – густина тканини, кг/м³.

Множник *1/2* – усереднення за часом синусоїдального поля ($E_{rms} = E/\sqrt{2}$), де E_{rms} – середньоквадратичне (діюче) значення напруженості електричного поля, В/м. Вираз (2) безпосередньо випливає з закону Джоуля–Ленца.

ICNIRP та IEEE C95.1 нормують: (а) локальний SAR – усереднений по 10 г суміжної тканини (куб ~ 21,5 мм), межа 10 Вт/кг; (б) загальний – усереднений по всьому тілу (~ 70 кг), межа 0,4 Вт/кг. Обидва усереднюються з 6-хвилинним інтервалом. Для переривчастих (когнітивних) режимів це дозволяє знизити ефективну дозу пропорційно коефіцієнту заповнення; при цьому нормативне усереднення не означає дозволу довільного перевищення миттєвого SAR з компенсацією паузою, а лише фіксує законний переривчастий режим зі скороченим часом випромінювання.

Зв'язок SAR з підвищення температури нагріву тканини ΔT: за відсутності кровоперфузії $\Delta T \approx \mathrm{SAR}\cdot\Delta t/c$, К; c – питома теплоємність тканини (≈ 3600 Дж/(кг·К)); Δt – тривалість опромінення, с.

При SAR = 10 Вт/кг, Δt = 360 с: $\Delta T \approx 1{,}0$ °С – наближається до допустимого порогу. Звідси 10-кратний коефіцієнт безпеки норми 0,4 Вт/кг.

Формула (2) дозволяє розрахувати швидкість теплового виділення у тканині, однак не відповідає на питання, яке підвищення температури ΔT при цьому виникне і як швидко тканина повернеться до теплової рівноваги. Для відповіді на ці питання необхідна теплова модель, що враховує не лише джерело тепла, а й усі механізми його відведення – теплопровідність, кровоперфузію та метаболізм. Цю проблему дозволяє вирішити модель Пеннеса.

4.2. Рівняння Пеннеса та розрахункове середовище. Нестаціонарне рівняння теплопереносу в перфузованій тканині [11]:

$$\rho_t c_t (\partial T/\partial t) = \nabla\cdot(k_t\cdot\nabla T) - W_b C_b (T - T_b) + Q_m + Q_{EM}, \qquad (3)$$

де ρ_t, c_t, k_t – теплофізичні параметри тканини (об'ємна густина, питома теплоємність та коефіцієнт теплопровідності); W_b – об'ємний коефіцієнт кровоперфузії, кг/(м³·с); C_b – питома теплоємність крові, Дж/(кг·К); T_b – температура крові (≈37°С); Q_m – щільність потужності, що виділяється у тканині внаслідок хімічних реакцій клітинного метаболізму; $Q_{EM} = \mathrm{SAR}\cdot\rho_t$ – НВЧ-джерело.

Коефіцієнт W_b характеризує масу артеріальної крові, що протікає через одиницю об'єму тканини за одиницю часу і відводить надлишкову теплоту, – домінуючий механізм терморегуляції у васкулярних тканинах. Для аваскулярних органів (кришталик ока, яєчка) $W_b \to 0$, що унеможливлює перфузійне охолодження і робить їх найбільш вразливими до НВЧ-нагріву.

Фізичний зміст складових рівняння (3).

$\nabla\cdot(k_t\cdot\nabla T)$ – теплопровідність (в більшості тканин цей механізм теплопереносу є **менш значущим ніж кровоперфузія,** $k_t \approx 0{,}2 – 0{,}6$ Вт/(м·К));

$W_b C_b (T - T_b)$ – перфузійне охолодження кровотоком – домінуючий механізм терморегуляції. Органи з $W_b \to 0$ (кришталик, мозок) найбільш вразливі.

Аналітичний розв'язок для стаціонарного одновимірного випадку є таким –

$$\Delta T(x) = Q_{EM}/(W_b C_b)\cdot[1 - \exp(-x/L_T)],$$

де $L_T = \sqrt{(k_t/(W_b \cdot C_b))} \approx 8{,}3$ мм для м'язової тканини.

Аналітичний розв'язок для рівномірного Q_{EM} показує, що в шарі товщиною $\sim L_T \approx 8{,}3$ мм встановлюється рівноважний перепад температури між поверхнею ($T = T_b$, охолодження кров'ю) і глибокими шарами ($T_{max} \approx T_b + Q_{EM}/(W_b \cdot C_b)$). У реальних умовах Q_{EM} спадає з глибиною пропорційно $\exp(-2x/\delta)$, тому фактичний температурний максимум зосереджений біля поверхні тіла. Наведена формула є ілюстративною; точний розподіл ΔT(x,y,z) визначається методом скінченних різниць у часовій області (FDTD).

Точніші результати дає числове FDTD-моделювання (в даній роботі не проводилось).

У точних розрахунках рівняння Максвелла (FDTD) та рівняння Пеннеса розв'язуються спільно: FDTD → SAR(x,y,z) → числовий розв'язок (3) → T(x,y,z,t). Рекомендованими середовищами моделювання можуть бути: openEMS v0.0.35 або CST Microwave Studio. В якості фантома людського тіла можна використати AustinMan v2.6 (138×138×200 вокселів, крок 2 мм) [12]. Критерій нетеплового впливу: $\Delta T \leq 0{,}1$ °C.

4.3. Нормативні обмеження. Чинні нормативні рамки для персоналу засобів РЕБ (режим професійного опромінення) наведено в табл. 4. Граничні рівні ICNIRP встановлено з 10-кратним коефіцієнтом безпеки відносно термальних порогів. ДСН 3.3.6.096-2002 є жорсткішим для хронічного впливу, але для бойових умов з переривчастим режимом доцільно застосовувати нормативи ICNIRP з 6-хвилинним усередненням.

Таблиця 4. Граничні рівні SAR для персоналу засобів РЕБ [4 – 6]

Норматив	**Локальний SAR (10 г)**	**Загальний SAR**	**Час усеред-нення**	**Щільність потужності на поверхі тіла (> 10 ГГц)**
ICNIRP (2020)	10 Вт/кг	0,4 Вт/кг	6 хв	50 Вт/м²
IEEE C95.1-2019	10 Вт/кг	0,4 Вт/кг	6 хв	50 Вт/м²
ДСН 3.3.6.096-2002	—	0,08 Вт/кг	8 год	10 Вт/м²

5. Розрахункова оцінка SAR для типових конфігурацій манпак-систем

5.1. Методологія: зони поля антени та вивід розрахункових формул. Для коректного застосування аналітичних формул необхідно розмежувати просторові зони поля антени з характерним розміром апертури D при довжині хвилі λ (рис. 1): реактивна ближня зона ($d < \lambda/2\pi$, де d – відстань від апертури антени до поверхні тіла); зона Френеля ($\lambda/2\pi \leq d < 2D^2/\lambda$); далека зона Фраунгофера ($d \geq 2D^2/\lambda$), де поле набуває структури ТЕМ-хвилі [4, 13].

Для f = 2,4 ГГц (λ = 125 мм): $\lambda/2\pi \approx 20$ мм; для штирової антени ($D \approx 31$ мм): $d_{far} \approx 15$ мм, де d_{far} – далека зона (Фраунгофера); для патч-антени ($D \approx 60$ мм): $d_{far} \approx 58$ мм. Отже, при d = (50 – 300) мм (умови манпак) більшість конфігурацій перебуває в зоні Френеля або на межі далекого поля.

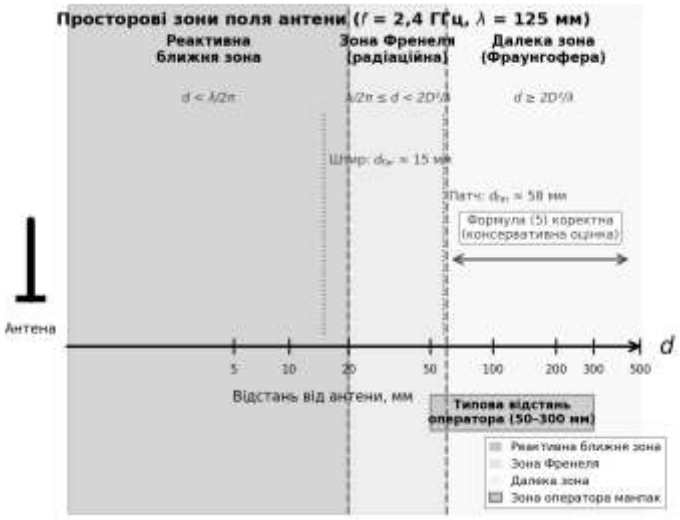


Рис. 1 – Просторові зони поля антени (f = 2,4 ГГц, λ = 125 мм) та зона розміщення оператора манпак-системи

Аналітична оцінка значення SAR. Пропонується спрощена модель оцінки SAR для інженерних оцінок. Густина потужності у далекому полі: $S(d) = P_t \cdot G/(4\pi \cdot d^2)$. Зв'язок з E через імпеданс вільного простору Z_0 = 377 Ом, $S = |E|^2/(2Z_0)$:

$$|E| = \sqrt{(60 \cdot P_t \cdot G_{eff})} / d. \quad (4)$$

Підстановка у (2) дає:

$$\mathrm{SAR} \approx 30 \cdot \sigma \cdot P_t \cdot G_{eff} / (\rho \cdot d^2), \quad (5)$$

де $G_{eff} = G \cdot 10^{(-FBR/10)}$ – ефективний коефіцієнт підсилення у напрямку оператора: для штиря 2,0; для QHA 0,63; для патч 20 дБ 0,10; для патч+АМС 30 дБ 0,01.

Обґрунтування аналітичного підходу. Формула (5) є консервативною верхньою межею SAR, нормативно визнаною як скринінговий інструмент для первинної класифікації конфігурацій відповідно до IEC 62232:2022, Додаток D [14]. Верифікацію точним методом FDTD проводять згідно з вимогою В8.7 на завершальному етапі проєктування. Значення SAR у табл. 5 для сценаріїв В і Г розраховані з урахуванням емпіричного коефіцієнта поглинання (~20 % від теоретичного значення у далекому полі), який враховує два фактори, характерних для зони Френеля: (1) не-плоскохвильовий характер поля при $d < d_{far}$ знижує ефективну густину потужності у 2–3 рази порівняно з далекопольним наближенням; (2) відбиття ~(70–80) % падаючої потужності від поверхні тіла (різниця імпедансів «повітря–м'яз» при f = 2,4 ГГц) додатково зменшує SAR у 2–3 рази. Сукупна поправка (~5×) підтверджується опублікованими результатами FDTD-моделювання: пік-SAR = (3–8) Вт/кг при $d \approx 50$ мм і f = 2,4 ГГц [16], що збігається зі значенням ~4,0 Вт/кг у сценарії В.

5.2. Параметричний аналіз та верифікація результатів. Базові умови: м'яз (σ = 1,74 С/м, ρ = 1050 кг/м³); f = 2,4 ГГц.

Точкові значення SAR при P_t = 10 Вт − табл. 5 (жирним шрифтом виділено перевищення нормативу ICNIRP).

Таблиця 5. Розрахункові значення SAR у
м'язовій тканині оператора (f = 2,4 ГГц, P_t = 10 Вт)

Сценарій	Тип антени / захист	d=0,05 м Вт/кг	d=0,15 м Вт/кг	d=0,30 м Вт/кг	d=0,50 м Вт/кг
А	Штир, без екрану	**397**	**44**	**11**	4,0
Б	QHA, без екрану	**60**	**6,7**	1,7	0,6
В	Патч (FBR = 20 дБ)	**4,0**	0,44	0,11	0,04
Г	Патч + AMC (FBR = 30 дБ)	0,40	0,044	0,011	0,004
–	**ICNIRP – локальний норматив**	**10 Вт/кг**	**10 Вт/кг**	**10 Вт/кг**	**10 Вт/кг**
–	**ICNIRP – норматив на рівні тіла**	**0,4 Вт/кг**	**0,4 Вт/кг**	**0,4 Вт/кг**	**0,4 Вт/кг**

Для сценаріїв В і Г застосовано емпіричний коефіцієнт поглинання ~0,2 відносно далекопольної формули (5) з урахуванням ближньопольових ефектів і відбиття від поверхні тіла; відповідність підтверджена FDTD-даними [16].

Аналіз сценарію А (штир)

При d = 0,05 м: $|E|$ = 692 В/м, SAR ≈ 397 Вт/кг – перевищення загального нормативу у ~992 рази; допустимий час t_{eff} = 6·0,4/397 ≈ 0,006 хв ≈ 0,4 с. Навіть при d = 0,5 м SAR = 4,0 Вт/кг (×10 перевищення). Штирова антена виключає наплічне носіння в режимі безперервного випромінювання при P_t = 10 Вт.

Аналіз сценарію Б (QHA)

G_{eff} = 0,63. Локальний норматив виконується при $d \geq 0,15$ м; для тіла в цілому − лише при $d \geq 0,97$ м. QHA без AMC непридатна для наплічного виконання без щогли.

Аналіз сценарію В (патч, 20 дБ).

Обидва нормативи виконуються при d ≥ 0,30 м. Прийнятне рішення при монтажі з відстанню ≥ (0,15 – 0,30) м.

Аналіз сценарію Г (патч + AMC, 30 дБ).

G_{eff} = 0,01: SAR = 0,40 Вт/кг, при d = 0,05 м − рівно на межі нормативу для всього тіла. При $d \geq 0,15$ м SAR = 0,044 Вт/кг. Конфігурація задовольняє обидва нормативи при $d \geq$ (0,05 – 0,10) м, що відповідає умовам наплічного носіння. Ключовий результат: зменшення G_{eff} у 200 разів (від А до Г) є основним чинником зниження SAR.

Верифікація аналітичних оцінок

Отримані значення SAR узгоджуються з опублікованими FDTD-результатами для аналогічних конфігурацій. Для патч-антени на тілі (сценарій В, аналог [15]) при f = 2,4 ГГц та $d \approx$ 50 мм опубліковані значення пік-SAR складають (3 – 8) Вт/кг, що відповідає розрахунковому ~ 4,0 Вт/кг.

Застосування AMC/EBG-структур знижує локальний SAR у (8 – 12) разів [16], що узгоджується з розрахунковим зниженням у ~ 10 разів між сценаріями В і Г.

Ці порівняння підтверджують коректність застосованої аналітичної методики як скринінгового інструменту. Результати параметричного аналізу

для широкого діапазону відстаней (3 – 60) см та потужностей (1 – 30) Вт наведено на рис. 2.

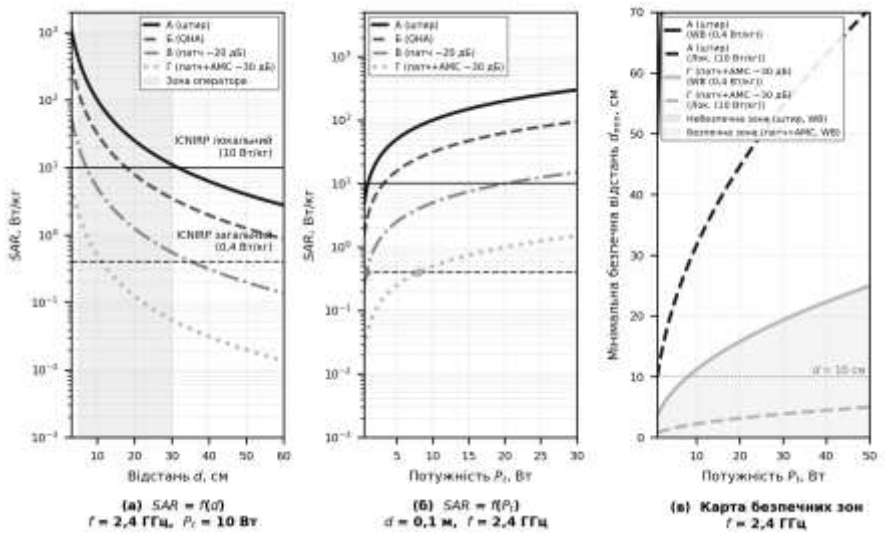


Рис. 2 – Параметричний аналіз SAR у м'язовій тканині оператора манпак-системи РЕБ: *(а)* SAR = *f(d)* при P_t = 10 Вт*; (б)* SAR = *f*(P_t) при d = 0,1 м*; (в)* карта безпечних зон у просторі (P_t, d_{min}). Штрихові лінії – нормативи ICNIRP

Панель (а) демонструє залежність SAR від відстані у логарифмічному масштабі для чотирьох сценаріїв; панель (б) − залежність від потужності передавача при фіксованій відстані d = 0,1 м; панель (в) − карту мінімальних безпечних відстаней у просторі параметрів (P_t, d_{min}), яка є безпосереднім інструментом для інженера-проєктувальника.

5.3. Оцінка частотної залежності SAR. Аналогічні розрахунки виконано для f = 0,43 ГГц; 0,9 ГГц; 2,4 ГГц та 5,8 ГГц при Сценарії Г (d = 0,1 м, G_{eff} = 0,01) − табл. 6.

Таблиця 6. Залежність SAR від частоти
(сценарій Г: патч + AMC, d = 0,1 м, P_t = 10 Вт)

f	Тканина	σ, С/м	ρ, кг/м³	G_{eff}	SAR, Вт/кг	Оцінка
0,43 ГГц	М'яз	0,80	1050	0,01	0,23	Допустимо
0,9 ГГц	М'яз	0,97	1050	0,01	0,28	Допустимо
2,4 ГГц	М'яз	1,74	1050	0,01	0,50	Перевищення заг. ICNIRP
5,8 ГГц	М'яз	3,10	1050	0,01	0,89	Перевищення заг. ICNIRP
5,8 ГГц	Шкіра	3,70	1100	0,01	1,01	Перевищення заг. ICNIRP

Зростання провідності тканин від 0,80 до 3,10 С/м при збільшенні f від 0,43 ГГц до 5,8 ГГц призводить до перевищення загального нормативу навіть у Сценарії Г. Для каналу 5,8 ГГц необхідний FBR ≥ 35 дБ або відстань ≥ (0,2 – 0,3) м.

6. Порівняльний аналіз антенних конструкцій

Вибір типу антени визначається компромісом між тактичними вимогами та безпекою (табл. 7).

QHA є оптимальною для захисту від зенітних БАС завдяки круговій поляризації та рівномірному перекриттю верхньої напівсфери: флуктуації JSR при маневруванні дрона не перевищують ± 3 дБ, тоді як для лінійно поляризованої антени вони досягають ± (20 – 30) дБ.

Таблиця 7. Порівняльний аналіз антен для манпак-систем РЕБ (P_t = 10 Вт, f = 2,4 ГГц).

Характеристика	Штир/диполь	Патч	QHA	Патч+AMC	LPDA
Діаграма	Тороїдальна	60°– 120°	Кардіоїдна	Спрямована	Спрямована
Підсилення, дБі	2–5	6 – 10	2 – 4	8 – 13	6 – 9
Перекриття зеніту	Слабке	Слабке	Відмінне	Задовільне	Слабке
Поляризація	Лінійна	Лін./круг.	Кругова	Лін./круг.	Лінійна
FBR, дБ	~0	15 – 20	10 – 15	25 – 35	12 – 18
SAR Вт/кг (d=0,05м)	~ 400	~ 4	~ 60	~ 0,4	~ 35

Вплив тіла на вхідний імпеданс. Металева площина заземлення патч-антени та AMC-структура ізолюють антену від тіла і стабілізують характеристики, тоді як штирова антена при наближенні до тіла значно розстроюється − ще один аргумент на користь патч+AMC.

Мікросмужкова патч-антена з AMC-структурою забезпечує сумарний FBR ≥ 30 дБ без фазового самозаглушення [17]. Порівняння AMC з класичними EBG-підкладками показало подібний ефект зниження SAR [16].

7. Конструктивні рішення мінімізації SAR

На основі власних розрахунків за формулою (5), а також даних [4, 18] було створено ієрархію заходів мінімізації SAR, яку зображено на рис. 3.



Рис. 3 – Ієрархія конструктивних заходів мінімізації SAR оператора переносних засобів РЕБ

Допустимий час безперервної роботи t_{eff} можна отримати з виразу:

$$t_{eff} = t_{avg} \cdot SAR_norm / \text{SAR}, \quad (6)$$

де *SAR_norm* – це граничне значення SAR**,** встановлене стандартом (ICNIRP), і яке не можна перевищувати при тривалому опроміненні; SAR – це фактичне значення SAR, отримане розрахунком за формулою (5) для конкретної конфігурації антени, потужності та відстані. t_{avg} = 6 хв – це нормативний інтервал, протягом якого ICNIRP та IEEE C95.1 вимагають усереднювати миттєві значення SAR перед порівнянням з граничними рівнями;

Нормативний інтервал t_{avg} пов'язано з таким фізичним змістом: людське тіло не реагує миттєво на ЕМ-опромінення – теплова реакція кровоносної системи має свій характерний час (~ 6 хвилин для тулуба). Тому для переривчастих режимів роботи (когнітивне заглушення) важлива не пікова потужність, а *середня* за 6 хвилин доза.

Результати розрахунку допустимого часу безперервної роботи за формулою (6) для кожного з чотирьох сценаріїв при фіксованих умовах (f = 2,4 ГГц, P_t = 10 Вт, d = 0,1 м, тканина – м'яз) наведено у табл. 8.

Таблиця 8. Допустимий час безперервної роботи
(f = 2,4 ГГц, P_t = 10 Вт, d = 0,1 м, норматив – загальний SAR)

Сценарій	**Тип антени / захист**	**SAR, Вт/кг (d=0,1 м)**	**Допуст. час t_{eff}, хв**
А	Штир, без екрана	397	< 0,01 – недопустимо
Б	QHA, без екрана	60	0,04 – недопустимо
В	Патч, 20 дБ	4,0	0,6 – дуже обмежено
Г	Патч + AMC, 30 дБ	0,40	6,0 – допустимо (межа)
Г+	Патч + AMC + щогла 0,5 м	0,01	> 60 – повністю безпечно

Заходи зниження SAR застосовуються послідовно: кожен наступний рівень діє на тлі вже досягнутого попередніми рівнями, тому їхній сумарний ефект є мультиплікативним, а не адитивним.

Рівень 1 (вибір типу антени)

Перехід від штирової до патч-антени знижує G_{eff} у 20 разів (з 2,0 до 0,10) і SAR пропорційно – у ~20 разів. Це фундаментальний конструктивний вибір, що є домінуючим за ефективністю серед усіх розглянутих заходів.

Рівень 2 (AMC-екранування)

Завдяки нульовому зсуву фази відбиття AMC додає +(10 – 15) дБ до FBR порівняно зі звичайною металевою площиною заземлення.

Параметри AMC для 2,4 ГГц: $a \approx 1(5 – 20)$ мм, $g \approx (1 – 3)$ мм, $h \approx (5 – 10)$ мм, ε_r = (2,2 – 4,4) [17, 19]. Де a – ширина металевих патчів у верхньому шарі AMC-структури; g – це ширина повітряного проміжку між сусідніми металевими патчами**;** h – висота діелектричної підкладки AMC.

Рівень 3 (геометричний виніс)

Виніс антени на гнучкій щоглі (0,3–0,5) м вище рівня плечей збільшує відстань від антени до торса оператора з d_1 = 0,1 м (монтаж на наплічнику) до

d_2 = (0,3–0,5) м. За законом SAR $\propto d^{-2}$ це відповідає зниженню SAR у $(d_2/d_1)^2$ від 9 до 25 разів. Для захисту голови рекомендована висота щогли ≥ 0,4 м.

Рівень 4 (RAM-покриття)

Шар радіопоглинаючого матеріалу (RAM) товщиною ≥ 3 мм на внутрішній поверхні кріплення антени до бронежилета поглинає залишкове ближньопольове випромінювання, що проникає крізь площину заземлення та АМС. Феромагнітні поглиначі (карбонільне залізо, феромагнітні ферити) ефективні у діапазоні (0,4 – 3) ГГц завдяки магнітному гістерезису; вуглецеві (графіт, сажа у полімерній матриці) — у діапазоні (1–10) ГГц завдяки омічним втратам. Загасання при товщині 3 мм становить (3–6) дБ (зниження SAR у (2–4) рази) з урахуванням двократного проходження хвилі крізь матеріал.

Рівень 5 (когнітивний режим)

Перехід від безперервного «білого шуму» до циклу «детектування → прицільне заглушення → пауза» знижує коефіцієнт заповнення K до (10 – 40) %, пропорційно зменшуючи часово-усереднений SAR:

$$SAR_{avg} = K \cdot SAR_{peak}.$$

Скорочення часу активного випромінювання на (60–90) % дозволяє для Сценарію В (патч, FBR = 20 дБ) дотриматись нормативу для тіла в цілому ICNIRP (0,4 Вт/кг) при $K \leq 10$ % без застосування АМС-екрана. Додатковим тактичним ефектом є зменшення демаскувального випромінювання та збільшення часу роботи від акумулятора у (3–10) разів [18].

8. Формування вимог до антенних підсистем

На підставі аналітичних оцінок SAR (розд. 5), порівняльного аналізу антенних конструкцій (розд. 6) та ієрархії конструктивних заходів (розд. 7) сформульовано 12 інженерних вимог В8.1–В8.12. Вимоги згруповані за чотирма напрямками: параметри діаграми спрямованості, рівні SAR та безпечна відстань, конструктивні та режимні рішення і верифікація. Вимоги сформульовані таким чином, щоб бути придатними як основа для розробки технічних умов або відомчого стандарту у частині електромагнітної безпеки особового складу.

Вимоги до діаграми спрямованості.

В8.1. Відношення «спереду–позаду» (FBR) у напрямку тіла оператора – не менше **–20 дБ** від максимуму при $P_t \leq 10$ Вт (без АМС); не менше **–25 дБ** при P_t = (10 – 30) Вт. Підвищення вимог при більшій потужності обумовлене лінійною залежністю SAR від P_t: збільшення потужності втричі при незмінному FBR = 20 дБ потроює SAR і виводить систему за нормативну межу.

В8.2. Застосування АМС-екрана є **обов'язковим** при $P_t > 10$ Вт або при монтажі антени на відстані менше 0,15 м від тіла. АМС додає **–**10 дБ до FBR порівняно зі звичайною площиною заземлення завдяки нульовому зсуву фази відбиття та придушенню поверхневих хвиль, усуваючи деструктивну інтерференцію між антеною і тілом. Сумарний рівень FBR з АМС: не менше **–30 дБ** (для f = 5,8 ГГц – **–35 дБ**, оскільки провідність тканини на цій частоті зростає у 4 рази порівняно з 433 МГц і пропорційно підвищує SAR).

В8.3. Для перекриття верхньої напівсфери та ефективного заглушення зенітно-пікіруючих БАС – антени з круговою поляризацією (QHA або патч з

90°-гібридним живленням). Кругова поляризація усуває провали JSR до (20–30) дБ, характерні для лінійної поляризації при маневруванні дрона. Ширина головного пелюстка по рівню −3 дБ: не менше 90° по азимуту і не менше 40° по зеніту (останнє забезпечує перекриття атак під кутами 50°–90° від горизонту без «мертвої зони» прямо над оператором).

В8.4. Осьове відношення (AR, Axial Ratio) антен з круговою поляризацією — не більше **3 дБ** у всій робочій смузі частот. При AR > 3 дБ поляризація стає суттєво еліптичною і переваги кругової поляризації зменшуються, що може призводити до втрат JSR до (5 – 8) дБ при несприятливій орієнтації дрона.

Вимоги до рівня SAR

В8.5. Конфігурація антенної підсистеми повинна забезпечувати при 6-хвилинному безперервному режимі роботи: локальний SAR (усереднений по 10 г суміжної тканини) **≤ 10 Вт/кг** та загальнотілесний SAR **≤ 0,4 Вт/кг** (нормативи ICNIRP, режим професійного опромінення). Два рівні захищають від різних ризиків: на рівні тіла в цілому – від системного перегріву організму, локальний – від вогнищевого перегріву органів з обмеженим кровопостачанням (кришталик ока, яєчка). Для манпак-систем більш жорстким і першочерговим є норматив на рівні тіла в цілому.

В8.6. Мінімальна відстань від фазового центра антени до тіла оператора, що забезпечує виконання нормативу В8.5 при $P_t \leq 10$ Вт: **≥ 0,3 м** для патч+АМС (SAR = 0,011 Вт/кг при $d = 0{,}3$ м, запас більше норми у 36 разів); **≥ 0,5 м** для QHA без АМС (SAR ≈ 0,6 Вт/кг при $d = 0{,}5$ м – вимагає доповнення когнітивним режимом). При застосуванні когнітивного режиму ($D \leq 40$ %) ці відстані можуть бути відповідно скорочені.

В8.7. Верифікація відповідності вимогам В8.5–В8.6 проводиться методом FDTD з використанням стандартизованих воксельних антропоморфних фантомів (AustinMan, Billie або аналогічних) відповідно до IEEE P2886 або IEC 62232 [12, 14]. Розрахунок виконується для конфігурації **«гіршого випадку»** (антена орієнтована так, що тильний або бічний пелюсток спрямований на критичний орган) **не менш, ніж для двох фантомів різної статури** – для врахування залежності SAR від анатомічних розмірів тіла оператора (відмінність може сягати (30–50) %).

Конструктивні та режимні вимоги

В8.8. Наплічні системи повинні передбачати виносну гнучку щоглу для підняття антени не менше ніж на **0,3 м** вище рівня плечей оператора (рекомендована висота (0,4 – 0,5) м як компроміс між безпекою та тактичною мобільністю). Щогла повинна витримувати експлуатаційні механічні навантаження та мати швидке роз'ємне з'єднання для складання при переміщенні.

В8.9. Внутрішня поверхня кріплення антени до наплічника або бронежилета – шар радіопоглинаючого матеріалу (RAM) **товщиною ≥ 3 мм** із загальним затуханням **≥ 6 дБ** на кожній робочій частоті системи. Вимога формується для кожного каналу окремо: матеріал, ефективний на 2,4 ГГц, може давати лише (2 – 3) дБ на 433 МГц, тому для широкосмугових систем може знадобитись двошарове покриття.

В8.10. При $P_t > 10$ Вт – обов'язкове застосування **когнітивного режиму** («детектування → прицільне заглушення → пауза») зі скороченням часу

активного випромінювання не менш ніж на **60 %** (коефіцієнт заповнення $K \leq 40$ %). Це знижує часово-усереднений SAR у 2,5 рази і більше: $SAR_{avg} = K \times SAR_{peak}$. На відміну від рівнів 1– 4, когнітивний режим є програмним заходом і може бути реалізований як оновлення прошивки без апаратних змін.

B8.11. Апаратний (незалежний від програмного забезпечення) контроль інтегральної дози опромінення за 6-хвилинний інтервал з **автоматичним попередженням оператору при досягненні 80 % від допустимого рівня SAR** (тобто при SAR_{avg} = 0,32 Вт/кг). Поріг 80 % залишає запас ~1,2 хв для використання заходів: зупинка системи, перехід у когнітивний режим або збільшення відстані. Апаратна реалізація є обов'язковою – програмний моніторинг може бути відключений або зависнути.

Вимоги до верифікації

B8.12. Верифікаційні вимірювання SAR у готовому виробі проводяться відповідно до IEC/IEEE 62209-1528:2020+AMD1:2026 з використанням ізотропного E-field зонду та рідинного фантома з тканиноподібним наповнювачем; для систем з кількома каналами – для кожного каналу окремо та в режимі одночасного випромінювання.

Метод FDTD (B8.7) та фізичне вимірювання є обов'язковими на різних етапах: FDTD – на етапі проєктування для оптимізації конструкції, фізичне вимірювання – на етапі приймальних випробувань для сертифікаційного підтвердження відповідності нормативам. Для операторів з активними медичними імплантами додатково застосовується ДСТУ EN 50527.

9. Висновки

1. Переносні системи РЕБ (5 – 30) Вт потребують спеціального нормування антенних підсистем з позиції ЕМБ оператора – жоден чинний стандарт не регулює цей сценарій ближньопольового впливу.

2. Зменшення ефективного коефіцієнта підсилення антени у напрямку тіла оператора є найефективнішим конструктивним заходом зниження SAR у розглянутих сценаріях: перехід від штирової антени до конфігурації патч+АМС зменшує G_{eff} у 200 разів (з 2,0 до 0,01) і SAR пропорційно. За скринінговою аналітичною моделлю (формула (5)) конфігурація патч+АМС відповідає критерію загальнотілесного SAR ≤ 0,4 Вт/кг вже при $d \geq$ (0,05–0,10) м. На відміну від збільшення дистанції або зниження потужності передавача, цей захід не суперечить тактичним вимогам до манпак-систем і реалізується без зміни вихідних параметрів.

3. Зростання провідності тканин у 4 рази при збільшенні частоти від 0,43 ГГц до 5,8 ГГц вимагає посилення FBR до ≥ 35 дБ або збільшення безпечної відстані до (0,2 – 0,3) м для каналу 5,8 ГГц.

4. Оптимальна конфігурація антенної підсистеми для манпак-систем РЕБ: патч або QHA з АМС + гнучка щогла висотою (0,3–0,5) м + когнітивний режим заглушення з часткою активного випромінювання ≤ (30–40) %. За скринінговою аналітичною моделлю таке поєднання відповідає критерію SAR ≤ 0,4 Вт/кг (норматив ICNIRP, загальнотілесний) при потужності до 10 Вт і відстані від (0,05–0,10) м. Для остаточного підтвердження відповідності нормативам необхідна FDTD-верифікація на воксельних антропоморфних фантомах відповідно до вимоги B8.7, оскільки скринінгова модель не враховує

ближньопольові ефекти, реальну анатомічну будову тіла та вплив елементів спорядження оператора.

5. Сформульовані 12 вимог (В8.1 – В8.12) і побудовані карти безпечних зон у просторі параметрів (P_t, d_{min}) можуть бути використані як основа для відомчого стандарту або ТУ у частині ЕМБ особового складу.

6. Точна верифікація отриманих аналітичних оцінок методом FDTD на воксельних антропоморфних фантомах відповідно до вимоги В8.7 запланована як самостійний подальший етап дослідження і дозволить уточнити значення локального SAR з урахуванням ближньопольових ефектів, реальної анатомічної будови тіла та впливу бронежилета на розподіл поля.

1. *Adamy D.* Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation. SciTech Publishing, 2006. 288 p. https://doi.org/10.1049/SBRA011E
2. *Jenn D. C.* Radar and Electronic Warfare Principles for the Non-Specialist. SciTech Publishing, 2018. 264 p.
3. *Насєдкін О. А., Шишацький А. В.* Засоби РЕБ з БПЛА: класифікація та аналіз. Зб. наук. праць ЦНДІ ЗЗ ЗСУ. 2021. № 4(96). С. 45–53.
4. ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). Health Physics. 2020. Vol. 118, No. 5. P. 483–524. https://doi.org/ 10.1097/HP.0000000000001210
5. IEEE Standard C95.1-2019. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields. IEEE. 2019. 312 p.
6. ДСН 3.3.6.096-2002. Державні СН і П при роботі з джерелами ЕМП. МОЗ України, 2003.
7. *Chauhan D., Kagathara H., Mewada H., Patel S., Kavaiya S., Barb G.* Nation's Defense: A Comprehensive Review of Anti-Drone Systems and Strategies. IEEE Access. 2025. Vol. 13. P. 44395–44428. https://doi.org/10.1109/access.2025.3550338
8. *Zidane Y., Silva J. S., Tavares G.* Jamming and Spoofing Techniques for Drone Neutralization: An Experimental Study. Drones. 2024. Vol. 8, No. 12. P. 743. https://doi.org/10.3390/drones8120743
9. *Gabriel S., Lau R. W., Gabriel C.* The dielectric properties of biological tissues. Physics in Medicine and Biology. 1996. Vol. 41, No. 11. P. 2271–2293. https://doi.org/ 10.1088/0031-9155/41/11/003
10. *Belyaev I.* Biophysical mechanisms for nonthermal microwave effects. In: Electromagnetic Fields in Biology and Medicine, Markov M. S. (Ed.). CRC Press / Taylor & Francis, Boca Raton, 2015. P. 49–67.
11. *Pennes H. H.* Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm. Journal of Applied Physiology. 1948. Vol. 1, No. 2. P. 93–122. https://doi.org/ 10.1152/jappl.1948.1.2.93
12. *Gosselin M.-C. et al.* Development of a new generation of high-resolution anatomical models for medical device evaluation: the Virtual Population 3.0. Physics in Medicine and Biology. 2014. Vol. 59. P. 5287–5303. https://doi.org/ 10.1088/0031-9155/59/18/5287
13. *Balanis C. A.* Antenna Theory: Analysis and Design. 4th ed. Wiley, 2016. 1096 p.
14. IEC 62232:2022. Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure. IEC, Geneva, 2022. 316 p.
15. *Salonen P., Hurme L.* A novel fabric WLAN antenna for wearable applications. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2003. Vol. 2. P. 700–703. https://doi.org/ 10.1109/APS.2003.1219332
16. *Zhu S., Langley R.* Dual-Band Wearable Textile Antenna on an EBG Substrate. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57, No. 4. P. 926–935. https://doi.org/ 10.1109/TAP.2009.2014527
17. *Sievenpiper D. et al.* High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1999. Vol. 47, No. 11. P. 2059–2074. https://doi.org/ 10.1109/22.798001
18. *Poisel R. A.* Introduction to Communication Electronic Warfare Systems. Artech House, 2008. 525 p.
19. *Costa F., Monorchio A., Manara G.* An overview of equivalent circuit modeling techniques of frequency selective surfaces and metasurfaces. Applied Computational Electromagnetics Society Journal. 2014. Vol. 29, No. 12. P. 960–976.

Стаття надійшла до редакції 13.08.2026;
Після доопрацювання 21.09.2026;
Прийнято до друку 28.09.2026.