

УДК 602.1:519.85:53.082.9:616-07

¹Василь Марценюк, ²Андрій Сверстюк, ³Сергій Дзядевич, ⁴Володимир Паничев,

²Наталія Климук, ²Наталія Кравець

¹Університет в Бельско-Бялій, Польща

²Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського, Україна

³Інститут молекулярної біології і генетики НАН України

⁴Державна установа «Тернопільський обласний лабораторний центр МОЗ України»

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕПЕРЕРВНОЇ ДИНАМІКИ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ

¹Vasyl Martseniuk, ²Andrii Sverstiuk, ³Sergiy Dzyadevych, ⁴Volodymyr Panychev,

²Nataliia Klymuk, ²Nataliia Kravets

INVESTIGATION OF CONTINUOUS DYNAMICS OF THE CYBER-PHYSICAL SYSTEM FOR CONTROL OF THE QUALITY OF FOOD PRODUCTS

Кіберфізична система (КФС) – фізична система, яка реалізує інтеграцію обчислень та фізичних процесів. Вони відбуваються найчастіше у вигляді вбудованих систем та мереж для моніторингу та контролю фізичних процесів в системах зі зворотним зв'язком. У таких системах динаміка фізичних процесів є джерелом інформації досліджуваного явища з можливістю контролю та розрахунку сигналів керування об'єктом.

Біосенсори є альтернативою відомим методам вимірювання, які використовують в конструкції біологічний матеріал, що забезпечує дуже високу селективність та дає змогу швидко і просто проводити вимірювання [1]. Дослідження КФС на основі біосенсорів є особливо актуальними в зв'язку з необхідністю більш точних методів моніторингу та аналізу якості продуктів харчування. Важливим етапом проектування кіберфізичних біосенсорних систем (КФБСС) є розробка та дослідження їх математичних моделей, які б адекватно відображали процеси, що лежать в основі їх функціонування.

Мета дослідження. Запропонувати математичну модель неперервної динаміки кіберфізичної системи для контролю якості продуктів харчування.

Математична модель неперервної динаміки кіберфізичної системи для контролю якості продуктів харчування.

Розглядається узагальнена модель неперервної динаміки кіберфізичної системи для контролю якості продуктів харчування. Нехай $V_{i,j}(t)$ – концентрація антигенів, $F_{i,j}(t)$ – концентрація антитіл в біопікселі (i, j) , $i, j = \overline{1, N}$.

Модель ґрунтується на таких біологічних припущеннях для довільного біопікселя (i, j) [2]

1. Маємо деяку константу народжуваності, $\beta > 0$ для популяції антигенів.

2. Антигени нейтралізуються антитілами з деякою ймовірнісною швидкістю $\gamma > 0$.
3. Популяція антигенів прагне до деякої межі насичення з швидкістю $\delta_v > 0$.
4. Ми маємо деяку дифузію антигенів з чотирьох сусідніх пікселів $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i, j-1)$, $(i, j+1)$, з швидкістю дифузії $D\Delta^{-2}$, де $D > 0$ і $\Delta > 0$ є відстань між пікселями.
5. Ми маємо деяку сталу смертності антитіл $\mu_f > 0$.
6. Внаслідок імунної відповіді збільшується щільність антитіл з ймовірнісною швидкістю $\eta\gamma$.
7. Популяція антитіл прагне до деякого рівня насичення з швидкістю $\delta_f > 0$.
8. Імунна відповідь з'являється з деякою сталою затримкою в часі $\tau > 0$.

На основі вищевикладеного розглядається дуже просту конструкцію моделі антиген-антитіло із запізненням, для двохвимірною масиву біопікселів, яка ґрунтується

на добре відомій моделі Марчука [3] і використовує просторовий оператор \hat{S}

$$\begin{aligned} \frac{dV_{i,j}(t)}{dt} &= (\beta - \gamma F_{i,j}(t - \tau)) - \delta_v V_{i,j}(t - \tau) V_{i,j}(t) + \hat{S}\{V_{i,j}\} \\ \frac{dF_{i,j}(t)}{dt} &= (-\mu_f + \eta\gamma V_{i,j}(t - \tau) - \delta_f F_{i,j}(t) F_{i,j}(t)) F_{i,j}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Модель (1) задана початковими функціями (2):

$$V_{i,j}(t) = V_{i,j}^0(t) \geq 0, \quad F_{i,j}(t) = F_{i,j}^0(t) \geq 0, \quad t \in [-\tau, 0), \quad V_{i,j}(0), \quad F_{i,j}(0) > 0. \quad (2)$$

Отримано результати чисельного моделювання досліджуваної моделі у вигляді зображення фазових площин, решітчастих зображень ймовірності зв'язків антигенів з антитілами, які характеризують кількість флуоресціюючих пікселів.

Застосування кіберфізичних систем для контролю якості продуктів харчування.

Для контролю фізичних, хімічних та біологічних забруднюючих речовин у продуктах харчування використовуються біосенсори, одним із представників яких є імуносенсори. Розглянемо основні напрямки їх застосування.

Поліхлоровані біфеніли є токсичними органічними сполуками, які також забруднюють продукти харчування. Такі сполуки мають високоліпофільний характер. Для виявлення поліхлорованих біфенілів у продуктах харчування використовуються такі біосенсори: біосенсор на основі дезоксирибонуклеїнової кислоти (ДНК) з хронометричним виявленням, біосенсори з флуоресценцією, електрохімічні біосенсори.

Феноли та їх похідні (хлорфеноли) також є шкідливими факторами для контролю якості продуктів харчування. Такі сполуки в основному використовуються у виробництві барвників, ліків, пластмас, пестицидів, миючих засобів тощо. Виявлення і моніторинг фенолів є дуже важливим процесом, оскільки фенольні сполуки мають високу токсичність та здатні накопичуватися в продуктах харчування. Серед біосенсорів, які найчастіше використовуються для виявлення та моніторингу фенолів є:

електрохімічний біосенсор з ферментом (тирозиназою) – як біорецептор для селективного виявлення фенолу в стічних водах; оптичний біосенсор – використовує хемілюмінесцентні волокна для виявлення хлорфенолів.

Фосфоорганічні сполуки є групою органічних хімічних речовин, які зазвичай використовуються в якості інсектицидів, гербіцидів та пестицидів. У сучасному сільському господарстві вони використовуються для боротьби із шкідниками та бур'янами. Пестициди найбільш широко поширені у воді, ґрунті та продуктах харчування. Їх токсичність та стійкість в продуктах харчування мають негативний вплив на здоров'я населення. Для виявлення пестицидів найбільш широко використовуються сенсори на основі ферментів, наприклад електрохімічні біосенсори були розроблені для виявлення пестицидів у воді, електрохімічні та оптичні – для виявлення гербіцидів.

У подальших дослідженнях необхідно розробити нові КФС для контролю якості продуктів харчування з використанням біосенсорів на основі запропонованої в роботі математичної моделі.

Література:

1. Martsenyuk V. P., Klos-Witkowska A., Sverstiuk A. S. (2018) Study of classification of immunosensors from viewpoint of medical tasks, *Medical informatics and engineering*, 1, 13-19.
2. Martsenyuk V. P., Klos-Witkowska A., Sverstiuk A. S. (2018) Stability, bifurcation and transition to chaos in a model of immunosensor based on lattice differential equations with delay, *Electronic Journal of Qualitative Theory of Differential Equations*, 2018 (27), p. 1–31.
3. Foryś U. (2002) Marchuk's model of immune system dynamics with application to tumour growth. *Journal of Theoretical Medicine*, 1 (4), 85–93.