

Тарас Назаровець

Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”,
вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, E-mail: taras.b.nazarovets@lpnu.ua

РОЗРАХУНОК УСЕРЕДНЕНОЇ ПИТОМОЇ ШВИДКОСТІ ПОГЛИНАННЯ ЛЮДСЬКОГО ОРГАНІЗМУ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ АНТЕНИ

Отримано: Березень 05, 2025 / Переглянуто: Березень 12, 2025 / Прийнято: Березень 19, 2025

© Назаровець Т., 2025

<https://doi.org/>

Анотація. Міжнародні рекомендації та стандарти щодо радіочастотної (РЧ) дозиметрії організму людини використовують усереднений питомий коефіцієнт поглинання тіла (WBA-SAR) як наближений показник для кількісного визначення підвищення температури тіла. У цій роботі пропонується аналіз РЧ дозиметрії організму людини при опроміненні заземленого тіла в дальній зоні ЕМ випромінювання в діапазоні частот 1-200 МГц на основі моделі циліндричної антени. Тіло людини представлено однорідною циліндричною монопольною антеною з втратами. Модель дає можливість дослідити вплив маси тіла, зросту людини та діелектричних властивостей складових організму.

Ключові слова: радіочастотна дозиметрія, циліндрична антена, еквівалентна модель, питома швидкість поглинання (SAR), усереднена SAR тіла (WBA-SAR).

Вступ

Одним із технологічних проривів сучасності є все більш широке використання електромагнітних (ЕМ) полів для різноманітного спектру застосувань у повсякденному житті. Водночас у суспільстві зростає занепокоєння можливим негативним впливом ЕМ полів. Надмірне опромінення всього тіла ЕМ полями радіочастотного діапазону (РЧД) призводить до підвищення внутрішньої температури людського тіла. Щоб вирішити цю проблему, були розроблені міжнародні стандарти [1] і рекомендації [2], які використовують WBA-SAR як наближену метрику для кількісного визначення підвищення температури тіла. WBA-SAR – це кількість потужності РЧД, яку поглинає людське тіло, усереднена на масу тіла. Оскільки WBA-SAR не може бути виміряна всередині людського тіла, то обчислювальні результати часто використовуються для зв'язку WBA-SAR із зовнішніми вимірюваними величинами, такими як падаюче електричне поле.

Огляд сучасних літературних джерел за тематикою публікації

Попередні дослідження РЧ дозиметрії використовували прості моделі людського тіла на основі звичайних геометричних форм, щоб можна було застосовувати аналітичні розв'язки або прості чисельні методи [3-4]. Наразі найпоширенішим способом обчислення WBA-SAR є застосування методу скінченних різниць у часовій області (FDTD) на реалістичних воксельних моделях людського тіла з високою роздільною здатністю [5-7]. Завдяки дослідженням РЧ дозиметрії тіла широко повідомлялося про аналогію між людським тілом і чвертьхвильовою монопольною антеною. Проте в аналізі результатів обчислень з точки зору теорії антени досягнуто небагато прогресу. Серед небагатьох досліджень, які зосереджуються на теорії антен, подібність між чвертьхвильовою монопольною антеною та заземленим людським тілом була описана в [8-10] на основі статистичного аналізу результатів обчислень на основі FDTD із застосуванням воксельних моделей людського тіла. Крім того, інші попередні дослідження використовували теорію циліндричної антени для розрахунку індукованого струму всередині людського тіла, коли

воно піддається впливу ЕМ полів. Модель циліндричної антени людського тіла була використана при аналізі впливу ЕМ поля від ліній електропередач [11] на основі напіваналітичного підходу. Для аналогічної частоти лінії електропередачі в [12] використано метод моментів (Method of Moments - MoM) для розрахунку індукційного струму в товсто-дротяній моделі тіла людини. Обидва підходи дали досить точні результати порівняно з результатами, отриманими за допомогою алгоритму FDTD на воксельних моделях людського тіла [13]. Метод двочленної апроксимації був використаний в [14] для частотного діапазону 50-200 МГц для розрахунку індукованого струму в моделі циліндричної дипольної антени ізольованого або незаземленого тіла людини з метою кількісного визначення величини струму, індукованого всередині тіла радіооператорів-аматорів. У цьому контексті ми пропонуємо напіваналітичний підхід, заснований на методі тричленної апроксимації, для аналізу WBA-SAR на основі представлення еквівалентної циліндричної монопольної антени заземленого людського тіла. Циліндрична монопольна антена представляє наближення тіла людини, що стоїть на землі, тоді як циліндрична дипольна антена представляє тіло людини у вільному просторі.

Заземлене людське тіло представлено еквівалентною циліндричною монопольною антеною, заземленою на нескінченній провідній площині [15]. Перші дослідження використовували прості геометричні форми, такі як циліндр, витягнутий сфероїд або кубоїд, для наближення людського тіла [3, 4]. На відміну від попередніх досліджень, наша модель не стосується використання циліндра для наближення фізичних атрибутів людського тіла; скоріше, це пов'язано з визначенням параметрів циліндричної монопольної антени, які виробляють еквівалентні значення WBA-SAR порівняно з обчисленнями за методом FDTD на реальних воксельних моделях людського тіла. Крім того, основною метою цього дослідження є не пошук альтернативних аналітичних виразів для WBA-SAR, оскільки сучасні електромагнітні обчислення дозволяють набагато кращий підхід. Замість цього запропоновано напіваналітичні вирази, які використовуються для аналізу РЧ дозиметрії всього тіла більш зручним і гнучким способом, ніж це можна зробити за допомогою методу FDTD. Крім того, запропонована модель об'єднує механізм того, як різні параметри людського тіла впливають на WBA-SAR. Аналіз зосереджується на впливі параметрів людського тіла, таких як зріст, вага та діелектричні властивості тканин, з додатковим дослідженням на вплив взуття (діелектричного прошарку). Цей підхід може бути застосовано для частотного діапазону нижче 200 МГц, який є важливим діапазоном частот у РЧ дозиметрії тіла людини, оскільки він містить резонансну частоту як заземлених, так і ізольованих людських тіл. У РЧ дозиметрії резонансна частота визначається як частота, на якій виникає максимальне значення WBA-SAR. Подібний підхід був застосований для аналізу WBA-SAR ізольованого або незаземленого людського тіла [15], для вивчення впливу антенної моделі людського тіла на комунікацію людського тіла (Human Body Communication - HBC) [16] і для визначення адекватності антенної моделі людського тіла [17]. Крім того, практичне застосування еквівалентного представлення антеною людського тіла виявилось точним для вимірювання струму при основі тіла [18].

В останнє десятиріччя активно розвивається підхід, який використовує переваги методу FDTD з поєднанням методу допоміжних джерел (Method of Auxiliary Sources – MAS). Перевагою даного методу є не тільки просування в область високих частот (4G/5G телефонія), але й можливість розрахунків WBA-SAR в сценаріях, які передбачають перебування людського організму в складному ЕМ оточенні [19-21].

В даній роботі отримано вираз для загального індукованого осьового струму та WBA-SAR еквівалентної циліндричної монопольної антени на основі тричленного підходу. Розраховано параметри еквівалентної циліндричної антени пов'язано з фізичними властивостями людського тіла. На основі поданих моделей проведено дослідження характеристик WBA-SAR в залежності від зросту і ваги людини, а також діелектричних параметрів складових людського організму.

Виклад основного матеріалу

Повний індукований осьовий струм моделі циліндричної антени. Будемо припускати, що

гармонічна вертикально поляризована плоска хвиля індукує обертово-симетричну густину струму всередині еквівалентної циліндричної монопольної антени, що представляє заземлене людське тіло [15]. Наближений аналітичний вираз для повного індукованого осьового струму всередині еквівалентної циліндричної монопольної антени висотою h , радіусом a та комплексною провідністю σ_{ω}^* базується на основі тричленної апроксимації осьового струму в неідеально провідній та навантаженій приймальній циліндричній антені і згідно з [16], [22], [23] і має вигляд:

$$I_{iz}(z) = V_0^e v(z) + U_0 u(z), \quad (1)$$

а V_0^e і U_0 визначаються як

$$V_0^e = -2I_{sc}(0)Z_A Z_L / (2Z_A + Z_L), \quad U_0 = E_0 / k_2, \quad (2)$$

де

$$v(z) = \frac{2ik_2}{\gamma \zeta_0 \Phi_{dR} \cos(\gamma h)} [\sin \gamma(h - |z|) + T_U (\cos \gamma z - \cos \gamma h) + T_D (\cos(k_2 z / 2) - \cos(k_2 h / 2))], \quad (3)$$

$$u(z) = (4i\pi / \zeta_0) [H_U (\cos \gamma z - \cos \gamma h) + H_D (\cos(k_2 z / 2) - \cos(k_2 h / 2))], \quad (4)$$

а E_0 (Vm^{-1}) – напруженість падаючого електричного поля на поверхню циліндра у вольт/метр; k_2 – хвильове число вільного простору; $Z_A = 1/(2v(0))$ (в омах Ω) – імпеданс фіксованої точки циліндра, коли вона є активною; Z_L (в омах Ω) – опір навантаження в основі циліндра; $I_{sc}(0) = U_0 u(0)$ – струм в основі, коли навантаження відсутнє; і ζ_0 – імпеданс вільного простору. Вирази частотно-залежних коефіцієнтів $\Phi_{dR}, T_U, T_D, H_U, H_D$ у формулах (3) і (4) наведені в [16], вони представляють інтеграли, які визначаються чисельно. На підставі [22], неідеальна провідна природа еквівалентної циліндричної антени характеризується комплексною сталою поширення γ , яка була визначена як

$$\gamma = k_2 \sqrt{1 - 4i\pi z^i / (k_2 \zeta_0 \Phi_{dR})}, \quad (5)$$

де z^i (Ωm^{-1}) (ом/метр) – поверхневий опір на одиницю довжини циліндра, який згідно [19] визначається як

$$z^i = \frac{\kappa}{2\pi a \sigma_{\omega}^*} (J_0(ka) / J_1(ka)) = r^i + ix^i, \quad (6)$$

де J_0 і J_1 – функції Бесселя нульового та першого порядку відповідно. Параметр κ визначається як

$$\kappa = \sqrt{-i\omega \epsilon_0 \mu_0 (\sigma_{\omega}^* / \epsilon_0 - i\omega - 4\pi z^i / (\mu_0 \Phi_{dR}))}, \quad (7)$$

де ϵ_0 – діелектрична проникність вільного простору, μ_0 – магнітна проникність вільного простору, а ω – кутова частота.

Загальна потужність, що розсіюється всередині циліндра. Загальна середня потужність розсіювання P_{diss} всередині циліндра може бути отримана як [24]

$$P_{diss} \simeq \frac{1}{2} \int_0^h r^i |I_{1z}(z)|^2 dz, \quad (8)$$

де r^i – дійсна частина z^i в (6). WBA-SAR визначається як загальна середня РЧ потужність, яку поглинає тіло людини, поділена на загальну масу тіла [5]. Таким чином, для однорідного циліндра висотою h , радіусом a , густиною ρ і вагою $W_c = \rho \pi a^2 h$ загальна середня потужність на одиницю маси $WSAR_{cyl}$, яка поглинається, визначається формулою

$$SAR_{cyl} = \frac{P_{diss}}{W_c} = \frac{r^i}{2\pi \rho a^2 h} \int_0^h |I_{1z}(z)|^2 dz, \quad (9)$$

Параметри моделі еквівалентної циліндричної антени. Параметри моделі еквівалентної циліндричної монопольної антени були визначені на основі анатомічних параметрів людського тіла [8]. Такими параметрами є її радіус a (м), густина ρ (kgm^{-3}), висота h (м) і комплексна

провідність σ_{ω}^* (Сіменс/м – Sm^{-1}) матеріалу, з якого утворено циліндр. Крім того, анатомічними параметрами людського тіла, які використовуються, є вага W (кг), зріст H (м), середня щільність ρ_m (kgm^{-3}) і комплексна провідність м'язів σ_{mus}^* (Sm^{-1}). Щільність м'язової тканини була обрана через те, що вона є однією з основних тканин в організмі; а також широко поширене використання м'язової тканини в однорідних моделях людського тіла.

Використовуючи аналогічні міркування щодо моделі еквівалентної циліндричної дипольної антени для представлення ізольованого людського тіла в [15], параметри циліндра визначаються як

$$a = L_1 \sqrt{W / (\pi \rho_m H)}, \quad (10)$$

$$h = H, \quad (11)$$

$$\sigma_{\omega}^* = L_2 \frac{2x}{3-x} \sigma_{mus}^*, \quad (12)$$

$$\rho = L_3 (\rho_m / x), \quad (13)$$

де L_1, L_2 і L_3 – константи пропорційності; σ_{mus}^* було визначено на основі дисперсії Коула [25]; [26], $\rho_m \approx 1050 \text{kgm}^{-3}$; а x є функцією безжирової маси тіла людини, яка була визначена в [15]. Параметр x для чоловіків був визначений як

$$x = 0.321 + \frac{1}{W} (33.92H - 29.53), \quad (14)$$

а для жінок як

$$x = 0.295 + \frac{1}{W} (41.81H - 43.29). \quad (15)$$

Як показано в (14) і (15), специфічний параметр x є функцією ваги та зросту людини. Таким чином, було припущено, що x корелює зі співвідношенням жиру до м'язів людини, що впливає на значення WBA-SAR [27].

Для заданої частоти, зросту та ваги людини вираз $WSAR_{cyl}$ в (9) спрощується до функції трьох невідомих, а саме L_1, L_2 і L_3 . Значення цих невідомих оцінюються шляхом ітераційного порівняння значення $WSAR_{cyl}$ з відомими значеннями WBA-SAR, обчисленими методом FDTD, для трьох воксельних моделей, що представляють дорослого чоловіка, дорослу жінку та дитину. Для частотного діапазону 1-200 МГц, $Z_L = 0$ і $E_0 = 1 \text{Vm}^{-1}$, значення невідомих, які створювали найменшу середню різницю між $WSAR_{cyl}$ і відомим WBA-SAR, були прийняті як значення L_1, L_2 і L_3 . Дані для значень WBA-SAR на основі методу FDTD були взяті з літератури [5], [27]. Було виявлено, що значення констант пропорційності залежить від статі та віку людей.

Результати та обговорення

Дослідження характеристик розподілу струму в антені. Розглянемо поведінку струмів, які наводяться на антені при падінні плоскої хвилі з амплітудою $E^{inc} = 1 \text{V/m}$. Навколишнє середовище і параметри людського організму характеризуються наступними величинами: $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{Ф/м}$ – діелектрична проникність вільного простору, $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6} \text{Н/м}$ – магнітна проникність вільного простору, $\sigma = 11.5 [\text{S/m}]$ – середня провідність людського тіла, $\epsilon_r = 55.0$ – відносна середня діелектрична проникність людського тіла, $Z_L = 0$ – опір навантаження основи тіла, $\zeta_0 = 120\pi [\Omega]$ (ом) – імпеданс вільного простору. Значення частоти f змінюються в діапазоні від 1 МГц до 200 МГц.

На рис. 1 наведено значення амплітуди струму в точці $z = h/2$, де h – висота антени, що моделює людське тіло в стоячому положенні. Значення наведено трьох різних висот в діапазоні частот, який розглядається. Як і слідує з фізичних властивостей лінійної антени, максимальна амплітуда струму спостерігається для антени з висотою $h = 2.0$ м. Характерним є також зміщення максимуму струму в область вищих частот для антен меншої довжини. Адекватність отриманих результатів може бути підтверджена обчисленнями резонансних частот [28].

На рис. 2 наведено загальну характеристику розподілу струмів на антені у випадку змінної частоти. Дані демонструються для частот від 1 МГц до 200 МГц з кроком 20 МГц.

Як видно з рисунку, значення струму не є осцилюючими функціями для даного діапазону частот, що є важливо при числовому інтегруванні в процесі визначення WBA-SAR (формула (9)).

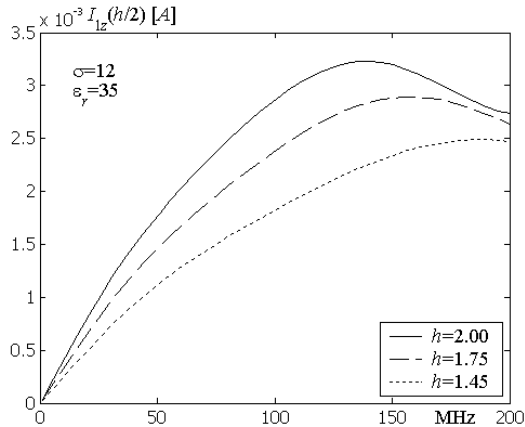


Рис. 1. Залежність величини струму на антені в середній точці від її висоти.

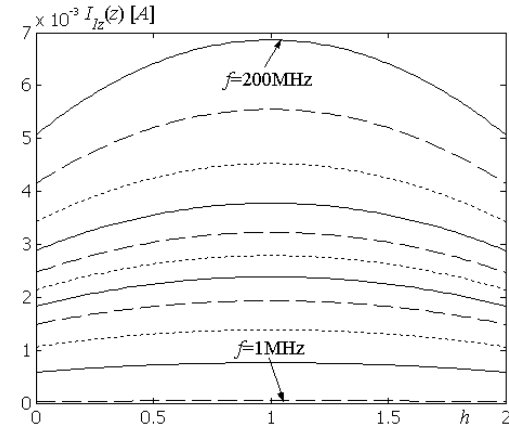


Рис. 2. Амплітуди струмів для різних частот заданого діапазону.

Вплив зросту та ваги. Напіваналітичний підхід, використаний тут для аналізу еквівалентної циліндричної антени та обчислення загального осьового струму, був доведений як точний у аналізі циліндричної антени, за умови виконання умови $k_2 a \ll 1$ і $h \gg a$. Для еквівалентних циліндричних антен, що досліджуються, умова може бути виконана для діапазону частот нижче 200 МГц, який є важливим діапазоном частот у радіочастотній дозиметрії людського тіла, оскільки містить резонансні частоти.

На рис. 3 наведено результати визначення WBA-SAR для заданого діапазону частот діапазону частот при середній провідності тіла $\sigma = 12.0$ і відносній діелектричній проникності $\epsilon_r = 35.0$ [29]. Середня густина людського тіла задається як $\rho = 1050$ кг/м³.

Отримані результати демонструють нелінійну залежність WBA-SAR від частоти, а максимальне значення, яке досягається рівне 1.28×10^{-2} мВт/кг, 0.725×10^{-2} мВт/кг та 0.397×10^{-2} мВт/кг для висот $h = 2.00$ м, $h = 1.75$ м та $h = 1.45$ м відповідно, що не суперечить природі ЕМ поглинання.

Було проведено розрахунки для випадку збільшення масової частки жирової тканини, що приводить до зменшення густини. Числові результати для $\rho = 900$ кг/м³ показують, що в цьому випадку величина WBA-SAR дорівнює 1.274×10^{-2} мВт/кг, тобто не сильно зменшується відносно зміни ваги (14% зміна у вазі і лише 1% у зміні WBA-SAR).

Вплив діелектричних властивостей тканин. Для того, щоб дослідити залежність WBA-SAR від діелектричних властивостей тіла, було проведено числові розрахунки з різними значеннями провідності. Результати наведено на рис. 4 для значень σ_{ω}^* , які збільшені і зменшені вдвічі у порівнянні з величиною σ на рис. 3.

При зменшенні провідності (криві з маркером) значення WBA-SAR зростає, оскільки більша частина енергії поглинається людським тілом. Так для максимальних значень WBA-SAR для

частоти $f = 200$ МГц ці величини складають $1.623 \times 10^{-2} \mu\text{W/kg}$, $1.283 \times 10^{-2} \mu\text{W/kg}$ і $0.991 \times 10^{-2} \mu\text{W/kg}$ для половинного, звичайного і подвоєного значення σ .

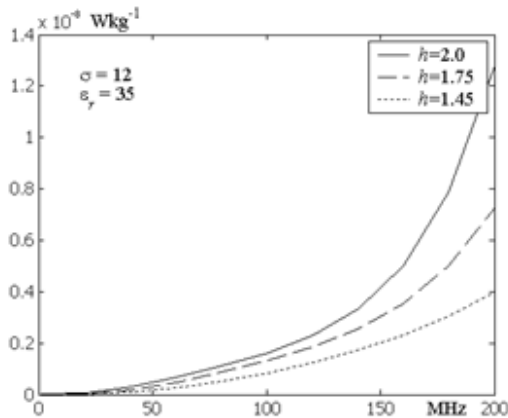


Рис. 3. Значення WBA-SAR (у ват/кг) для різних довжин антени, що моделює людське тіло

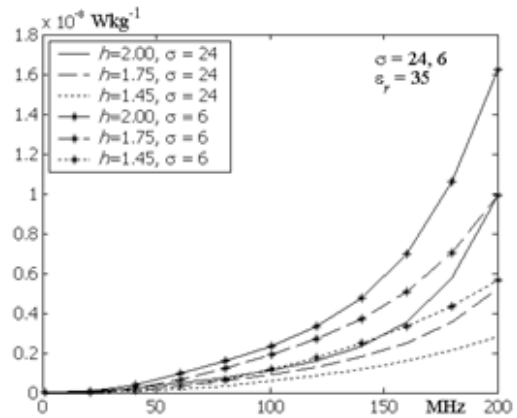


Рис. 4. Значення WBA-SAR (у ват/кг) при різних значеннях провідності людського тіла

Висновки

РЧ дозиметрію людського тіла проаналізовано на основі представлення еквівалентної циліндричної антени для випадку нормального падіння плоскої хвилі у частотному діапазоні до 200 МГц. Еквівалентне представлення моделі людського тіла у вигляді циліндричної антени параметризовано у відповідності результатів методу FDTD для трьох реальних воксельних моделей [28]. Обговорено вплив росту, ваги та діелектричних властивостей тіла на значення WBA-SAR. Запропонований підхід може бути застосований для дослідження впливу ЕМ випромінювання в робочому діапазоні частот до 200 МГц.

Перелік використаних джерел

- [1] IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz, IEEE Standard C95-1, 2005.
- [2] ICNIRP (International Commission on Non-Ionising Radiation Protection), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," Health Phys., vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998.
- [3] C. H. Durney, "Electromagnetic dosimetry for models of humans and animals: A review of theoretical and numerical techniques," Proc. IEEE, vol. 68, no. 1, pp. 33-40, Jan. 1980. <https://doi.org/10.1109/PROC.1980.11578>
- [4] O. P. Ghandi, "State of the knowledge for electromagnetic absorbed dose in man and animals," Proc. IEEE, vol. 68, no. 1, pp. 24-32, Jan. 1980., <https://doi.org/10.1109/PROC.1980.11577>
- [5] P. J. Dimbylow, "FDTD calculations of the whole-body average SAR in an anatomically realistic voxel model of the human body from 1 MHz to 1 GHz," Phys. Med. Biol., vol. 42, no. 3, pp. 479-490, 1997. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/42/3/003>
- [6] P. J. Dimbylow, "Fine resolution calculations of SAR in the human body for frequencies up to 3 GHz," Phys. Med. Biol., vol. 47, no. 16, pp. 2835-2846, 2002. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/47/16/301>
- [7] J. Wang, O. Fujiwara, S. Kodera, and S. Watanabe, "FDTD calculation of whole-body average SAR in adult and child models for frequencies from 30 MHz to 3 GHz," Phys. Med. Biol., V. 51, №17, pp. 4119-4127, 2006. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/51/17/001>
- [8] A. Hirata et al, "Estimation of the whole-body averaged SAR of grounded human models for plane wave exposure at respective resonance frequencies," Phys. Med. Biol., vol. 57, no. 24, p. 8427, 2012. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/57/24/8427>
- [9] A. Hirata, O. Fujiwara, T. Nagaoka, and S. Watanabe, "Estimation of whole-body average SAR in human models due to plane-wave exposure at resonance frequency," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 52, no. 1, pp. 41-48, Feb. 2010. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2009.2035613>

- [10] K. Yanase and A. Hirata, "Effective resistance of grounded humans for whole-body averaged SAR estimation at resonance frequencies," *Prog. Electromagn. Res. B*, vol. 35, pp. 15-27, 2011. <https://doi.org/10.2528/PIERB11082511>
- [11] R. W. P. King and S. S. Sandler, "Electric fields and currents induced in organs of the human body when exposed to ELF and VLF electromagnetic fields," *Radio Sci.*, vol. 31, no. 5, pp. 1153-1167, 1996. <https://doi.org/10.1029/96RS01313>
- [12] D. Poljak and V. Roje, "Currents induced in human body exposed to the power line electromagnetic field," *Proc. 20th Annu. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, 1998, vol. 6, pp. 3281-3284. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.1998.746198>
- [13] O. P. Ghandi and J. Chen, "Numerical dosimetry at power-line frequencies using anatomically based models," *Bioelectromagn. Suppl.*, vol. 13, no. SI, pp. 43-60, 1992. <https://doi.org/10.1002/bem.2250130706>
- [14] R. W. P. King, "Electric current and electric field induced in the human body when exposed to an incident electric field near the resonant frequency," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 48, no. 9, pp. 1537-1543, Sep. 2000. <https://doi.org/10.1109/22.869005>
- [15] B. Kibret, A. K. Teshome, and D. T. H. Lai, "Analysis of the whole-body averaged specific absorption rate (SAR) for far-field exposure of an isolated human body using cylindrical antenna theory," *Prog. Electromagn. Res. M*, vol. 38, pp. 103-112, 2014. <https://doi.org/10.2528/PIERM14072201>
- [16] B. Kibret, A. K. Teshome, and D. T. H. Lai, "Human body as antenna and its effect on human body communications," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 148, pp. 193-207, 2014. <https://doi.org/10.2528/PIER14061207>
- [17] B. Kibret, A. K. Teshome, and D. T. H. Lai, "Characterizing the human body as a monopole antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 10, pp. 4384-5392, 2015. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2456955>
- [18] E. Asian and O. P. Gandhi, "Human-equivalent antenna for electromagnetic fields," U.S. Patent 5 394 164, Feb. 28, 1995.
- [19] T. Nozadze, V. Jeladze, R. Zaridze, "Mobile Antenna Matching Study Considering Different Holding Positions at 2100 MHz Frequency", XXVIth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory DIPED-2020, Tbilisi, Georgia, September 15-18, pp. 121-125, 2020. <https://doi.org/10.1109/DIPED49797.2020.9273363>
- [20] V. Jeladze, T. Nozadze, I. Petoiev-Darsavelidze, and B. Partsvania, "Mobile phone antenna-matching study with different finger positions on an inhomogeneous human model," *Electromagnetic Biology and Medicine*, vol. 38, no. 4, pp. 297-306, 2019. <https://doi.org/10.1080/15368378.2019.1641721>
- [21] T. Nozadze, V. Jeladze, V. Tabatadze, I. Petoiev, M. Prishvin, R. Zaridze, "Base Station Antenna's EM Exposure Study on a Homogeneous Human Model Located Inside the Car," XXII-nd International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory DIPED 2017, Dnipro, Ukraine, September 25-28, pp. 209-213, 2017 <https://doi.org/10.1109/DIPED.2017.8100603>
- [22] R. W. P. King and T. T. Wu, "The imperfectly conducting cylindrical transmitting antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 14, no. 5, pp. 524-534, Sep. 1966. <https://doi.org/10.1109/TAP.1966.1138733>
- [23] C. D. Taylor, W. H. Charles, and A. A. Eugene, "Resistive receiving and scattering antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 15, no. 3, pp. 371-376, May 1967. <https://doi.org/10.1109/TAP.1967.1138944>
- [24] R. W. P. King and T. T. Wu, "The imperfectly conducting cylindrical transmitting antenna: Numerical results," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-14, no. 5, pp. 535-542, Sep. 1966. <https://doi.org/10.1109/TAP.1966.1138753>
- [25] S. Gabriel, R. Lau, and C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues," *Phys. Med. Biol.*, vol. 41, no. 11, pp. 2271-2293, 1996. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/41/11/003>
- [26] H. J. Krzywicki and K. S. Chinn, "Human body density and fat of an adult male population as measured by water displacement," *Amer. J. Clin. Nutr.*, vol. 20, no. 4, pp. 305-310, 1967. <https://doi.org/10.1093/ajcn/20.4.305>
- [27] P. Dimbylow, "Resonance behaviour of whole-body averaged specific energy absorption rate (SAR) in the female voxel model, NAOMI," *Phys. Med. Biol.*, vol. 50, no. 17, p. 4053, 2005. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/50/17/009>
- [28] B. Kibert, A. K. Teshome, D.T. H. Lai, "Cylindrical antenna theory for the analysis of whole-body average specific absorption rate," *IEEE Trans. Antenna & Propag.*, vol. 63, no. 11, pp. 5224-5229, Nov. 2015. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2478484>
- [29] S. Gabriel, R. W. Lau, C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric

models for the dielectric spectrum of tissues,” Phys. Med. Biol., vol. 41, pp. 2271. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/41/11/003>

Taras Nazarovets

Department of Computer Aided Design Systems, Lviv Polytechnic National University,
S. Bandery St., 12, Lviv, Ukraine, E-mail: taras.b.nazarovets@lpnu.ua

**CALCULATION OF THE AVERAGED SPECIFIC ABSORPTION RATE OF THE HUMAN
ORGANISM BASED ON THE CYLINDRICAL ANTENNA MODEL**

Received: March 05, 2025 / Revised: March 12, 2025 / Accepted: March 19, 2025

© Nazarovets T., 2025

Abstract. International recommendations and standards for radiofrequency (RF) dosimetry of the human body use the body-averaged specific absorption coefficient (WBA-SAR) as an approximate indicator for quantifying body temperature increase. This paper proposes an analysis of the RF dosimetry of the human body during irradiation of a grounded body in the far zone of EM radiation in the frequency range of 1-200 MHz based on the cylindrical antenna model. The human body is represented by a homogeneous cylindrical monopole antenna with losses. The model makes it possible to study the influence of body mass, human height and dielectric properties of body components.

Keywords: radiofrequency dosimetry, cylindrical antenna, equivalent model, specific absorption rate (SAR), body-averaged SAR (WBA-SAR).