

УДК 615.844.3

**МЕТОД КОНТРОЛЮ СТАНУ ТКАНИН ТІЛА ЛЮДИНИ ПРИ ОПРОМІНЕННІ
УЛЬТРАВІСОКОЧАСТОТНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ****М. Ф. Терещенко, С. Ю. Надточій**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: nadtochiy_s@i.ua

Розглянуто фізичні ефекти в біологічній тканині при її опроміненні електромагнітним полем ультрависокої частоти та особливості теплової дії. Запропонована математична модель взаємодії електромагнітного поля з біологічними тканинами та їх тепловий обмін. Розглянуто нові принципи побудови апаратів УВЧ-терапії з адаптивним контролем стану опроміненої тканини, досліджені елементи та блоки структурної схеми, принципи та алгоритми їх роботи. Приведені математичні залежності зміни градієнта температури від параметрів опромінюючого поля, графіки та таблиці результатів експериментальних досліджень на апаратах, що використовуються в медичній практиці.

Ключові слова: енергія поглинання, ультрависокочастотне електромагнітне поле, температурний контроль.

**МЕТОД КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТКАНЕЙ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ
УЛЬТРАВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ****Н. Ф. Терещенко, С. Ю. Надточій**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: nadtochiy_s@i.ua

Рассмотрены физические эффекты в биологической ткани при ее облучении электромагнитным полем ультрависокой частоты и особенности его теплового воздействия. Предложенная математическая модель взаимодействия электромагнитного поля с биологическими тканями и их тепловой обмен. Рассмотрены новые принципы построения аппаратов УВЧ-терапии с адаптивным контролем состояния облученной ткани, исследованы элементы и блоки структурной схемы, принципы и алгоритмы их работы. Приведены математические зависимости изменения градиента температуры от параметров облучающего поля, графики и таблицы результатов экспериментальных исследований на аппаратах, используемых в медицинской практике.

Ключевые слова: энергия поглощения, ультравысокочастотное электромагнитное поле, температурный контроль.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Змінне електромагнітне поле – суттєвий фізичний фактор, що діє на біологічні тканини, має як природне, так і технічне походження. Електромагнітне поле, утворене синусоїдальним сигналом у діапазоні частот 50 Гц–1000 кГц, проходить через біологічні тканини з незначним поглинанням і ефективно діє на клітини. Крім цього, електромагнітне поле невеликих потужностей практично не відчувається людиною [1].

На основі цих закономірностей розроблено безліч апаратів і систем для терапії електромагнітним полем, до яких належать і апарати для ультрависокочастотної терапії. УВЧ-терапія – це один з найпоширеніших методів лікування в таких областях, як захворювання дихальної системи та ЛОР-органів, захворювання шлунково-кишкового тракту, захворювання сечостатевої системи, гнійні і запальні захворювання органів опору та руху, гострі запальні процеси в шкірі та підшкірній клітковині, судинні захворювання кінцівок, захворювання центральної і периферичної нервової системи.

Суттєвими недоліками відомих способів, та пристроїв являється відсутність контролю за процесом терапевтичної дії, в заданій зоні впливу, що може привести до небажаних наслідків (опіків, ушкодження шкіряного покриву чи більш глибоких шарів біологічних тканин). Можливі зниження ефективності терапевтичної дії чи її відсутність. Це пов'язано з тим, що при не зовсім правильній установці випромінювачів, індукторів чи локальних

елементів впливу на місці заданої зони терапевтичної дії, енергія електромагнітного поля буде витрачатись не нормовано і не ефективно, що може привести до перегріву, а то і некрозу біологічних тканин, а при незначній потужності УВЧ-випромінювання – до відсутності лікувального ефекту.

Метою роботи є визначення закономірності та чіткої залежності поглиненої дози випромінювання від фізіологічних факторів опромінюваного організму людини.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Задачею даного дослідження є розробка методу адаптивного контролю фізичних процесів в біологічній тканині та принципів побудови, алгоритму роботи і створення апарату для УВЧ-терапії, який зміг би забезпечити нормований, контрольований терапевтичний вплив УВЧ електромагнітним полем на задану зону біологічної тканини з прогнозованим терапевтичним ефектом. За фактор достовірного контролю обрано температурні характеристики поверхневого шару тіла людини.

Теоретична модель та закономірності. На сьогоднішній день запропоновані різні моделі, що описують терморегуляцію в організмі людини та придатні для дослідження теплового впливу на нього електромагнітного випромінювання. Існують як досить складні моделі терморегуляції, так і прості [1–3].

У моделі обов'язково повинна враховуватись роль поверхневих шарів (оболонки) як теплоізолятора. Теплоізоляційні властивості шарів шкіри ви-

значаються розширенням і звуженням діаметрів прохідних судин.

Врахувавши все вищесказане, можна привести модель для опису теплового стресу (рис. 1).

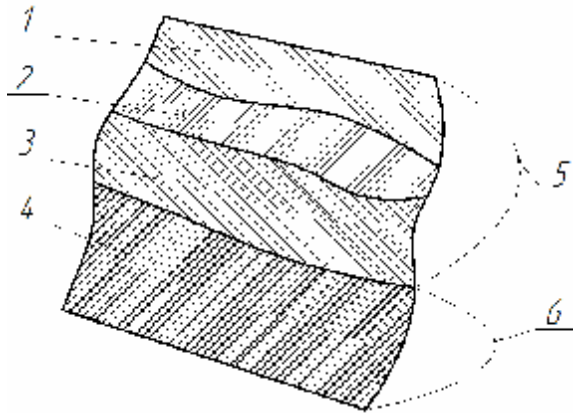


Рисунок 1 –Шари моделі шкіряного покриву:
1 – епідерміс; 2– дерма; 3 – підшкірний жир;
4 – м’язова тканина; 5 – термоізоляційний шар;
6 – область впливу УВЧ - випромінювання

Рівняння моделі, що було запропоновано Новоком П., обрано як найбільш коректне і має вигляд [1]:

$$\Delta T = \frac{P - P_a(T, T_0)}{aS \left(\frac{1}{M} - \frac{P_0 a}{aS} \right)} \left[1 - \exp \left[- \frac{aS}{c} \left(\frac{1}{M} - \frac{P_0 a}{aS} \right) t \right] \right] \quad (1)$$

де P – питоме поглинання потужності, $Вт/кг$;

P_0 – початкова потужність метаболічного теплоутворення, $Вт/кг$; P_a – зниження потужності теплоутворення при зменшенні рухомої діяльності, $Вт/кг$;

t – час опромінення, $с$;

S – площа поверхні зони опромінення тіла, $м^2$; M – маса тіла; $c = 3.5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(кг \cdot K)$ – середня питома теплоємність поверхневих шарів шкіри; a – коефіцієнт тепловіддачі, $Вт/(м^2 \cdot K)$; a – коефіцієнт зростання потужності метаболічного перетворення, $1/K$; t_0 – час адаптації до гіподинамії.

Якщо $t_0 > t$, то $P_a = 0$, якщо $t_0 \leq t$, то

$$P_a = \frac{aS}{M} (T_0 - T_m) - P_0, \quad (2)$$

де T_0 – початкова температура тіла; T_m – температура оточуючого середовища.

Величина P_a велика для малих площ тканин, але нею можна знехтувати по відношенню до великих площин тканин. Експериментальне значення коефіцієнта $a = 0.095$. Невелике підвищення температури тіла не впливає на теплонакопичення. Якщо знехтувати цим фактором, то вираз (1) матиме вигляд:

$$\Delta T = \frac{PM}{aS} \left(1 - e^{-\frac{aS}{cM} t} \right) \quad (3)$$

де a – коефіцієнт зростання потужності:

$$a = kc \frac{M}{S} \quad (4)$$

або

$$\Delta T = \frac{P}{kc} (1 - e^{-kt}), \quad (5)$$

де k – коефіцієнт охолодження, $1/хв$.

З іншого боку значення питомого поглинання потужності має вигляд [4]:

$$P = \frac{S \cdot E^2}{r}, \quad (6)$$

де

S – електрична провідність тканин тіла, $См/м$;

E – напруженість електричного поля, $В/м$;

ρ – густина тканин тіла, $кг/м^3$.

Отже, градієнт температури ΔT залежить від напруженості електричного поля (E), виду тканин, які опромінюються (σ і ρ), а також від часу проведення процедури:

$$\Delta T = \frac{S \cdot E^2}{r \cdot k \cdot c} (1 - e^{-kt}), \quad (7)$$

На рис. 2 приведено графіки залежності температури поверхні тіла від часу опромінення, побудовані на основі математичного співвідношення (7) з урахуванням даних табл. 1. Тут по вертикалі відкладено дійсне значення температури $T(t) = \Delta T + T(0)$, по горизонталі – час опромінення t .

Таблиця 1 – Розраховані теоретичні дані дослідження для різного значення напруженості електричного поля

$T(t), ^\circ C$	$t, хв$						
	0	1	3	5	10	15	
$E, В/м$	10	35	35.094	35.224	35.303	35.39	35.415
	20	35	35.376	35.896	36.212	36.559	36.659
	30	35	35.846	37.017	37.727	38.509	38.732
	40	35	36.503	38.585	39.848	41.238	41.636

Для підвищення ефективності фізіотерапевтичних процедур нами запропоновано новий спосіб фізіотерапії, оснований на впливі ЕМП УВЧ діапазону на тканини з одночасним моніторингом стану тканин за фактичними значеннями знятих термальних даних [6].

Принципи побудови УВЧ-терапії з адаптивним контролем. Для підтвердження достовірності отриманої теоретичної залежності градієнта температури від параметрів ЕМП (7) і запропонованої моделі проведені експериментальні дослідження на автоматизованому апараті УВЧ-терапії.

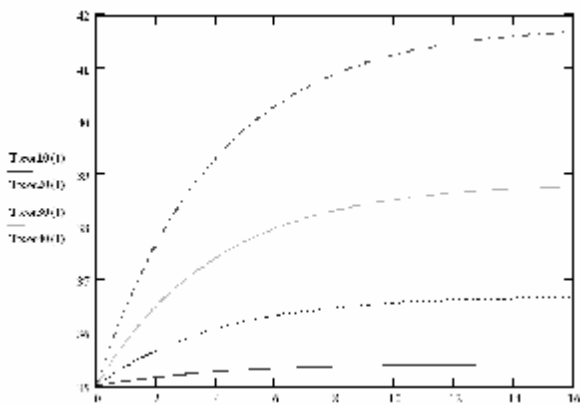


Рисунок 2 – Графік залежності температури поверхні тіла від часу опромінення при значеннях напруженості електричного поля $E=10, 20, 30, 40 \text{ В/м}$

На рис. 3 наведена функціональна схема такого апарату.

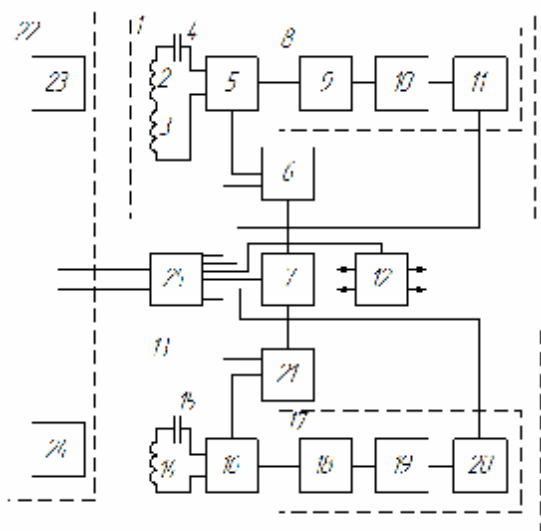


Рисунок 3 – Функціональна схема автоматизованого апарату УВЧ-терапії з адаптивним контролем

Апарат містить елемент впливу 1, що складається з котушок індуктивності 2 і 3, обмотки яких розміщені на окремих плоских діелектричних каркасах і з'єднані послідовно і узгоджено. Обмотки за допомогою конденсатора 4 підключені до схеми автогенератора 5. Частота автогенератора визначається параметрами елементів коливального контуру, а саме величиною індуктивності L_1, L_2 котушок 2 та 3 і величиною ємності C конденсатора 4. Схема автогенератора 5 за допомогою модулятора 6 з'єднана з вихідними клеммами джерела низькочастотного сигналу 7. Блоки 6 і 7 зв'язані з мікропроцесорною системою керування 25.

Несуча частота автогенератора 5 вибирається в діапазоні частот $f_{a1}=(100-1000)$ кГц. Джерело низькочастотного сигналу 7 генерує сигнал зі змінною частотою в діапазоні частот $f_2 = (50-8000)$ Гц, при подачі команди з блоку 25. Елемент впливу 1 містить тракт контролю високочастотного сигналу 8, що

містить з'єднані послідовно амплітудний детектор 9, підсилювач постійного струму 10 і індикатор 11, виконаний у вигляді керованої світлодіодної матриці, під'єднаної до мікропроцесорної системи керування 25. Всі елементи схеми апарату живляться від джерела живлення 12, яке може бути автономним (батарейним чи акумуляторним) або мережним.

Автоматизований апарат УВЧ-терапії містить один або кілька локальних елементів впливу 13. Локальний елемент впливу складається з котушки індуктивності L_n 14, яка за допомогою конденсатора C_n 15 з'єднана зі схемою автогенератора 16. Частота автогенератора 15 визначається величиною індуктивності котушки L_n 14 і величиною ємності C_n конденсатора 15.

Несуча частота автогенератора 15 вибирається в діапазоні частот $f_{n1}=(100 - 2000)$ кГц. Обмотка котушки індуктивності L_{n1} , 14 може бути розміщена на плоскому діелектричному каркасі, на бічній поверхні циліндричного діелектричного каркаса, на стрижневому феритовому сердечнику і т.д.

Елемент впливу 13 забезпечений трактом контролю високочастотного сигналу 17, з'єднаного зі схемою автогенератора 16, і який містить під'єднані послідовно амплітудний детектор 18, підсилювач постійного струму 19 і індикатор 20, виконаний у вигляді керованої світлодіодної матриці, під'єднаної до мікропроцесорної системи керування 25. Схема автогенератора 16 за допомогою модулятора 21 з'єднана з вихідними клеммами джерела низькочастотного сигналу 7. Модулятор 21 зв'язаний з мікропроцесорною системою керування 25. Елемент впливу 1, що містить в своєму складі котушки 2 і 3, конденсатор 4, схему автогенератора 6, схему модулятора 6 і схему тракту контролю 8, виконаний у вигляді окремого функціонального елемента і за допомогою кабелю з'єднаний з джерелом низькочастотного сигналу 7 і джерелом живлення 12.

Кожен локальний елемент впливу 13, що містить котушку індуктивності 14, конденсатор 15, схему автогенератора 16, схему тракту контролю 17 і схему модулятора 21, виконаний у вигляді окремого функціонального елемента і за допомогою кабелю з'єднаний з джерелом низькочастотного сигналу 7 і джерелом живлення 12.

Джерелом низькочастотного сигналу може бути використаний керований генератор з частотою, яка змінюється в діапазоні частот $f_2 = (50 - 8000)$ Гц, при подачі сигналу з мікро-процесорної системи керування 25.

Для контролю температури в зоні терапевтичної дії автоматизований апарат УВЧ-терапії має систему температурного контролю 22, до складу якої входить температурний датчик 23 і локальний датчик 24, під'єднані до мікропроцесорної системи керування 25. Для кожного елемента впливу і локального елемента впливу використовується свій температурний датчик, які розміщуються на біологічній тканині в зоні терапевтичної дії.

Елемент впливу 1 розміщується на платі, яка знаходиться на ізоляційній підложці. Зверху елемент впливу 1 закривається поролоном і простирадлом. Пацієнт із закріпленим температурним датчиком 23 на тілі укладається на простирадлі так, щоб

його спина та датчик 23 розмішувалася над елементом впливу 1. Зверху на зону впливу біологічної тканини накладається локальний температурний датчик 24 і стерильна серветка, на яку встановлюють контактну або над якою підвішують локальний елемент впливу 13.

Включають мікропроцесорну систему керування 25, яка запускає джерело живлення 12 автоматизованого апарату УВЧ – терапії. Включається генерація УВЧ випромінювання в елементах впливу 1 і локальному елементі впливу 13. З температурного датчика 23, що знаходиться на біологічній тканині напроти елементу впливу 1, вимірюється температура і через мікропроцесорну систему керування 25 індукується на індикаторі 11. При досягненні максимально допустимого значення $T_{\text{мак.доп.}}$ температури біологічної тканини, мікропроцесорна система керування 25 відключає джерело живлення 12.

Таким же чином працює і локальний елемент впливу 13. Температура вимірюється локальним температурним датчиком 24, що знаходиться на біологічній тканині напроти локального елемента впливу 13. Виміряна температура індукується на локальному індикаторі 20. При досягненні максимально допустимого значення $T_{\text{мак.доп.}}$ температури біологічної тканини, мікропроцесорна система керування 25 відключає джерело живлення 12.

Мікропроцесорна система керування 25 містить в своєму складі таймер і елементи світлової та звукової індикації.

Проведені дослідження, до яких увійшла низка експериментів, спрямованих на виявлення чіткої залежності поверхневої температури біологічного об'єкту, який знаходиться під впливом електромагнітного випромінювання, від поглиненої дози цього випромінювання.

Методика експерименту. Експерименти проводилися з дотриманням всіх санітарно-гігієнічних нормативів для ультрависокочастотного опромінення.



Рисунок 4 – Вигляд експериментальної установки

Для проведення дослідження було обрано декілька груп пацієнтів, об'єктом впливу – верхню частину кінцівки руки. На початку експерименту замірялась температура поверхні кінцівок руки без опромінення, тобто в момент часу 0. Пацієнта опромінювали за допомогою апарату УВЧ-терапії «УВЧ-30» протягом 15 хв., значення потужності – максимальне для даного апарату – 30 Вт. Заміри температури проводились тепловізором марки MobileIR M3, знімалися через 1, 3, 5, 10, 15 хв. після початку впливу. На рис. 7–10 показано вигляд установки та частину експерименту.



Рисунок 5 – Вид на камеру тепловізора



Рисунок 6 – Під час експерименту першої групи

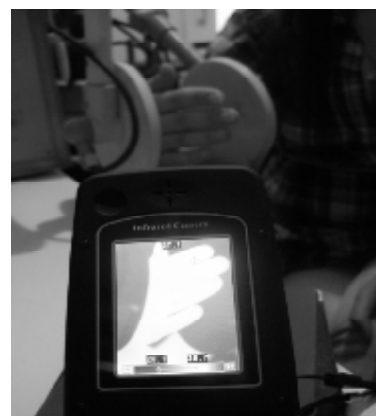


Рисунок 7 – Під час експерименту другої групи

Результати експериментів відображені в табл. 2–5.

Таблиця 2 – Середні результати дослідження першої групи пацієнтів

№ заміру	Час впливу, хв.	Поверхнева температура в зоні впливу, °C
1	0	35,6
2	1	36,9
3	3	37,5
4	5	38,1
5	10	38,2
6	15	38,4

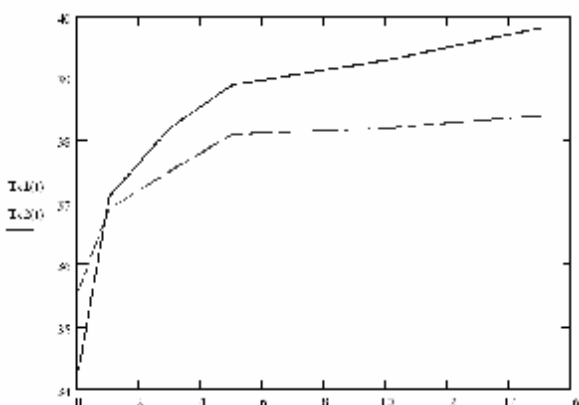


Рисунок 8 – Графіки залежності поверхневої температури від часу опромінення першої групи пацієнтів ($T_{e1}(t)$) та другої групи пацієнтів ($T_{e2}(t)$), де $T_e(t)$ – поверхнева температура опромінюваної області, °C; t – час опромінення

Таблиця 3 – Середні результати дослідження другої групи пацієнтів

№ заміру	Час впливу, хв.	Поверхнева температура в зоні впливу, °C
1	0	34,3
2	1	35,8
3	3	37,5
4	5	38,5
5	10	39,3
6	15	39,8

Для отримання чіткої картини результатів порівняємо теоретичні дані з результатами експерименту.

Визначимо похибки для першого графіку:

– абсолютна похибка:

$$\Delta = T_e(t) - T_{teor}(t); \quad (8)$$

– відносна похибка:

$$d = \frac{\Delta}{T_{teor}(t)} \cdot 100\%; \quad (9)$$

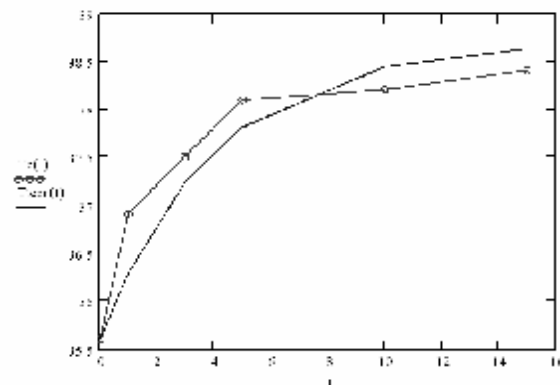


Рисунок 9 – Графік порівняння теоретичних розрахунків і експериментальних даних першої групи

Таблиця 4 – До визначення похибки вимірювань першої групи

№ заміру	Теор. розрах. дані, °C	Експер. дані, °C	Абсолютна похибка, °C	Відносна похибка, %
1	35,6	35,6	0	0
2	36,285	36,9	0,615	1,7
3	37,234	37,5	0,266	0,714
4	37,809	38,1	0,291	0,769
5	38,442	38,2	-0,242	0,629
6	38,623	38,4	-0,223	0,5774

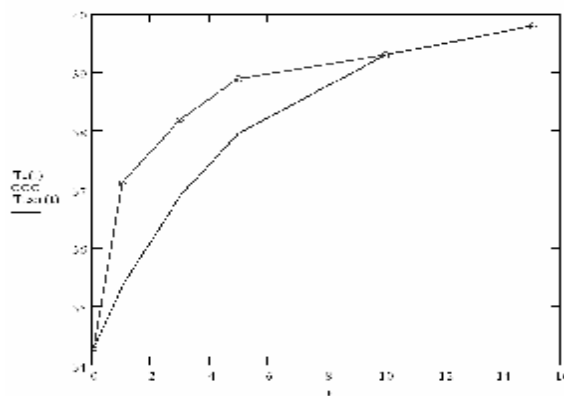


Рисунок 10 – Графік порівняння теоретичних розрахунків і експериментальних даних другої групи

Таблиця 5 – До визначення похибки вимірювань другої групи

№ заміру	Теор. розрах. дані, °C	Експер. дані, °C	Абсолютна похибка, °C	Відносна похибка, %
1	34,3	34,3	0	0
2	35,348	35,8	1,752	4,95
3	36,908	37,5	1,292	3,5
4	37,955	38,5	0,945	2,48
5	39,299	39,3	0,001	0,0025
6	39,794	39,8	0,006	0,015

Отже, ми бачимо, що отримана математична модель досить коректно описує термальні процеси в біологічній тканині при опроміненні її ЕМП ультрависокої частоти. Максимальна відносна похибка для першої групи складає 1,7 %, для другої – 4,95 %. Збільшення похибки пов'язано зі зміною кровонаповнення тканин, так як для першої групи були обрані люди із середньою комплекцією тіла, а для другої – вище ніж середньою.

ВИСНОВКИ. Розглянуто біофізичні основи теплових ефектів у біологічній тканині при її опроміненні електромагнітним полем ультрависокої частоти. Запропоновано та проаналізовано математичну модель теплового обміну між випромінювачем і біологічною тканиною. Наведені та досліджені нові принципи побудови апаратів УВЧ-терапії з адаптивним контролем, а саме, апарати із системою термального контролю стану тканин тіла людини при опроміненні, досліджена їх структурна схема, принцип і алгоритм роботи. Приведено отримані математичні залежності, графіки, таблиці результатів до-

сліджень, розраховано похибки проведення досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Новак П. Электромагнитные поля в биологии и медицине: Механизмы взаимодействия. Экспериментальные исследования. Теоретические модели. Аппаратура и приборы. – Д.: Пороги, 2004. – 389 с.
2. Ясногородский В.Г. Электротерапия. – М.: Медицина, 1987. – 240 с.
3. Власов В.В. Реакция организма на внешние воздействия: общие закономерности и методические проблемы исследования. – Иркутск, 1994. – 344 с.
4. Кудряшов Ю.Б., Перов Ю.Ф., Рубин А.Б. Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения. Учебник для ВУЗов. – М.: Физматлит, 2008. – 184 с.
5. Олейник О.Г., Сафронов А.А., Логинов В.М. Аппаратное обеспечение УВЧ-терапии на современном этапе развития медицинской техники // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2003. – № 2. – С. 62–68.
6. Заявка на патент України № а201204309 від 6.04.2012 р. – Спосіб УВЧ фізіотерапії і пристрій для його реалізації / Терещенко М.Ф., Надточий С.Ю.

METHOD OF CONTROL OF BODY TISSUES UNDER THE UHF IRRADIATION

M. Tereshchenko, S. Nadtochii

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"
prosp. Pobedy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine. E-mail: nadtochiy_s@i.ua

The paper considers physical effects in a biological tissue when it is irradiated with ultra-high frequency electromagnetic field and thermal characteristics of UHF impact. A mathematical model of the interaction of electromagnetic fields with biological tissues and heat exchange is offered. New principles of UHF-therapy apparatus with adaptive control of irradiated tissues studied are considered and the elements and blocks of the block diagram with principles and algorithms of their operating are studied. The article presents the formula describing the temperature gradient variations according to the parameters of the irradiation field and also graphs and tables of the experimental results with the apparatus applied, which are used in medical practice.

Key words: absorption energy, ultra-high frequency electromagnetic field, temperature control.

REFERENCES

1. Nowak P. *Electromagnetic fields in biology and medicine: mechanisms of interaction. Experimental studies. The theoretical model. The equipment and instruments.* – J.: Porohy, 2004. – 389 p. [in Russian]
2. Yasnogorodsky V.G. *Elektroterapiya.* – M.: Medicine, 1987. – P. 240. [in Russian]
3. Vlasov V.V. *Organism reaction to external influences: general regularities and methodical problems of research.* – Irkutsk: 1994. – P. 344. [in Russian]
4. Kudryashov Y.B., Perov Y.F., Rubin A.B. *Radiation Biophysics: RF and microwave electromagnetic radiation. Textbook for High Schools.* – M.: Fizmatlit, 2008. – P. 184. [in Russian]
5. Oleinik O.G., Safronov A.A., Loginov V.M. Hardware support UHF-therapy at the present stage of development of a medical technology // *Biomedical technologies and radioelectronics.* – 2003. – № 2. – PP. 62–68. [in Russian]
1. Request on the patent of Ukraine № а2012 04309 from 6.04.2012, *Method of UHF physiotherapy and device for its implementation* / Tereshchenko M., Nadtochii S. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 04.09.2012.

Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Моспаном В.О.