

БІОЛОГІЧНІ ТА МЕДИЧНІ ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ

УДК 681.785; 681.518.5; 504.064.3

С. М. Кватернюк

ОПТИМАЛЬНИЙ СИНТЕЗ ЗАСОБІВ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ТЕЛЕВІЗІЙНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ НЕОДНОРІДНИХ БІОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Анотація: У роботі проаналізовано можливості вибору оптимальної структури засобів мультиспектрального телевізійного контролю та діагностування з метою забезпечення необхідної точності вимірювань біофізичних і структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ, а також необхідної достовірності контролю стану неоднорідних біологічних середовищ. Задача оптимального вибору робочих довжин хвиль спектральних каналів та їх ширини засобів телевізійного вимірювального контролю та діагностики розв'язана за допомогою покрокової множинної регресії з включенням незалежних змінних. Наведено приклади розрахунку оптимальної структури засобів телевізійного вимірювального контролю та діагностики при використанні різних типів джерел випромінювання.

Ключові слова: мультиспектральний контроль, засіб контролю, телевізійний вимірювальний контроль, неоднорідне середовище

Аннотация: В работе проанализированы возможности выбора оптимальной структуры средств мультиспектрального телевизионного контроля и диагностирования с целью обеспечения требуемой точности измерений биофизических и структурных параметров неоднородных биологических сред, а также необходимой достоверности контроля состояния неоднородных биологических сред. Задача оптимального выбора рабочих длин волн спектральных каналов и их ширины средств телевизионного измерительного контроля и диагностики решена с помощью пошаговой множественной регрессии с включением независимых переменных. Приведены примеры расчета оптимальной структуры средств телевизионного измерительного контроля и диагностики при использовании различных типов источников излучения.

Ключевые слова: мультиспектральный контроль, средства контроля, телевизионный измерительный контроль, неоднородная среда

Abstract: The paper analyzes the possibilities of choosing the optimal structure of multispectral television monitoring and diagnostic tools to ensure the required accuracy of measurements of biophysical and structural parameters of inhomogeneous biological media, as well as the necessary reliability of monitoring the state of heterogeneous biological media. The problem of the optimal choice of operating wavelengths of spectral channels and their widths for television measurement control and diagnostics is solved by a stepwise multiple regression with inclusion of independent variables. Examples are given of calculating the optimal structure of television measuring instruments and diagnostics using different types of radiation sources.

Key words: multispectral control, means of control, television measurement control, inhomogeneous medium

Вступ

Мультиспектральний телевізійний вимірювальний контроль та діагностування параметрів неоднорідних біологічних середовищ здійснюється на основі обробки масиву мультиспектральних зображень досліджуваного об'єкту отриманих ПЗЗ камерою на n довжинах хвиль з вибраними діапазонами довжин хвиль у кожному з вимірювальних каналів. Вибір оптимальної кількості спектральних каналів, діапазону довжин хвиль кожного з каналів та необхідної роздільної здатності ПЗЗ-камери здійснюється при оптимізації структури вимірювального засобу на основі пошуку відмінностей при статистичній обробці спектральних характеристик коефіцієнту дифузного відбивання досліджуваних об'єктів, з апіорі відомим станом, що забезпечує необхідні параметри швидкодії, вірогідності контролю чи точності діагностування. Відмінність між придатним та непридатним об'єктом визначається, як відстань у n -вимірному мультиспектральному просторі для кожного пікселя з масиву мультиспектральних зображень. Крім того, координати у n -вимірному мультиспектральному просторі елементів зображення порівнюються з координатами шкали, що відповідають відомим станам досліджуваного об'єкту. Побудова оптимальних засобів мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю та діагностування полягає у виборі оптимальної кількості спектральних каналів, діапазону довжин хвиль кожного з каналів та необхідної роздільної здатності ПЗЗ-камери на основі статистичної обробки спектральних характеристик коефіцієнту дифузного відбивання досліджуваних об'єктів.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю підвищення достовірності контролю біофізичних та структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ з використанням методів мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю.

Метою дослідження є підвищення достовірності контролю та точності діагностування параметрів

неоднорідних біологічних середовищ шляхом вдосконалення мультиспектральних методів телевізійного вимірювального контролю.

Спектральні характеристики джерел випромінювання і ПЗЗ-камери засобу мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю

Реалізувати метод мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю можливо двома способами: використавши широкопasmове джерело випромінювання і вузькоспasmові фільтри на вході ПЗЗ камери або вузькоспasmові джерела випромінювання і широкопasmову ПЗЗ камеру. У даній роботі використано другий підхід.

Перевіримо можливість використання у якості джерел випромінювання лінійки світлодіодів, лінійки лазерних діодів чи перестроюваного монохроматора з щілиною, що забезпечує ширину смуги пропускання 5, 10 та 20 нм. При цьому спектральні характеристики джерел випромінювання наведено на рис. 1.

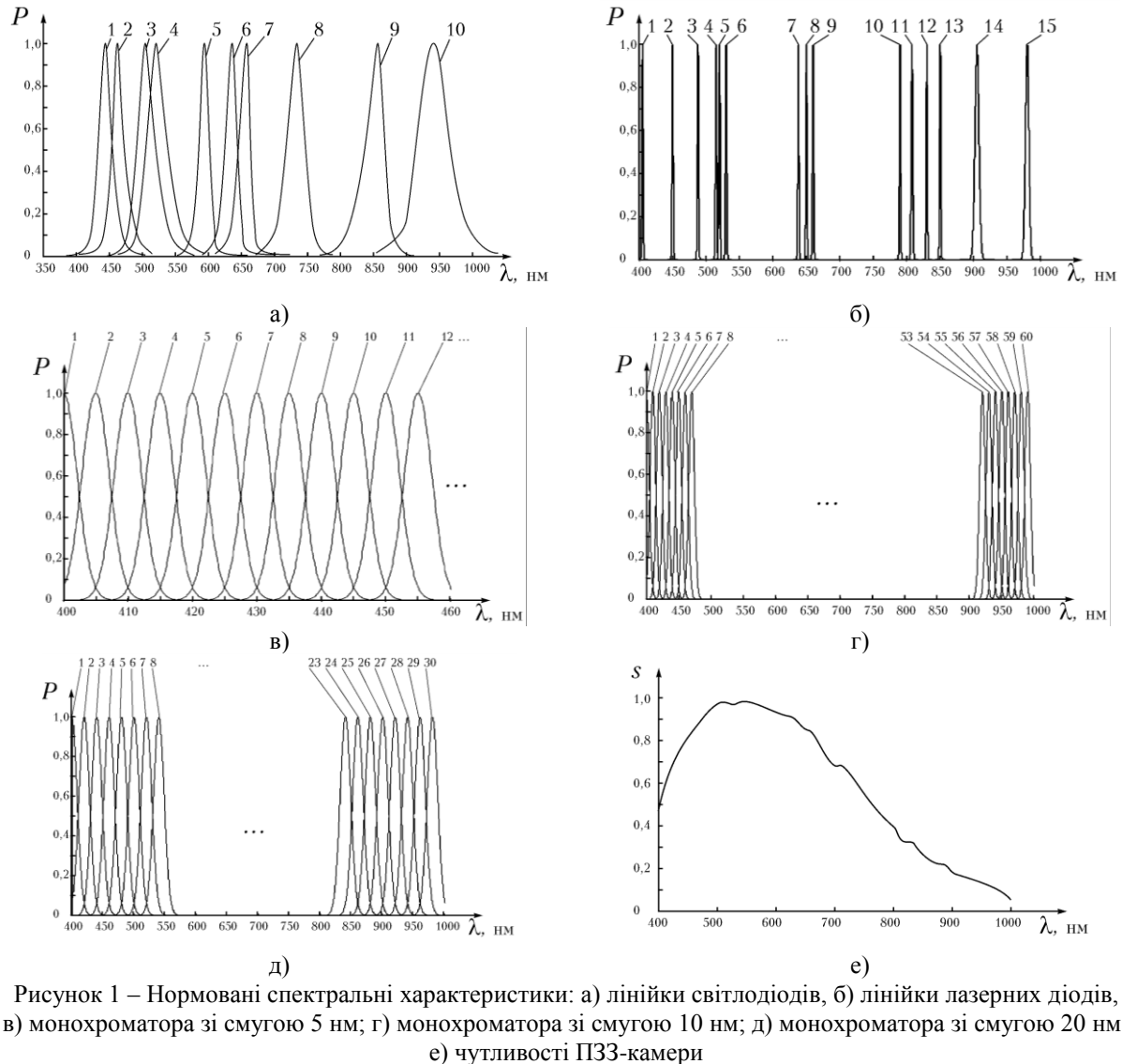


Рисунок 1 – Нормовані спектральні характеристики: а) лінійки світлодіодів, б) лінійки лазерних діодів, в) монохроматора зі смугою 5 нм; г) монохроматора зі смугою 10 нм; д) монохроматора зі смугою 20 нм; е) чутливості ПЗЗ-камери

На рис. 1,а наведено спектральні характеристики випромінювання лінійки світлодіодів наступних типів з такими параметрами домінуючої довжини хвилі та ширини смуги випромінювання на рівні 0,5: 1 – PM2B-1LDE, 455 нм (20 нм); 2 – PM2B-1LBE, 465 нм (20 нм); 3 – PM2B-1LCE, 505 нм (30 нм); 4 – PM2B-1LGE, 525 нм (30 нм); 5 – PM2B-1LAE, 592 нм (20 нм); 6 – PM2B-1LRE, 623 нм (20 нм); 7 – PM2B-1LME, 660 нм (20 нм); 8 – PM2B-1LEE, 730 нм (30 нм); 9 – SFH 4235, 850 нм (30 нм); 10 – TSAL4400, 940 нм (50 нм) [1–3];

На рис. 1,б наведено спектральні характеристики випромінювання лінійки лазерних діодів наступних типів з такими параметрами домінуючої довжини хвилі та ширини смуги випромінювання на рівні 0,5: 1 – SLD3236VF, 405 нм (2 нм); 2 – PL 450B, 450 нм (2 нм); 3 – PLT5 488, 488 нм (2 нм); 4 – PL 515,

515 нм (2 нм); 5 – PL520, 520 нм (2 нм); 6 – PLT5 520_B3, 530 нм (2 нм); 7– ML520G71, 638 нм (2 нм); 8 – LPC836, 650 нм (2 нм); 9 – ML101U29, 660 нм (2 нм); 10 – SLD231VL, 790 нм (2 нм); 11 – RLCO-808-5000-TO3, 808 нм (2,5 нм); 12 – GH0832BA2A, 830 нм (2 нм); 13 – PL-SLC-00-S20-C0, 850 нм (2 нм); 14 – SPL LL90, 905 нм (7 нм); 15 – SPL LL93, 980 нм (6 нм) [4–14].

На рис. 1,в–д наведено спектральні характеристики випромінювання для монохроматора МУМ-2 зі зміною довжини хвилі від 400 до 1000 нм, який використовує щілини, що забезпечують ширину смуги випромінювання на рівні 0,5, 10 та 20 нм. При цьому буде забезпечено 120, 60 та 30 спектральних каналів для вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ.

У якості ПЗЗ камери використаємо MDC140BW з такими параметрами: розділова здатність 1,3 Мп, спектральний діапазон 350-1000 нм, динамічний діапазон 66 дБ. Спектральна характеристика чутливості даної ПЗЗ камери наведена на рис. 1,е [15].

Математичне моделювання спектрів дифузного відбивання для опосередкованого вимірювання біофізичних та структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ

Вимірювання біофізичних та структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ проведемо на прикладі нормальних та патологічних ділянок біотканин шкіри людини. У якості математичної моделі для розв'язання прямої оптичної задачі розрахунку спектральних характеристик неоднорідного біологічного середовища при відомих його біофізичних та структурних параметрах використаємо моделі наведені у роботах [16, 17] з такими параметрами:

1. Нормальна інтактна шкіра людини: об'ємний вміст меланіну змінюється від 0,5% до 3% з кроком 0,0168%; об'ємний вміст крові у шарах дерми 2%; насиченість крові киснем 98%; гематокрит 45%; концентрація гемоглобіну 2,306 ммоль/л;

2. Патологічна ділянка шкіри людини з крововиливом: об'ємний вміст крові у дермі змінюється від 20% до 50% з кроком 0,2013 %, об'ємний вміст меланіну 1,8%;

3. Патологічна ділянка шкіри людини зі зміною оксигенації від 60% до 99% з кроком 0,26%, об'ємний вміст крові у шарах дерми 35%; об'ємний вміст меланіну 1,8%.

Для кожного з випадків отримано 150 спектральних характеристик коефіцієнту дифузного відбиття з роздільною здатністю 0,1 нм. На рис.2 показано спектральні характеристики при зміні параметрів відповідних біофізичних структурних параметрів у визначеному інтервалі із заданим кроком.

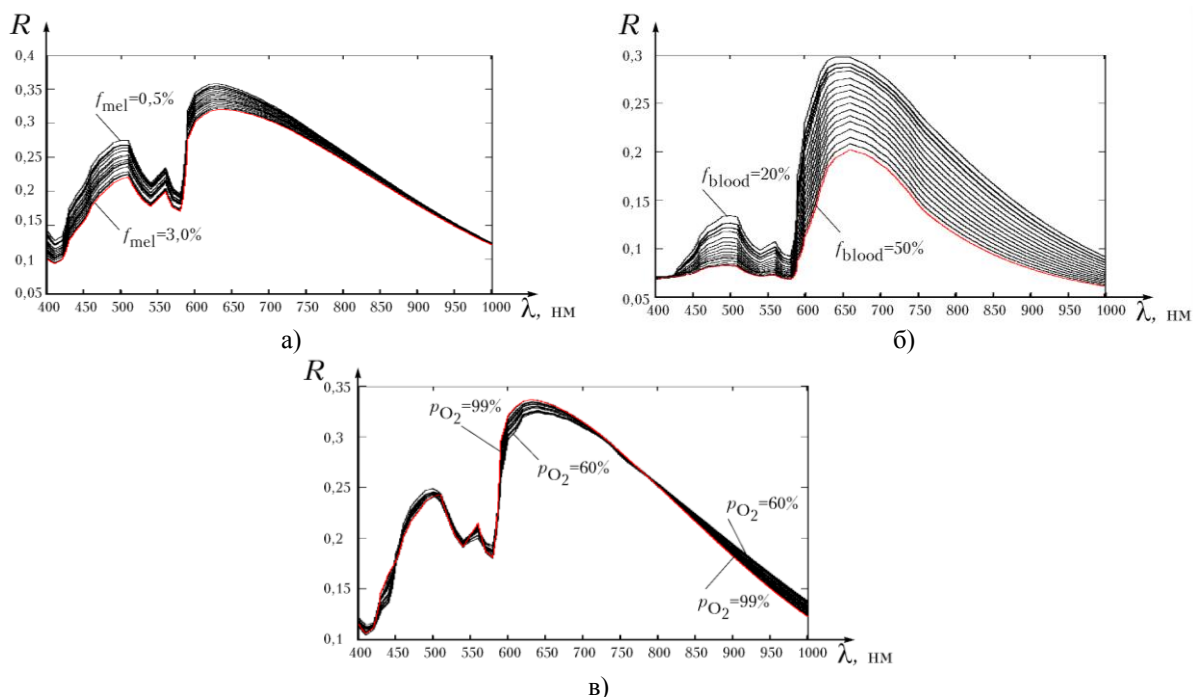


Рисунок 3 – Спектральні характеристики коефіцієнту дифузного відбиття неоднорідного біологічного середовища шкіри людини при заданих біофізичних та структурних параметрах

Отримавши спектральні характеристики об'єкту дослідження, джерела випромінювання та ПЗЗ камери розрахуємо мультиспектральні параметри [18]:

$$\begin{cases} M_1 = \sum_{i=1}^{i_{\max}} P_1(\lambda_i) s(\lambda_i) R(\lambda_i) \Delta\lambda; \\ M_2 = \sum_{i=1}^{i_{\max}} P_2(\lambda_i) s(\lambda_i) R(\lambda_i) \Delta\lambda; \\ \dots \\ M_n = \sum_{i=1}^{i_{\max}} P_n(\lambda_i) s(\lambda_i) R(\lambda_i) \Delta\lambda. \end{cases} \quad (1)$$

де $P_j(\lambda_i)$ – спектральна характеристика джерела випромінювання, $s(\lambda_i)$ – спектральна характеристика чутливості ПЗЗ камери, $R(\lambda_i)$ – спектральна характеристика коефіцієнту дифузного відбиття об'єкту дослідження.

Мультиспектральні телевізійні вимірювання здійснюються опосередковано. Похибку вимірювання мультиспектральних параметрів прийmemo рівною 2%, що відповідає використанню ПЗЗ камери з розрядністю 10 біт, співвідношенням сигнал-шум 66 дБ і роздільною здатністю 1,3 Мп. Результати розрахунку мультиспектральних параметрів за відомими спектральними характеристиками при зміні об'ємної концентрації меланіну та використанні джерела випромінювання на основі лінійки світлодіодів наведено на рис.3.

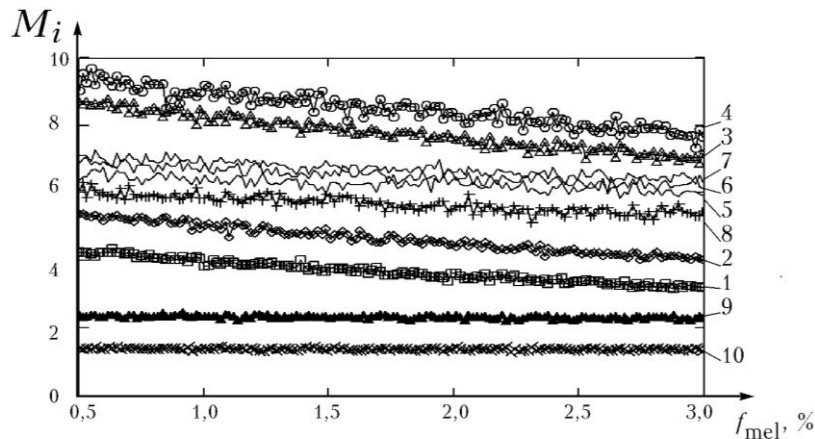


Рисунок 3 – Результати розрахунку мультиспектральних параметрів за відомими спектральними характеристиками при використанні джерела випромінювання на основі лінійки світлодіодів

Вибір оптимальної структури засобів мультиспектрального телевізійного контролю та діагностування

Розв'язання оберненої оптичної задачі для визначення біофізичних і структурних неоднорідного біологічного середовища за мультиспектральними параметрами можна провести декількома способами:

- за допомогою розв'язку систем трансцендентних рівнянь;
- за допомогою множинної регресії;
- на основі нечіткої логіки;
- на основі нейромережі.

Розглянемо окремий випадок, коли необхідно знайти один з невідомих біофізичних чи структурних параметрів середовища, якщо інші біофізичні та структурні параметри розподілені за нормальним законом розподілу з відомим середньоарифметичним значенням та середньоквадратичним відхиленням ($M \pm СКВ$).

Вихідними даними для виконання множинної регресії є таблиця, у якій у якості вихідної (залежної) змінної є один з біофізичних чи структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ, що змінювався у певному діапазоні з заданим кроком у ході математичного моделювання спектральних характеристик (розв'язку прямої оптичної задачі), а незалежними змінними є мультиспектральні параметри, отримані на етапі моделювання мультиспектральних телевізійних вимірювань.

Приклад таблиці вихідних даних для визначення об'ємної концентрації меланіну в шкірі наведено у табл.1 за умови використана ПЗЗ камери типу MDC140BW та джерела випромінювання на основі лазерних діодів.

Таблиця 1 – Приклад вихідних даних для опорядкованого вимірювання об'ємної концентрації меланіну за мультиспектральними параметрами з використанням множинної регресії

$f_{mel}, \%$	M_{405}	M_{450}	M_{488}	M_{515}	M_{520}	M_{530}	M_{638}	...	M_{980}
0,0050	0,1567	0,3781	0,5448	0,5443	0,5175	0,4556	0,6467	...	0,0830
0,0052	0,1535	0,3669	0,5507	0,5446	0,5131	0,4728	0,6488	...	0,0814
0,0053	0,1563	0,3808	0,5410	0,5440	0,5135	0,4666	0,6702	...	0,0828
0,0055	0,1482	0,3607	0,5364	0,5539	0,5231	0,4730	0,6716	...	0,0786
0,0057	0,1502	0,3615	0,5395	0,5135	0,5102	0,4571	0,6600	...	0,0850
0,0058	0,1496	0,3720	0,5418	0,5276	0,4971	0,4587	0,6694	...	0,0788
...
0,1505	0,1121	0,2802	0,4320	0,4494	0,4207	0,3891	0,5913	...	0,0784
0,0300	0,1098	0,2774	0,4065	0,4452	0,4056	0,3908	0,6104	...	0,0814

Множинну регресію виконуємо у програмі STATISTICA 6.0. Загальне призначення множинної регресії полягає у аналізі зв'язку між декількома незалежними змінними та залежною змінною. При цьому ступінь залежності незалежних змінних і залежної змінної виражається за допомогою коефіцієнта множинної регресії R.

З використанням покрокової регресії проаналізуємо незалежні змінні (у даному випадку, мультиспектральні параметри), що дозволяють найбільш точно визначити залежні змінні – біофізичні і структурні параметри неоднорідних біологічних середовищ. На початку необхідно визначити, які мультиспектральні параметри, що відповідають певним довжинам хвиль та спектральним діапазонам, дозволяють найбільш точно здійснювати непрямі (опосередковані) вимірювання одного з біофізичних чи структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ. Для випадку, наведеного у табл. 1 за мультиспектральними параметрами визначається об'ємна концентрація меланіну.

Використаємо процедуру виконання множинної регресії з покроковим включенням незалежних змінних, що здійснює вибір незалежних змінних на кожному кроці додаючи чи видаляючи їх з моделі виходячи із заданого користувачем критерію [19, 20]. Прийmemo значення критерію Фішера F у програмі STATISTICA по замовчуванню, а саме незалежна змінна включається у модель, якщо $F > 1$, і виключається з моделі, якщо $F = 0$. Задасмо в програмі STATISTICA 6.0 відображення результатів множинної регресії на кожному кроці, а саме виведення критерію Фішера F, коефіцієнту детермінації R та стандартної похибки рівняння регресії Δ .

На основі даних табл.1 програма виконала покрокову множинну регресію у 8 кроків поступово додаючи змінні зважаючи на їх внесок у точність визначення заданого параметру (у даному випадку об'ємної концентрації меланіну f_{mel}). Результати розрахунків на кожному кроці множинної регресії наведено у табл.2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку множинної регресії для опорядкованого вимірювання об'ємної концентрації меланіну з покроковим додаванням змінних

N	λ , нм	F	Δ	R
1	450	2210,499	0,001832198	0,96811581
2	450; 488	1735,674	0,001479228	0,97947625
3	450; 488; 405	1501,809	0,001304660	0,98418077
4	450; 488; 405; 515	1424,171	0,001164183	0,98751121
5	450; 488; 405; 515; 830	1218,834	0,001126579	0,98839077
6	450; 488; 405; 515; 830; 530	1068,931	0,001098883	0,98903481
7	450; 488; 405; 515; 830; 530; 660	959,7527	0,001074286	0,98959644
8	450; 488; 405; 515; 830; 530; 660; 638	871,2122	0,001055199	0,99003572

Перевіримо незалежні змінні, які використовуються при виконанні регресії на наявність кореляційного зв'язку між собою, тобто здійснимо перевірку наявності мультиколінеарності (табл. 3). Оскільки між мультиспектральними параметрами M_{405} , M_{450} , M_{488} , M_{515} , M_{530} , M_{638} , M_{660} отримано коефіцієнт кореляції понад 0,7, тобто існує сильний кореляційний зв'язок, то виникає явище мультиколінеарності.

Мультиколінеарність є загальною проблемою для багатьох методів кореляційного аналізу [19, 20]. Мультиколінеарність – це явище, що може виникнути при побудові множинної кореляційно-регресійної моделі при наявності лінійного взаємозв'язку між двома чи більше факторними ознаками [21]. Наявність мультиколінеарності не дозволяє побудувати якісну регресійну модель, оскільки призводить до зміщення оцінок регресії між факторними ознаками, що робить неможливим визначення чіткого впливу різних

факторів на результуючу ознаку. При цьому програма STATISTICA видає повідомлення про погану обумовленість матриці.

Таблиця 3 – Перевірка мультиколінеарності мультиспектральних параметрів для опорядкованого вимірювання об'ємної концентрації меланіну

	M ₄₀₅	M ₄₅₀	M ₄₈₈	M ₅₁₅	M ₅₃₀	M ₆₃₈	M ₆₆₀	M ₈₃₀
M ₄₀₅	1,000000	0,953907	0,929987	0,908744	0,875725	0,791316	0,774044	0,511367
M ₄₅₀	0,953907	1,000000	0,942450	0,925497	0,886978	0,796939	0,758432	0,494900
M ₄₈₈	0,929987	0,942450	1,000000	0,923531	0,877584	0,803897	0,744765	0,486039
M ₅₁₅	0,908744	0,925497	0,923531	1,000000	0,874725	0,808480	0,762579	0,489927
M ₅₃₀	0,875725	0,886978	0,877584	0,874725	1,000000	0,731873	0,679933	0,504686
M ₆₃₈	0,791316	0,796939	0,803897	0,808480	0,731873	1,000000	0,645976	0,476874
M ₆₆₀	0,774044	0,758432	0,744765	0,762579	0,679933	0,645976	1,000000	0,418668
M ₈₃₀	0,511367	0,494900	0,486039	0,489927	0,504686	0,476874	0,418668	1,000000

Мультиколінеарність не знижує якість прогнозованих значень показників, оскільки зростання кількості досліджуваних факторів підвищує значення коефіцієнта детермінації, а відповідно і точність прогнозу. Однак на визначення оцінок дійсних значень параметрів регресії мультиколінеарність впливає негативно та призводить до виникнення великих похибок. Якщо у аналіз включена велика кількість незалежних змінних, то виникнення проблеми мультиколінеарності може стати помітним не одразу, а вже після включення змінних у регресійне рівняння [21]. У випадку коли ця проблема виникає, це означає, що хоча б одна із залежних змінних (предикаторів) є зайвою при наявності інших предикаторів [19, 20]. Програма STATISTICA використовує декілька статистичних індикаторів такої надлишковості, зокрема, толерантність, а також деякі засоби для усунення надлишковості, наприклад, гребінчасту регресію. Для оцінювання отриманих рівнянь множинної регресії використовують аналіз залишків. Для усунення мультиколінеарності необхідне вилучення однієї чи декількох корельованих факторних ознак.

Таким чином, для усунення мультиколінеарності вилучимо змінні, між якими існує сильний кореляційний зв'язок і залишимо лише дві спектральні смуги з довжинами хвиль 450 і 830 нм. При цьому забезпечується $F=1194,476$; $\Delta=0,00176$ і $R=0,9706$.

Наступний приклад розрахунку множинної регресії проведемо на основі визначення коефіцієнту оксигенації крові в шкірі. Приклад вихідних даних для опорядкованого вимірювання оксигенації крові за мультиспектральними параметрами при використанні у якості джерела випромінювання лінійки світлодіодів наведено у табл. 4. Аналогічні таблиці побудовані при використанні у якості джерел випромінювання світлодіодів, лазерних діодів і монохроматора.

Таблиця 4 – Приклад вихідних даних для опорядкованого вимірювання оксигенації крові за мультиспектральними параметрами з використанням множинної регресії

PO ₂ , %	M ₄₅₅	M ₄₆₅	M ₅₀₅	M ₅₂₅	M ₅₉₂	M ₆₂₃	M ₆₆₀	...	M ₉₄₀
0,6000	0,9047	0,9720	0,9524	0,9469	0,9006	0,9083	0,8789	...	0,9976
0,6026	0,8851	0,9496	0,9742	0,9596	0,9039	0,9429	0,8849	...	0,9520
0,6052	0,9140	0,9904	0,9635	0,9681	0,9126	0,9343	0,9141	...	0,9572
0,6079	0,8572	0,9286	0,9434	0,9700	0,9162	0,9389	0,9153	...	0,9761
0,6105	0,8630	0,9314	0,9517	0,9028	0,8990	0,9129	0,8991	...	0,9937
0,6131	0,8728	0,9645	0,9599	0,9317	0,8805	0,9202	0,9137	...	0,9881
...
0,9874	0,9731	0,9506	0,9691	0,9682	0,9553	0,9588	0,9280	...	0,8711
0,9900	0,9331	0,9313	0,9104	0,9619	0,9317	0,9784	0,9537	...	0,8995

Використаємо процедуру виконання множинної регресії з покроковим включенням незалежних змінних. Результати розрахунку множинної регресії для опорядкованого вимірювання оксигенації крові з покроковим додаванням змінних та використанням у якості джерела випромінювання лінійки світлодіодів наведено у табл. 5.

За результатом покрокової множинної регресії з метою визначення оксигенації крові за мультиспектральними параметрами при використанні світлодіодів отримано 8 спектральних інтервалів (940; 592; 455; 465; 623; 660; 850; 505 нм), що дозволило досягти $F=68,236$; $\Delta=0,053$ і $R=0,891$. При перевірці на мультиколінеарність отримано коефіцієнти кореляції менше 0,7, тобто між цими змінними кореляційний зв'язок відсутній, що показує відсутність явища мультиколінеарності.

Таблиця 5 – Результати розрахунку множинної регресії для опорядкованого вимірювання оксигенації крові з покроковим додаванням змінних

N	λ , нм	F	Δ	R
1	940	177,1117	0,076983674	0,73808664
2	940; 592	164,3551	0,063641982	0,83125710
2	940; 592; 455	140,0078	0,058344212	0,86142911
3	940; 592; 455; 465	119,9360	0,055534634	0,87630185
4	940; 592; 455; 465; 623	101,4373	0,054395411	0,88253339
5	940; 592; 455; 465; 623; 660	88,23648	0,053529724	0,88731896
6	940; 592; 455; 465; 623; 660; 850	77,53894	0,053044671	0,89029877
7	940; 592; 455; 465; 623; 660; 850; 505	68,23609	0,052962900	0,89147438

Аналогічно, при використанні у якості джерел випромінювання лазерних діодів отримано 5 спектральних інтервалів (980; 905; 638; 660; 650 нм) при $F=126,12$; $\Delta=0,04987$ і $R=0,902$. При перевірці на мультиколінеарність отримано коефіцієнти кореляції менше 0,7, що показує відсутність явища мультиколінеарності. При використанні у якості джерела випромінювання монохроматора з шириною щілини 20 нм отримано 6 спектральних інтервалів (1000; 820; 480; 440; 400; 460 нм) при $F=40917,82$; $\Delta=0,0028$ і $R=0,99971$.

Висновки

Засоби мультиспектрального вимірювального контролю та діагностики біофізичних і структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ ґрунтуються на опосередкованому вимірюванні параметрів з використанням множинної регресії. При цьому постає задача оптимального вибору структури вимірювальних засобів, зокрема робочих довжин хвиль спектральних каналів та їх ширини. У даній роботі ця задача розв'язана за допомогою покрокової множинної регресії з включенням незалежних змінних. Показано приклади розрахунку оптимальної структури засобів телевізійного вимірювального контролю та діагностики при використанні у якості джерел випромінювання лінійки світлодіодів, лазерних діодів, а також монохроматора. Вибір тієї чи іншої структури вимірювальних засобів визначається необхідною точністю опосередкованого вимірювання необхідних біофізичних та структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ, що в результаті забезпечить достатню достовірність контролю. Запропонований підхід до оптимального синтезу дозволяє вдосконалити засоби мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю параметрів та діагностування [18, 22].

Список використаних джерел

1. ProLight PM2B-1LxE 1W Power LED Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: <http://www.micropik.com/PDF/PM2B-1Lxx-Rx.pdf>.
2. IR-Lumineszenzdiode (850 nm) mit hoher Ausgangsleistung High Power Infrared Emitter (850 nm). SFH 4235 Technical Datasheet. [Electronic resource]. URL: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic3/00221909_0.pdf.
3. High Power Infrared Emitting Diode, 940 nm, GaAlAs/GaAs TSAL4400. Technical Datasheet. [Electronic resource]. URL: <http://www.vishay.com/doc?81006>.
4. SONY Laser Diode 3236VF Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: <http://www.datasheetspdf.com/datasheet/SLD3236VF.html>.
5. OSRAM Opto Semiconductors GmbH. PLT5 450B. Blue Laser Diode in TO56 Package Version 0.4 Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic3/00251627_0.pdf/PLT5%20450B.pdf.
6. OSRAM Opto Semiconductors GmbH. PLT5 488. Cyan Laser Diode in TO56 Package Preliminary Version 0.2 Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic6/00206440_0.pdf/PLT5%20488.pdf.
7. OSRAM Opto Semiconductors GmbH. PL 515 PRELIMINARY. Green Laser Diode in TO38 ICut Package. Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: http://www.semicomvisual.com/wp-content/uploads/2015/04/pl_515datasheet.pdf.
8. OSRAM Opto Semiconductors GmbH. PL 520B. Green Laser Diode in TO38 ICut Package Version 0.2. Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic7/00234693_0.pdf/PL%20520.pdf.
9. OSRAM Opto Semiconductors GmbH. PLT5 520_B1_2_3. Green Laser Diode in TO56 Package Version 0.1. Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: <http://www.chips4light.com/assets/Uploads/PLT5-520-B1-2-3.pdf>.
10. Mitsubishi Laser Diode ML520G71. Technical Datasheet [Electronic resource]. URL:

- <http://www.laser66.com/html/ML520G71.pdf>.
11. Mitsubishi Laser Diode ML1xx29. Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: <https://www.rairarubiabooks.com/related-pdf-datasheet-mitsubishi.html>.
 12. SONY Laser Diode SLD231VL. Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/sony/a6802259.pdf>.
 13. Roithner Laser Technik GmbH. Laser Diode RLCO-808-5000-TO3. Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: http://www.roithner-laser.com/datasheets/ld_div/rlco-808-5000-to3.pdf
 14. Sharp Laser Diode GH0832BA2A . Technical Datasheet [Electronic resource]. URL: http://www.sesl-sharp.com/Products/pdf/led_laser201303_e.pdf.
 15. ScopeTek Product Manual. – SCOPEТЕК. – 2015. – 116p.
 16. Моделювання спектральних характеристик шару епідермісу біотканини шкіри як об'єкту біомедичної діагностики / В. Г. Петрук, О. Є. Кватернюк, Ю. С. Любчик, С. М. Кватернюк // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 2. – С. 218–222.
 17. Математичне моделювання впливу параметрів окремих шарів на спектральні характеристики неоднорідних біотканин / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 3. – С. 50–56..
 18. Кватернюк С. М. Метод та засоби мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю стану неоднорідних біологічних середовищ / С. М. Кватернюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 1. – С. 15–22.
 19. Большаков А. А. Методы обработки многомерных данных и временных рядов: Учебное пособие для вузов. / А. А. Большаков, Р. Н. Каримов – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 522 с.
 20. Дубровская Л. И. Компьютерная обработка естественно-научных данных методами многомерной прикладной статистики: Учебное пособие / Л. И. Дубровская, Г. Б. Князев – Томск: ТМЛ-Пресс, 2011. – 120 с.
 21. Азарова А. О. Економетрія : навчальний посібник / А. О. Азарова, Н. В. Саченюк-Кавецька, О. М. Роїк, Ю. В. Міронова. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 304 с..
 22. Спосіб визначення дистанції пострілу на основі мультиспектрального дослідження вогнепальних пошкоджень шкіри людини / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк; О. Є. Кватернюк [та ін.]// Патент України №117337 G01N 21/25 (2006.01) G01N 33/48 (2006.01)/ заявл. 27.12.2016; опубл. 26.06.2017; Бюл. № 12. – 5 с.
Стаття надійшла: 30.06.2017.

Відомості про авторів

Кватернюк Сергій Михайлович – к.т.н., доцент кафедри екології і екологічної безпеки; Вінницький національний технічний університет.