ARTICLE

DOI 10.36074/grail-of-science.10.01.2025.040

ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ У РАДІОДІАПАЗОНІ

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ГРУПА:

Кудряшов Віктор Євгенович
канд. техн. наук, ст. наук. спів.,
старший науковий співробітник
Інститут радіофізики та електроніки, Національна академія наук України ім. О.Я. Усікова, Україна

Коломійцев Олексій Володимирович
д-р техн. наук, професор, Заслужений винахідник України,
професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» , Україна

Комаров Володимир Олександрович
канд. техн. наук, Заслужений винахідник України,
провідний науковий співробітник
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Україна

Катунін Альберт Миколайович
канд. техн. наук, ст. наук. спів.,
науковий співробітник науково-дослідного відділу
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна

Слободенюк Юрій Валентинович
провідний науковий співробітник – провідний інженер-випробувач
Навчально-науковий випробувальний полігон високотехнологічного озброєння та військової техніки, Україна

Поринос Євген Олександрович
начальник науково-дослідного відділу
Навчально-науковий випробувальний полігон високотехнологічного озброєння та військової техніки, Україна

2025 Авторські права захищені | Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License

Шупило Руслан Миколайович
провідний науковий співробітник – провідний інженер-випробувач
Навчально-науковий випробувальний полігон високотехнологічного озброєння та військової техніки, Україна

Хома Василь Васильович
старший науковий співробітник – старший інженер-випробувач
Навчально-науковий випробувальний полігон високотехнологічного озброєння та військової техніки, Україна

Співак Тарас Анатолійович
науковий співробітник – старший інженер-випробувач
Навчально-науковий випробувальний полігон високотехнологічного озброєння та військової техніки, Україна

Луценко Антон Сергійович
викладач кафедри
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна

Сургай Володимир Іванович
молодший науковий співробітник науково-дослідного відділу
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна

Анотація. *Теплове випромінювання об'єктів відрізняється від випромінювання, що генерується тим, що теплове випромінювання займає дуже широкий діапазон хвиль та його потужність і спектральна щільність не залишаються постійними та безперервно флуктують. В статті розкрито особливості теплового випромінювання об'єктів у радіодіапазоні. Розглянута фізична сутність теплового випромінювання будь-яких речовин, об'єктів. Представлені основні закони теплового випромінювання. Надані розрахунки спектральної щільності випромінювання об'єкта у залежності від частоти та його температури.*

Ключові слова: *теплове випромінювання, об'єкт, довжина хвилі, спектральна щільність, частота, температура, інтенсивність, потужність, діапазон електромагнітних хвиль.*

Вступ. Відомо, що нагріті тіла (об'єкти) випромінюють світлові хвилі, інфрачервоні (ІЧ) хвилі та ультрафіолетові, довжина хвиль яких коротше, ніж у попередніх. Інтенсивність теплового випромінювання (ТВ) безперервно змінюється. Величина та швидкість змін непередбачена. Отже, ТВ відрізняється від випромінювання, що генерується. По-перше ТВ займає дуже широкий діапазон хвиль. По-друге, потужність та спектральна щільність ТВ не залишаються постійними та безперервно флуктують.

Таким чином, розгляд особливостей ТВ об'єктів у радіодіапазоні є актуальнім науковим завданням.

All rights reserved | Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License

Основна частина. Одним із найбільш важливих законів ТВ є закон, який виражає залежність спектральної щільності випромінювання від його частоти і температури випромінювача та описується формулою Планка:

$$R_0 = \frac{2\pi f^3}{c^2\left[\exp\left(\frac{f}{KT}\right)-1\right]}, \quad (1)$$

де $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ *– постійна Планка (Дж·с);* $c = 3 \cdot 10^8$ *– швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль (м/с);* $K = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *– постійна Больцмана (Дж·град);* T *– абсолютна температура випромінювача (К);* f *– частота (Гц);* R_0 *– спектральна щільність випромінювача, яка дорівнює потужності випромінюваної на частоті* f *у смузі 1 Гц з площини* $1\ м^2$ *випромінювача.*

Графіки залежності спектральної щільності випромінювання від частоти f та температури *T* наведені на рис. 1, де енергія випромінювання розподілена по спектру частот нерівномірно. Спектральна щільність досягає максимальних значень при певних значеннях частот, зменшуючись із підвищенням і зниженням частоти.

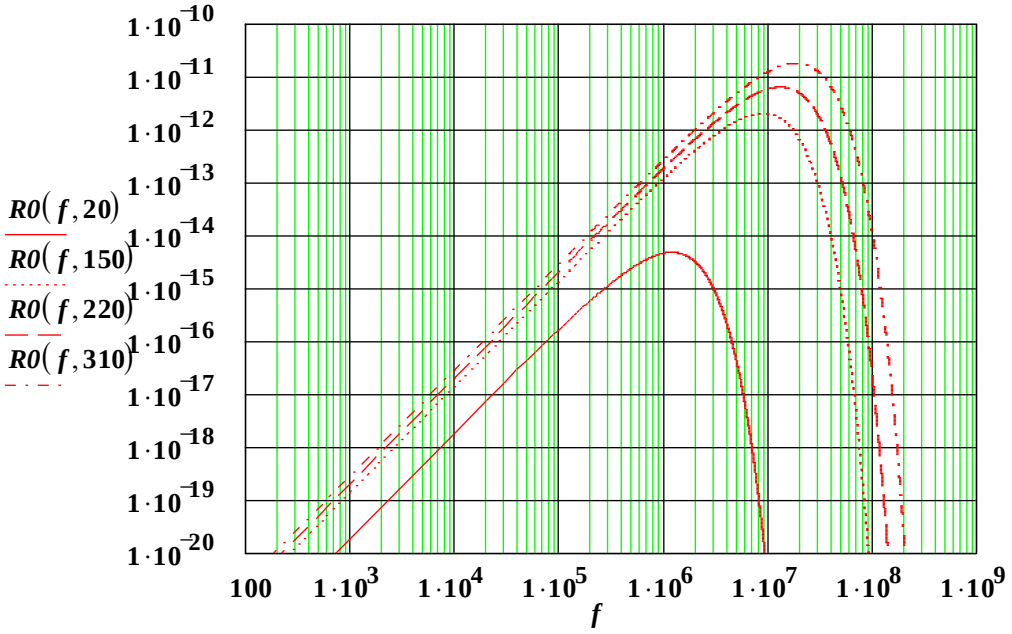


Рис. 1. Залежність спектральної щільності випромінювання від частоти та температури

На рис. 1 перша крива, позначена безперервною лінією відображає спектральну щільність випромінювання R_0 неба. Друга (крапки) та третя (тире) криві вказують на значення R_0 відповідно «спокійної» води та гладкого сухого ґрунту. Четверта крива (точка та тире) – шершава поверхня. Для неба, при куті зондування 0°(надір), крива 1 має найбільше значення R_0 ~ 1 ГГц, а по воді – 10 ГГц. З підвищенням температури об'єктів максимуми кривих переміщуються у право, у область більших частот f.

 Авторські права захищені | Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License

Частота, на якій спектральна щільність максимальна $f_м$ (МГц), може бути визначена за формулою Вина наступним чином:

$$f_м = 1{,}03 \cdot 10^5 T. \quad (2)$$

За рис. 1 та виразом *(2)* можливо заключити те, що для випромінювачів, що мають температуру вище кімнатної, максимум спектральної, щільності доводиться на діапазони видимих та ІЧ хвиль. Спектральна щільність у діапазонах сантиметрових та міліметрових хвиль у тисячі разів нижче максимальної. З підвищенням температури спектральна щільність випромінювання на усіх частотах зростає та зростає і загальна потужність випромінювання.

Розрахувати потужність ТВ в усьому діапазоні електромагнітних хвиль можливо за наступною формулою:

$$P = 10^6 \sigma T^4 \ \left(\frac{мВт}{м^2}\right), \quad (3)$$

де $\sigma = 5{,}71 \cdot 10^{-8}$ *– постійна Стефана* $\left(\frac{Вт}{(м^2 град^4)}\right)$.

На рис. 2 наведено Залежність спектральної щільності випромінювання f_{max} та потужності ТВ *P* від абсолютної температури об'єкту *T*.

За рис. 2 перша крива (безперервна) побудована за законом Віна, вираз *(2)*. Друга крива (точки) відображає потужність ТВ об'єктів. З ростом температури об'єктів випромінювання перша та друга криві зростають.

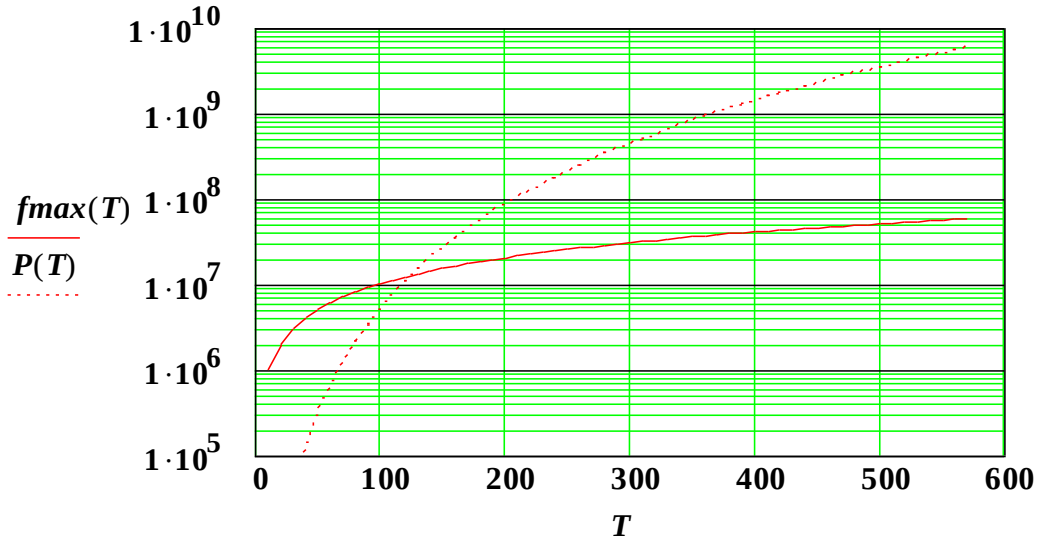


Рис. 2. Залежність спектральної щільності випромінювання та потужності ТВ від абсолютної температури об'єкту

Сумарна потужність ТВ може бути дуже великою, проте на радіодіапазон доводиться лише дуже мала її частина. Так, при кімнатній температурі ідеальний випромінювач з площею 1 $м^2$ випромінює потужність, яка дорівнює 478 Вт.

All rights reserved | Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License

Максимум спектральної щільності доводиться на хвилю 9,6 мікрон. На хвилях довше одного міліметра у цьому випадку випромінюється потужність 8 мВт, більше тисячної частки відсотка загальної потужності. Частина потужності, яка може бути сприйнята приймачем, ще менше, так як сучасні приймачі не можуть одночасно приймати сигнали в усьому радіотехнічному діапазоні.

У наведеному прикладі частина потужності, яку може сприйняти приймач, лежить у межах від 20 мкВт до 2-3 мВт. Зі збільшенням температури випромінювача частка потужності, яка припадає на радіодіапазон, зменшується. Спостерігається, що спектральна щільність в області ІЧ та світлових хвиль зростає набагато швидше, ніж спектральна щільність потужності у радіотехнічному діапазоні. Незважаючи на відносно малу потужність теплового радіовипромінювання (завдяки високій чутливості сучасних радіоприймачів та малому загасанню радіохвиль у атмосфері), його вдається приймати на великих відстанях, ніж більш потужні ІЧ та світлові випромінювання.

Необхідно відзначити, що формула *(1)* справедлива лише для ідеального випромінювача, так званого абсолютно чорного тіла (АЧТ). Для усіх реальних випромінювачів спектральна щільність випромінювання нижче, ніж у АЧТ, нагрітого до тієї ж температури. Однак, за відомою спектральною щільністю випромінювання АЧТ можливо розрахувати спектральну щільність випромінювання реального випромінювача за наступною формулою:

$$R = \alpha R_0, \tag{4}$$

де R – спектральна щільність випромінювання реального випромінювача; α *– коефіцієнт поглинання, який показує, яку частку падаючого потоку опромінення поглинає даний реальний випромінювач, якщо його опромінювати на тій же частоті, на якій визначається спектральна щільність (*$\alpha < 1$*).*

Формула *(4)* є математичним записом закону Кірхгофа, який встановлює зв'язок між властивостями випромінювання та поглинання. Чим краще тіло поглинає випромінювання на будь-якої частоті, тим більше, буде спектральна щільність випромінювання на тій же частоті.

Таким чином, ідеальний випромінювач – АЧТ є і ідеальним поглиначом.

Для обчислення спектральної щільності випромінювання у сантиметровому та міліметровому діапазонах хвиль немає необхідності користуватися формулою Планка. Дійсно, на частотах радіодіапазону показник ступеня числа exp (1) стає дуже малим. Так, при f=100 000 МГц (довжина хвилі 3 мм) та T = 400°, $\frac{f}{kT} \approx 0{,}012$. Скориставшись відомим наближеним виразом:

$$e^x \approx 1 + x, \tag{5}$$

коли $x \ll 1$, легко привести формулу Планка до наступного вигляду:

$$R_0 = \frac{2\pi}{\lambda^2} kT, \tag{6}$$

де λ *– довжина хвилі випромінювання*

 Авторські права захищені | Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License

Результати розрахунку за виразами *(1)* та *(6)* наведені на рис. 3. Крива перша (безперервна) і таж сама, як і на рис. 1 відображає значення R_0 за формулою Планка. Крива друга (точки) побудована за виразом *(6)* – формула Релєя-Джинса. Таким чином, спостерігається суттєве зростання величин R_0 на частоті більшої 1 ПГц (0,3 мкм).

Надалі будуть розглядатися можливі робочі діапазони довжин хвиль приладу 3 см, 8 мм та 3 мм. Спектральні щільності випромінювання R_0 відповідно до вказаних діапазонів дорівнюють: $2{,}11 \cdot 10^{-17}$, $2{,}88 \cdot 10^{-16}$ та $1{,}7 \cdot \cdot 10^{-15}$ (Вт/(Гц м ^{2})). Отже, найбільше значення R_0 у 3 мм діапазоні довжин хвиль. За формулою *(6)* Релея-Джинса можливо точно оцінити спектральну щільність випромінювання у сантиметровому та міліметровому діапазонах хвиль для об'єктів, що мають температуру більше 100 *K*.

За формулою *(6)* можливо заключити, що потужність радіотеплового випромінювання прямо пропорційна температурі випромінювача та обернено пропорційна квадрату довжини хвилі. Для радіотеплолокації краще використовувати хвилі міліметрового та субміліметрового діапазонів, ніж хвилі сантиметрового та дециметрового діапазонів, на яких випромінювання слабкіше.

Другий співмножник правій частині (1.6, kT) дорівнює спектральної щільності потужності теплових шумових струмів активного опору $G_{ш}$:

$$G_{ш} = kT. \tag{7}$$

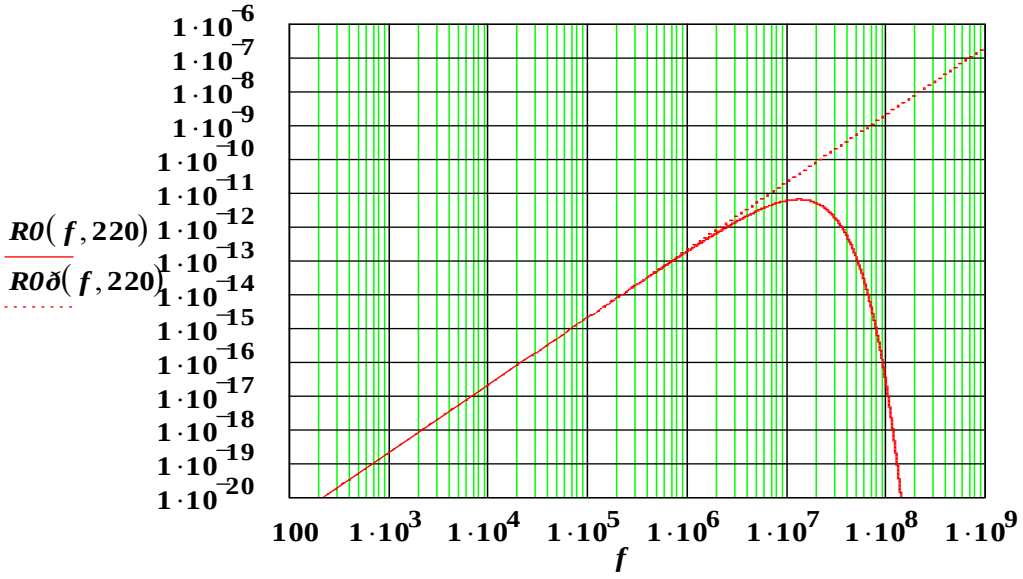


Рис. 3. Залежність спектральної щільності випромінювання R_0 від частоти f та температури *T,* за формулами Планка та Релея-Джинса

Треба відмітити деякі властивості теплового шуму активних опорів. Цей шум генерується у будь-яких активних опорах, його спектральна щільність постійна від дуже низьких частот до частот міліметрового та субміліметрового діапазонів. Теплові шумові струми створюються у будь-якому недосконалому провіднику та представляють собою результат хаотичного теплового руху елементарних заряджених частинок. На екранах радіолокаторів ці шуми

All rights reserved | Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License

спостерігаються у вигляді характерних безладно мерехтливих крапок. На виході радіомовних та зв'язкових приймачів вони сприймаються як рівномірне слабке шипіння, особливо добре чутне при відсутності основної передачі.

Теплові шуми генеруються тільки активними опорами, ідеальні конденсатори та котушки індуктивності абсолютно не створюють шумових струмів. Відомо, що активний опір здатний виділяти тепло при проходженні струму, або перетворювати електричну енергію у теплову. Тобто, існує і зворотна якість, здатність часткового перетворення теплової енергії у електричну.

Високочастотний струм створює поле електромагнітного випромінювання. Подібності формул *(6)* і *(7)* пояснюються тим, що радіотеплове випромінювання є поле теплових шумових струмів, що протікають у товщі випромінюючого тіла.

Множник $\frac{2\pi}{\lambda^2}$ у *(6)*, наявний к правій частині формули Релея-Джинса, дорівнює множнику у формулі для визначення потужності випромінювання елементарної антени, довжина якої менше довжини хвилі випромінювання:

$$\mathrm{P_{ант}} = \mathrm{k_p}\frac{\mathrm{I_{ант}^2}}{\lambda^2}, \tag{8}$$

де $\boldsymbol{P}_{\text{ант}}$ *– потужність випромінена антеною;* $\mathrm{I_{ант}}$ *– струм у антені;* $\boldsymbol{k_p}$ *– коефіцієнт пропорційності.*

Інтенсивність радіотеплового випромінювання залежить не тільки від поглинаючих властивостей речовини випромінювача. Частина випромінювання, яка виходить з товщі випромінювача, відбивається від його поверхні і знову перетворюється у тепло. Крім того, величина відбиття залежить від кута падіння випромінюваних хвиль та виду поляризації. Математично такі залежності можливо описати за формулами Френеля наступним чином:

$$\rho_{\text{г}}(\theta) = \left(\frac{\sin\theta - \sqrt{\varepsilon_{\text{д}} - \cos^2\theta}}{\sin\theta + \sqrt{\varepsilon_{\text{д}} - \cos^2\theta}}\right)^2;$$
$$\rho_{\text{в}}(\theta) = \left(\frac{\varepsilon_{\text{д}}\sin\theta - \sqrt{\varepsilon_{\text{д}} - \cos^2\theta}}{\varepsilon_{\text{д}}\sin\theta + \sqrt{\varepsilon_{\text{д}} - \cos^2\theta}}\right)^2, \tag{9}$$

де $\rho_{\text{г}}(\theta)$ *– коефіцієнт відбиття складової випромінювання з горизонтальною поляризацією;* $\rho_{\text{в}}(\theta)$ *– коефіцієнт відбиття складової випромінювання з вертикальною поляризацією;* $\varepsilon_{\text{д}}$ *– діелектрична постійна речовини випромінювача;* θ *– кут падіння випромінювання.*

Внаслідок залежності величини віддзеркалення від кута падіння та виду поляризації інтенсивність радіотеплового випромінювання, що вийшло за межі, стає різною у різних напрямках та залежить від виду поляризації. Таким чином, у випромінювача утворюються своєрідні діаграми спрямованості, різні для складових випромінювання з вертикальної і горизонтальної поляризацією.

 Авторські права захищені | Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License

При зміні кута ϕ від 90^0 до 270^0 отримано значення $\rho_г$ та $\rho_в$ для гладкого об'єкту (бетон) $\varepsilon_д = 4{,}5$. Також, за *(9)* можливо заключити, що при певному значенні кута падіння θ коефіцієнт відбиття $\rho_в(\theta)$=0. Тому, вертикально поляризована частина випромінювання у цьому напрямку виходить з випромінювача повністю. Кут $\theta_в$, при якому $\rho_в(\theta) = 0$ є кутом Брюстера, значення якого можливо визначити за наступною формулою:

$$\mathrm{ctg}\theta_в = \sqrt{\varepsilon}\,. \qquad (10)$$

Отже, $\rho_г(\theta)$ та $\rho_в(\theta)$ збільшуються при зменшенні θ. При θ=*0*, $\rho_г(\theta)$=*1* та $\rho_в(\theta) = 1$. Залежності інтенсивності випромінювання від напрямку справедливі для плоских випромінювачів. Для випромінювачів з нерівною поверхню залежність рівня випромінювання від напрямку згладжується.

Висновки. Таким чином, спрощену модель радіотеплового випромінювання об'єкта можливо представити у вигляді сумарного випромінювання безлічі крихітних елементарних антен, що отримують живлення від шумових струмів, розподілених за об'ємом випромінювача. Причиною радіотеплового випромінювання є шумові струми надвисокої частоти. Інтенсивність випромінювання залежить від електричних характеристик об'єктів випромінювання: провідності та діелектричної проникливості. Провідність об'єкта у значній мірі визначає його поглинаючі властивості. Причому, чим краще об'єкт поглинає енергію стороннього випромінювання, тим кращим тепловим випромінювачем він є.

Список використаних джерел:

[1] Kudriashov V.V., Garbar A.Y., Lukin K.A., Maslikowski L., Samczyn-ski P., Kulpa K.S. Fusion of Images Generated by Radiometric and Active Noise SAR. *Cybernetics and Information Technologies*, Vol. 15, No. 7, pp. 58-66.

[2] Kudryashov V.V., Lukin K.A, Palamarchuk V.P, Vyplavin P.L. Coherent radiometric imaging with a Ka-band ground-based synthetic aperture noise radar. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2013, Vol. 72, No. 8, p. 699-710.

[3] Shmatko, O., Kolomiitsev, O., Rekova, N., Kuchuk, N., & Matvieiev , O. . (2023). Designing and evaluating dl-model for vulnerability detection in smart contracts. *Advanced Information Systems*, *7*(4), 41–51. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.4.05.

[4] Fedorchenko, V., Yeroshenko, O., Shmatko, O., Kolomiitsev, O., & Omarov, M. (2024). Password hashing methods and algorithms on the .net platform. *Advanced Information Systems*, *8*(4), 82–92. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.11.

FEATURES OF THERMAL RADIATION OF OBJECTS IN THE RADIO RANGE

SCIENTIFIC RESEARCH GROUP:
Viktor Kudriashov
PhD, Senior Research Scientist,
Senior Researcher,
O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

All rights reserved | Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License

Oleksii Kolomiitsev
Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Inventor of Ukraine,
Professor of the Department
National Technical University is the «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine
Volodymyr Komarov
PhD, Honored Inventor of Ukraine,
Leading Researcher
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology, Ukraine
Albert Katunin
PhD, Senior Research Scientist,
Senior Researcher
Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Ukraine
Yurii Slobodenyuk
Leading Researcher – Leading Test Engineer
Training and Research Testing Ground of High-Tech Armament and Military Equipment, Ukraine
Yevhen Porynos
Head of the Research Department
Training and Research Testing Ground of High-Tech Armament and Military Equipment
Ruslan Shupylo
Leading Researcher – Leading Test Engineer
Training and Research Testing Ground of High-Tech Armament and Military Equipment, Ukraine
Vasyl Khoma
Senior Researcher – Senior Test Engineer
Training and Research Testing Ground of High-Tech Armament and Military Equipment, Ukraine
Taras Spivak
Researcher – Test Engineer
Training and Research Testing Ground of High-Tech Armament and Military Equipment, Ukraine
Anton Lutsenko
Lecturer of Department
Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Ukraine
Volodymyr Surhai
Junior Researcher
Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Ukraine

Summary. *Thermal radiation of objects differs from the radiation generated by the fact that thermal radiation occupies a very wide range of waves and its power and spectral density do not remain constant and continuously fluctuate. The article reveals the features of thermal radiation of objects in the radio range. The physical essence of thermal radiation of any substances and objects is considered. The basic laws of thermal radiation are presented. Calculations of the spectral density of an object's radiation depending on its frequency and temperature are given.*
Keywords: *thermal radiation, object, wavelength, spectral density, frequency, temperature, intensity, power, range of electromagnetic waves.*

 Авторські права захищені | Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License