# БІОЛОГІЧНІ ТА МЕДИЧНІ ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ

**УДК 681.2.08 + 681.7**

С. М. Злепко[1], Т. І. Козловська[1], В. А. Стасенко[1], В. С. Павлов[1], В. П. Думенко[2]

# ОЦІНЮВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФІЧНОГО ПРИЛАДУ ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ПЕРИФЕРИЧНОГО КРОВООБІГУ

[1]Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця,

[2]Вінницький державний педагогічний університет ім. М. Коцюбинського, м. Вінниця

Анотація: В роботі проведено оцінювання основних метрологічних характеристик фотоплетизмографічного приладу діагностування стану периферичного кровообігу. Побудовано його структурну схему, складено математичну модель фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач, складено рівняння перетворення та отримано просторову функцію перетворення вимірювального каналу. Отримано формули для розрахунку таких метрологічних характеристик як чутливість, коефіцієнт впливу впливної величини, швидкість зміни коефіцієнта впливної величини по вихідному параметру, номінальну функцію перетворення, абсолютну мультиплікативну та абсолютну адитивну похибки і отримано їх графічні залежності.

**Ключові слова: метрологічні характеристики, периферичний крооообіг, фотоплетизмографічний прилад.**

Аннотация: В работе проведена оценка основных метрологических характеристик фотоплетизмографического прибора диагностики состояния периферического кровообращения. Построена его структурная схема, составлена математическая модель фотоприемника на основе пары фотодиод-операционный усилитель, составлено уравнение преобразования и получена пространственная функция преобразования измерительного канала. Получены формулы для расчета таких метрологических характеристик как чувствительность, коэффициент влияния влиятельной величины, скорость изменения коэффициента влиятельной величины по исходному параметру, номинальную функцию преобразования, абсолютную мультипликативную и абсолютную аддитивную погрешности и получены их графические зависимости.

**Ключевые слова: метрологические характеристики, периферическое крооообращение, фотоплетизмографический прибор.**

Abstract: The aim of the research - to assess the main metrological characteristics of photoplethysmographic device for peripheral circulation diagnostics. It's necessary for assessment the technical level of designed device. The block diagram is built and mathematical model of the photodetector based on a pair of photodiode-operational amplifier is composed. Transformation equation is composed and the spatial function of measuring channel conversion is obtained. The formulas for the calculation of the metrological characteristics such as sensitivity, influence influential factor values, speed values of the influential factor changes on the source parameter, the nominal conversion function, absolute multiplicative and absolute additive errors and their graphics are obtained.

**Key words: metrological characteristics, peripheral circulation, photoplethysmographic device.**

## Вступ

Периферичним кровообігом називають рух крові в мілких артеріях, артеріолах, капілярах, венулах та венах по принципу із крові в тканини, а потім з тканин в кров. В молодому віці проблеми порушення периферичного кровообігу зустрічаються не так часто, але з віком вони практично неминучі. Але в останні десятиріччя вік хворих з порушеннями периферичного кровообігу постійно зменшується [1].

## Актуальність

Проведення якісного діагностування порушень периферичного кровообігу є важливою задачею сучасної медицини, оскільки вчасно проведене діагностування є запорукою успішного лікування. Сьогодні в медичну практику впроваджується велика кількість методів, які дозволяють ефективно визначати стан периферичного кровообігу людини. Одним із перспективних методів є метод фотоплетизмографії, який дозволяє визначити кровонаповнення і кровотік як в потужних венах і артеріях так і периферичних судинах і капілярах. Сучасні прилади, що базуються на застосуванні даного методу мають відносно невисоку достовірність діагностування та високу чутливість до артефактів. Прилади, які мають більш високі технічні показники, обмежуються в застосуванні через їх високу вартість та ряд протипоказань для хворого. Тому актуальним завданням є створення приладів з розширеними функціональними можливостями та високою достовірністю діагностування [1, 2].

**Мета досліджень:** підвищення достовірності прийняття рішень щодо дослідження стану периферичного кровообігу за допомогою фотоплетизмографічного приладу, шляхом розрахунку та оцінювання його основних метрологічних характеристик.

С. М. Злепко, Т. І. Козловська, В. А. Стасенко, В. С. Павлов, В. П. Думенко, 2016

**Задачі досліджень:**

- побудувати структурну схему приладу діагностування периферичного кровообігу;

- скласти математичну модель фотоприймача приладу на основі пари фотодіод-операційний підсилювач, на основі якої скласти рівняння перетворення та отримати просторову функцію перетворення вимірювального каналу;
- отримати формули для розрахунку таких метрологічних характеристик як чутливість, коефіцієнт впливу виливної величини, швидкість зміни коефіцієнта впливної величини по вихідному параметру, номінальну функцію перетворення, абсолютну мультиплікативну та абсолютну адитивну похибки і отримати їх графічні залежності.

**Розв'язання задач**

При розробленні нового приладу проводиться оцінювання його технічного рівня шляхом розрахунку метрологічних характеристик. Виходячи з режимів роботи засобів перетворення, розрізняють статичні і динамічні метрологічні характеристики [3, 4].

Розроблений прилад працює у статичному режимі, оскільки сигнал на його виході не змінюється протягом часу, достатнього для зчитування показів. До основних статичних метрологічних характеристик відносять: номінальну функцію перетворення; чутливість; похибку нелінійності; адитивну і мультиплікативні складові похибок [3]. Структурну схему розробленого фотоплетизмографічного приладу зображено на рисунку 1.

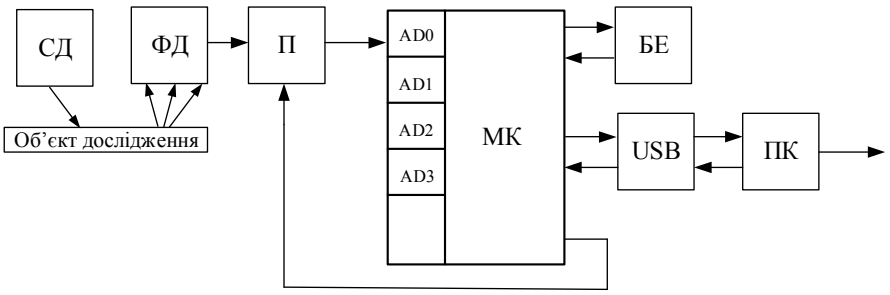


Рис. 1. Структурна схема розробленого приладу

На вхід вимірювального каналу (ВК) фотоплетизмографічного приладу діагностування стану периферичного кровообігу надходить світловий сигнал. Інформативним параметром ВК, структура якого містить фотоприймач, підсилювач та АЦП є сила світла I, що перетворюється в двійковий код $N_x$. В даній структурі в якості фотоприймача використовується пара фотодіод-операційний підсилювач.

Струм, що протікає через фотодіод, описується наступним виразом [4, 7]

$$I_{VD} = \frac{\Phi S_{IO}}{\sqrt{1+(\Omega\tau_{VD})^2}} - I_S\left(\exp\left(\frac{e_e U_{VD}}{kT}\right)-1\right), \quad (1)$$

де $I_{VD}$ – струм фотодіода;

$S_{IO}$ – інтегральна струмова чутливість фотодіода при немодульованому опроміненні;

$\Phi$ – падаючий на фотодіод потік опромінення;

$I_S$ – темновий струм фотодіода;

$U_{VD}$ – падіння напруги на фотодіоді;

T – абсолютна температура;

k – постійна Больцмана;

$e_e$ – заряд електрона;

$\Omega$ – циклічна частота потоку опромінення;

$\tau_{VD}$ – постійна часу фотодіода, яка залежить від значень внутрішнього опору фотодіода $R_{VD}$, паразитної ємності фотодіода $C_{VD}$, часу розсмоктування неосновних носіїв заряду.

При використанні джерела світла з конденсорною лінзою, можна отримати плоско-паралельний потік опромінення, однаковий на всій площині. У цьому випадку потік опромінення та площа фоточутливого шару фотодіода, що опромінюється, пов'язані співвідношенням [5, 6]

$$\Phi_0 = J_p S = IS/r^2 , \tag{2}$$

де $J_p$ – інтенсивність променевого потоку,

r – відстань від джерела світла до поверхні, що освітлюється;
S – площа, що опромінюється;
I – сила світла.

На основі закону Ламберта втрати інтенсивності світла, що проходить крізь БТ, внаслідок розсіювання та поглинання описуються наступним співвідношенням (1, 2, 5)

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z), \tag{3}$$

де z – товщина БТ;
$I_0$ – інтенсивність падаючого світла;
$\mu_t$ – коефіцієнт послаблення оптичного випромінювання [5, 12]

$$\mu_t = \mu_s + \mu_a , \tag{4}$$

де $\mu_s$ – коефіцієнт розсіювання;
$\mu_a$ – коефіцієнт поглинання БТ.

Вихідна напруга фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач, з урахуванням зміщення нуля, різниці вхідних струмів, напруги шуму, описується виразом [5, 7]

$$U_\Phi = \frac{I_{VD} R_{33}}{1 + R_{33}/KR_{BX} + 1/K} + \Delta I \cdot R_{33} + U_{3M} + U_{Ш} , \tag{5}$$

де K – коефіцієнт передачі операційного підсилювача;
$R_{BX}$ – вхідний опір операційного підсилювача;
$U_{3M}$ – напруга зміщення нуля операційного підсилювача;
$\Delta I$ – різниця вхідних струмів операційного підсилювача;
$U_{Ш}$ – напруга шуму на виході фотоприймача.

Модуль вихідної напруги визначається виразом [5, 7]

$$U_{Ш} = \sqrt{E_{ШП}^2 + (I_{ШП}^2 + I_{ШД}^2 + I_{33}^2) R_{33}} , \tag{6}$$

де $E_{ШП}$ – спектральна щільність напруги шуму операційного підсилювача;
$I_{ШП}$ – спектральна щільність шумового струму операційного підсилювача;
$I_{ШД}$ – спектральна щільність шумового струму опору зворотного зв'язку.

Щільність шумового струму фотодіода, що працює у фотовольтаїчному режимі [5, 6]

$$I_{ШД} = \sqrt{4KT\Delta f / R_{VD}} , \tag{7}$$

де $\Delta f$ – ефективна смуга пропускання електронного тракту.

Щільність шумового струму опору зворотного зв'язку [5, 6]

$$I_{ЗЗ} = \sqrt{4KT\Delta f / R_{ЗЗ}} \ . \qquad (8)$$

В загальному випадку, вхідний опір та опір зворотного зв'язку має реактивний характер. Тому у комплексній формі, вираз (5) записується як

$$\dot{U}_{Ф} = \frac{\dot{I}_{VD}\dot{Z}_{ЗЗ}}{1 + \dot{Z}_{ЗЗ}/K\dot{Z}_{BX} + 1/\dot{K}} + \Delta I \cdot R_{ЗЗ} + U_{ЗМ} + \dot{U}_{Ш} =$$

$$= \frac{\dot{I}_{VD}\dot{Z}_{ЗЗ}\dot{Z}_{BX}\dot{K}}{\dot{Z}_{BX}\dot{K} + \dot{Z}_{BX} + \dot{Z}_{ЗЗ}} + \Delta I \cdot R_{ЗЗ} + U_{ЗМ} + \dot{U}_{Ш}, \qquad (9)$$

де $\dot{U}_{Ф}$ – комплексна амплітуда вихідної напруги фотоприймача;

$\dot{U}_{Ш}$ – комплексна шумова напруга;

$\dot{K}$ – комплексний коефіцієнт передачі операційного підсилювача;

$\dot{Z}_{ЗЗ}$, $\dot{Z}_{BX}$ – відповідно комплексний опір в колі зворотного зв'язку та комплексний вхідний опір операційного підсилювача.

Опори $\dot{Z}_{ЗЗ}$, $\dot{Z}_{BX}$ визначаються виразами

$$\dot{Z}_{ЗЗ} = R_{ЗЗ} / \left(1 + j\Omega R_{ЗЗ} C_{ЗЗ}\right), \qquad (10)$$

де $C_{ЗЗ}$ – паразитна ємність кола зворотного зв'язку.

$$\dot{Z}_{BX} = R_{BX} / \left(1 + j\Omega R_{BX} C_{BX}\right), \qquad (11)$$

де $C_{BX}$ – вхідна ємність операційного підсилювача.

Комплексний коефіцієнт передачі операційного підсилювача без зворотного зв'язку визначається як [5]

$$\dot{K} = K_0 / \left(1 + j\Omega/\Omega_{ГР}\right), \qquad (12)$$

де $K_0$ – коефіцієнт передачі операційного підсилювача на нульовій частоті;

$\Omega_{ГР}$ – гранична частота операційного підсилювача.

Еквівалентний опір навантаження фотодіода визначається виразом

$$\dot{Z}_{BH} = \dot{Z}_{ЗЗ} / \left(1 + \dot{K} + \dot{Z}_{ЗЗ}/\dot{Z}_{BX}\right) =$$

$$= R_{ЗЗ} / \left(1 + j\Omega R_{ЗЗ} C_{ЗЗ}\right) \left( 1 + K_0 / \left(1 + j\Omega/\Omega_{ГР}\right) + \frac{R_{ЗЗ}}{R_{BX}} \cdot \frac{R_{BX} / \left(1 + j\Omega R_{BX} C_{BX}\right)}{\left(1 + j\Omega R_{ЗЗ} C_{ЗЗ}\right)} \right). \qquad (13)$$

Отже, падіння напруги на фотодіоді

$$\dot{U}_{VD} = \dot{I}_{VD}\dot{Z}_{EH} = \frac{I}{r^2} \cdot \frac{S_{IO}}{1 + j\Omega\tau_{VD}} \dot{Z}_{EH}\dot{S} - \dot{Z}_{EH} I_S \left(\exp\left(e_e \dot{U}_{VD}/kT\right) - 1\right), \qquad (14)$$

де $\dot{S}$ – комплексна амплітуда площі фоточутливого шару, що освітлюється.

Оскільки фотодіод працює у фотовольтаїчному режимі, падіння напруги на ньому мале та складає одиниці мВ. Відоме співвідношення $\exp(x) \approx 1 + x$, $x \to 0$ дає змогу спростити вираз (14)

$$\dot{U}_{VD} = \dot{I}_{VD}\dot{Z}_{EH} = \frac{I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z)}{r^2} \cdot S_{IO}\dot{Z}_{EH}\dot{S} \Big/ \left(1 + j\Omega\tau_{VD}\right) - \dot{Z}_{EH} I_S\, e_e \dot{U}_{VD} \big/ kT . \quad (15)$$

Провівши нескладні перетворення, отримуємо вираз, який визначає падіння напруги на фотодіоді

$$\dot{U} = \frac{I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z)}{r^2} \frac{S_{10}}{1 + j\Omega\tau_{VD}} \dot{Z}_{EH}\dot{S} \Big/ \left( I_S \frac{e_e}{kT} \dot{Z}_{EH} - 1 \right). \quad (16)$$

Підставивши (6), (1), (4), (10), (11), (12), (16) у (9) та скористатися співвідношенням $\exp(x) \approx 1 + x$, $x \to 0$ отримуємо вираз, що зв'язує комплексну амплітуду вихідної напруги фотоприймача з комплексною амплітудою площі освітлюваного фоточутливого шару фотодіода [5].

$$\dot{U}_{\Phi} = \frac{\left( K_0 R_{BX} R_{33} \frac{I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z)}{r^2} S_{10} - I_S e_e \frac{I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z)}{r^2} S_{10} \dot{Z}_{EH} \Big/ kT \left( I_S \frac{e_e}{kT} \dot{Z}_{EH} - 1 \right) \right) \dot{S}}{(1 + j\Omega\tau_{VD}) \left( R_{33} + R_{BX}(K_0 + 1) - \frac{\Omega^2}{\Omega_{ГР}} R_{BX} R_{33} (C_{BX} - C_{33}) + j\Omega \left( \frac{R_{33} + R_{BX}}{\Omega_{ГР}} + R_{BX} R_{33} (C_{BX} + C_{33}(K_0 + 1)) \right) \right)} +$$
$$+ \Delta I \cdot R_{33} + U_{ЗМ} + \dot{U}_{Ш} . \quad (17)$$

Вираз (17) є математичною моделлю фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач. При умовах $U_{\Phi} >> U_{ЗМ}$ та $I_{VD} >> \Delta I$, значеннями $U_{ЗМ}$ та $\Delta I$ можна знехтувати. При використанні елементної бази з низьким рівнем шумів, шумовою складовою виразу (17) можна знехтувати. Внаслідок малого значення падіння напруги на фотодіоді при його роботі у фотовольтаїчному режимі та малого значення темнового струму, друга складова чисельника виразу (17) близька до нуля. З урахуванням цих умов вираз (17) матиме вигляд [5]

$$\dot{U}_{\Phi} = \frac{I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z) \cdot S_{10} K_0 R_{BX} R_{33} \dot{S} \big/ r^2 \cdot (1 + j\Omega\tau_{VD}) \dot{S}}{K_0 R_{BX} + R_{33} + R_{BX} - \Omega^2 R_{BX} R_{33} \frac{(C_{BX} - C_{33})}{\Omega_{ГР}} + j\Omega \left( \frac{R_{33} + R_{BX}}{\Omega_{ГР}} + R_{BX} R_{33} (C_{BX} + C_{33}(K_0 + 1)) \right)} . \quad (18)$$

Із (18) випливає, що при виконанні вищенаведених умов, вихідна напруга фотоприймача прямо пропорційна площі освітлюваного фоточутливого шару фотодіода. Якщо розглядати фотоприймач на основі пари фотодіод-операційний підсилювач як перетворювач площі освітлюваного шару фотодіода у напругу, доцільно ввести поняття коефіцієнту перетворення, який дорівнює відношенню комплексної амплітуди вихідної напруги до комплексної амплітуди освітлюваної площі, без урахування шумової напруги, напруги зміщення та різниці вхідних струмів операційного підсилювача, темнового струму фотодіода

$$\dot{K}_S(\Omega) = \frac{\dot{U}_{\Phi}}{\dot{S}} =$$

$$= \frac{I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z) \cdot K_0 R_{BX} R_{33} S_{10} \big/ r^2 (1 + j\Omega\tau_{VD})}{K_0 R_{BX} + R_{33} + R_{BX} - \frac{\Omega^2}{\Omega_{ГР}} R_{BX} R_{33} (C_{BX} - C_{33}) + j\Omega \left( \frac{R_{33} + R_{BX}}{\Omega_{ГР}} + R_{BX} R_{33} (C_{BX} + C_{33}(K_0 + 1)) \right)} . \quad (19)$$

Через коефіцієнт перетворення площі в напругу вираз (19) запишеться як

$$\dot{U}_{\Phi} = \dot{K}_S(\Omega)\dot{S} \left( 1 - I_S e_e \dot{Z}_{EH} \Big/ K_0 R_{BX} R_{33} kT \left( I_S \frac{e_e}{kT} \dot{Z}_{EH} - 1 \right) \right) + \Delta I \cdot R_{33} + U_{ЗМ} + \dot{U}_{Ш} . \quad (20)$$

В більшості випадків гранична частота фотодіода значно менша за граничну частоту операційного підсилювача. Тому спад частотної характеристики в області верхніх частот визначається частотними властивостями фотодіода. Вхідний опір сучасних операційних підсилювачів складає десятки МОм, що значно перевищує опір в колі зворотного зв'язку та внутрішній опір фотодіода. Тому можна прийняти $R_{BX} = \infty$. З урахуванням усіх вищенаведених умов, вираз (20) матиме вигляд [5]

$$K_S = I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z) \cdot S_{10}\, R_{33} / r^2 \sqrt{1 + (\Omega \tau_{VD})^2} \ . \tag{21}$$

При умові, що частота опромінення значно менша за граничну частоту фотодіода, його частотними властивостями можна знехтувати, вираз (21) матиме вигляд

$$K_S = I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z) \cdot S_{10}\, R_{33} / r^2 \ . \tag{22}$$

А вираз для вихідної напруги фотоприймача в залежності від площі освітлюваного фоточутливого шару фотодіода

$$U_{\Phi} = I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z) \cdot S_{10}\, R_{33} S / r^2 \ . \tag{23}$$

Вираз (23) є максимально спрощеною математичною моделлю фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач як перетворювача площі в напругу, яку можна використовувати при умові того, що ширина спектру опромінення значно менша граничної частоти фотодіода.

З урахуванням формули (23) рівняння перетворення ВК матиме вигляд

$$N_x = \frac{I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z) \cdot S_{10}\, R_{33} S / r^2 \cdot K}{U_{опорн.}} \cdot 2^n , \tag{24}$$

де K – коефіцієнт підсилення ОП;

$U_{опорн.}$ – опорна напруга АЦП;

n – розрядність АЦП.

Статична характеристика ВК (функція перетворення) представлена на рис.2.

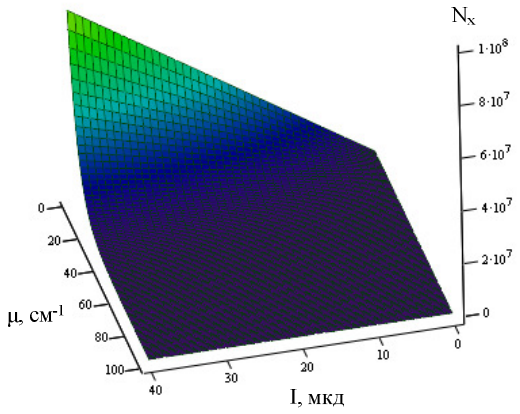


Рисунок 2 – Просторова функція перетворення ВК

Як видно з рис. 2, отримане рівняння перетворення має нелінійний характер. Функція перетворення ВК є вихідною при отриманні аналітичних залежностей для оцінювання таких статичних метрологічних характеристик як номінальна функція, функція перетворення, чутливість, похибка нелінійності, адитивна і мультиплікативна складові похибки.

Номінальний коефіцієнт перетворення або чутливість в діапазоні зміни вимірювального параметру [3, 5]

$$S_I = \frac{\partial N_x}{\partial I} = \frac{e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{зз} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}}. \quad (25)$$

Зміна чутливості в діапазоні перетворення інформативного параметру I дорівнює [5]

$$S_I{}' = \frac{\partial^2 N_x}{2 \cdot \partial I^2} = 0; \qquad S_I{}'' = \frac{\partial^3 N_x}{6 \cdot \partial I^3} = 0. \quad (26)$$

Коефіцієнт впливу впливної величини μ на вихідний параметр $N_x$ дорівнює

$$\beta = \frac{\partial N_x}{\partial \mu} = -\frac{I \cdot z \cdot e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{зз} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}}. \quad (27)$$

Швидкість зміни коефіцієнта впливу на вихідний сигнал

$$\mathrm{P}(\beta) = \frac{\partial^2 N_x}{2 \cdot \partial \mu^2} = \frac{I \cdot z^2 \cdot e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{зз} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}}. \quad (28)$$

Коефіцієнт сумісного впливу інформативного параметру $I$ та впливної величини $\mu$ на номінальну чутливість $S_I$ визначається

$$\alpha = \frac{\partial^2 N_x}{\partial I \partial \mu} = -\frac{z \cdot e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{зз} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}}. \quad (29)$$

Номінальна функція перетворення

$$N_н = S_I \cdot I + S_I{}' \cdot I^2 + S_I{}'' \cdot I^3 = \frac{I \cdot e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{зз} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}}. \quad (30)$$

Абсолютна похибка $\Delta N_н$ нелінійності номінальної функції вимірювального перетворення дорівнює

$$\Delta N_н = S_I{}' \cdot (I - I_н)^2 + S_I{}'' \cdot (I - I_н)^3 = 0. \quad (31)$$

Відносна похибка $\delta_н$ нелінійності номінальної функції вимірювального перетворення

$$\delta_н = \frac{\Delta \mathrm{N_н}}{\mathrm{S_I} \cdot (I - I_н)}, \quad (32)$$

звідки $\delta_н = 0$.

Абсолютна мультиплікативна похибка перетворення

$$\Delta N_м = \alpha \cdot I \cdot \Delta \mu = -\frac{I \cdot \Delta \mu \cdot z \cdot e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{зз} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}}. \quad (33)$$

Абсолютна адитивна похибка перетворення

$$\Delta N_a = \beta \cdot (\mu - \mu_н) + \beta' \cdot (\mu - \mu_н)^2 = -\frac{I \cdot (\mu - \mu_н) \cdot z \cdot e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{зз} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}} + \frac{I \cdot (\mu - \mu_н)^2 \cdot z^2 \cdot e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{зз} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}}. \quad (34)$$

Отримані результати аналітичних залежностей (25 – 34) основних статичних метрологічних характеристик ВК наведені на рис. 3 – 9 [7]

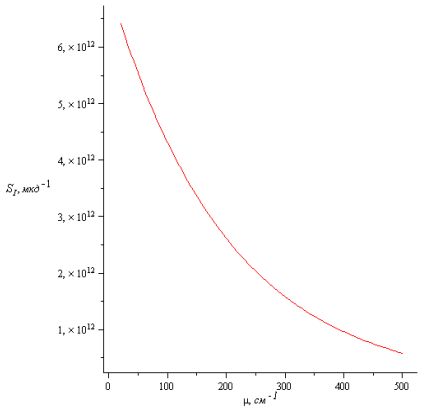


Рисунок 3 – Чутливість в діапазоні зміни інформативного параметру

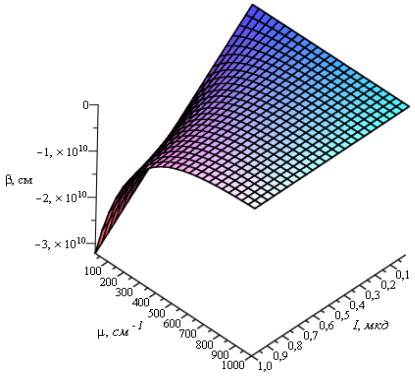


Рисунок 4 – Коефіцієнт впливу впливної величини

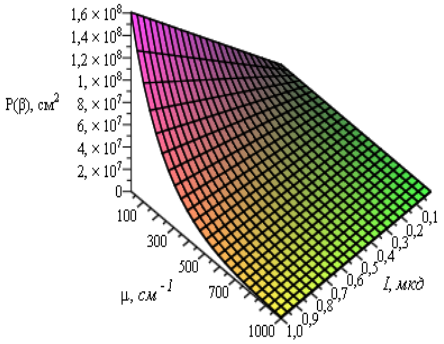


Рисунок 5 – Швидкість зміни коефіцієнта впливної величини по вихідному параметру

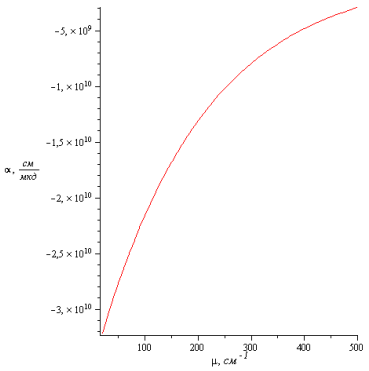


Рисунок 6 – Коефіцієнт сумісного впливу коефіцієнта послаблення і впливної величини на номінальну чутливість

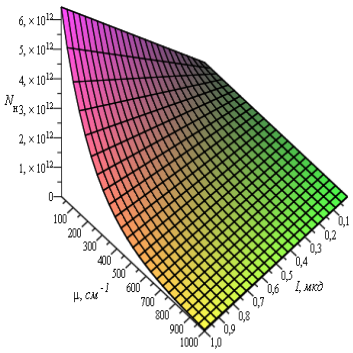


Рисунок 7 – Номінальна функція перетворення

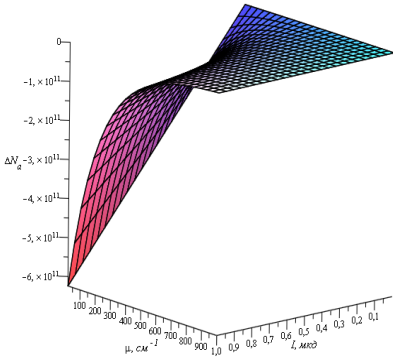


Рисунок 8 – Абсолютна мультиплікативна похибка

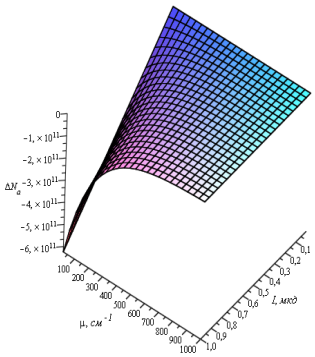


Рисунок 9 – Абсолютна адитивна похибка

## Висновки

В статті було проведено оцінювання основних метрологічних характеристик фотоплетизмографічного приладу діагностування стану периферичного кровообігу.

1. Отримано рівняння перетворення вимірювального каналу, побудувано структурну схему приладу та складено математичну модель фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач.

2. Складено рівняння перетворення і отримано просторову функцію перетворення вимірювального каналу.

3. Отримано формули для розрахунку таких метрологічних характеристик як чутливість, коефіцієнт впливу виливної величини, швидкість зміни коефіцієнта впливної величини по вихідному параметру, номінальна функція перетворення, абсолютна мультиплікативна та абсолютна адитивна похибки і отримано їх графічні залежності.

## Список літератури

1. Оптико-електронні засоби діагностування периферичного кровообігу з підвищеною достовірністю / [Павлов С. В., Козловська Т. І., Василенко В. Б.] – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 140 с.

2. Фізичні основи біомедичної оптики / [Павлов С. В., Кожем'яко В. П., Колісник П. Ф. КозловськаТ. І., Думенко В. П.] – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 155 с.

3. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навч. посіб. / [Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк] – Вінниця: Велес, 2011. – 219 с. – ISBN 966-7993-18-3.

4. Метрологія та вимірювальна техніка: навч. пос. / Кухарчук В.В., Кучерук В. Ю., Долгополов В. П., Грумінська Л. В. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 252 с.

5. Василевський О. М. Елементи теорії підвищення точності вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів взаємозв'язаних електромоторів / О. М. Василевський, П. І. Кулаков. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 176 с. – ISBN 978-966-641-420-8.

6. Источники и приемники излучения: учебн. пос. для студ. оптич. спец. вузов / Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, А. Л. Андреев, Г. В. Польщиков – СПб. : Политехника, 1991. – 240 с. – ISBN 5-7325-0164-9.

7. Поджаренко В. О. Оцінка статичних метрологічних характеристик вимірювальних каналів вібрації / В. О. Поджаренко, О. М. Василевський, В. М. Севастьянов // Український метрологічний журнал. – Х. – 2005. – №1. – С. 21-27.

## Відомості про авторів

**Злепко Сергій Макарович –** д.т.н., професор, завідувач кафедри проектування медико-біологічної апаратури, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця.

**Козловська Тетяна Іванівна** – к.т.н., старший викладач кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця.

**Стасенко Владислав Антонович** – к.ф.-м.н., доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця.

**Павлов Володимир Сергійович** – студент групи О-15, факультету комп'ютерних систем та автоматики, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця.

**Думенко Вікторія Петрівна** – к.т.н., старший викладач кафедри загальної фізики, Вінницький державний педагогічний університет ім. М. Коцюбинського, Острозького, 32, м. Вінниця.