



ДП «Центральний науково-дослідний інститут  
навігації і управління»

# СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

**Випуск 1(17)**

**Заснований  
у 2007 році**

Наукове періодичне видання,  
в якому відображені результати  
наукових досліджень з розробки та  
удосконалення систем управління,  
навігації та зв'язку у різних  
проблемних галузях.

**Засновник:**

Державне підприємство  
«Центральний науково-дослідний  
інститут навігації і управління».

**Адреса редакційної колегії:**

Україна, 04073, Київ,  
вул. Фрунзе, 160/20.

**Телефон:** +38 (044) 463-99-22  
(консультації, прийом статей).

**E-mail:**

office.nav.u@nbi.com.ua.

**Інформаційний сайт:**

www.csri.kiev.ua

**Реферативна інформація**

зберігається: у загальнодержавній  
реферативній базі даних  
„Україніка наукова” та публікується  
у відповідних тематичних серіях  
УРЖ „Джерело”.

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:**

**Голова:**

КОЗЕЛКОВ Сергій Вікторович (д-р техн. наук, проф.)

**Заступник голови:**

БАРАНОВ Георгій Леонідович (д-р техн. наук, проф.)

**Члени:**

БОГОМЬЯ Володимир Іванович (канд. техн. наук, с.н.с.)

ВАСИЛЕНКО Олександр Васильович (канд. техн. наук, с.н.с.)

ДОВБНЯ Володимир Вікторович (канд. військ. наук, с.н.с.)

ІЛЬІН Олег Юрійович (д-р техн. наук, проф.)

КРАСНОБАЄВ Віктор Анатолійович (д-р техн. наук, проф.)

ЛУХАНІН Михайло Іванович (д-р техн. наук, проф.)

МАШКОВ Олег Альбертович (д-р техн. наук, проф.)

МЕДВЕДЄВ Валерій Павлович (д-р техн. наук, проф.)

МІТРАХОВИЧ Михайло Михайлович (д-р техн. наук, проф.)

МОРГУН Василь Андрійович (д-р іст. наук, проф.)

МОСОВ Сергій Петрович (д-р військ. наук, проф.)

ПАШКОВ Дмитро Павлович (канд. техн. наук, доц.)

ПЕШЕХОНОВ Володимир Григорович (академік РАН, д-р техн. наук, проф.)

СКОРИК Євген Тимофійович (д-р техн. наук, проф.)

СТАВИЦЬКИЙ Сергій Дмитрович (канд. техн. наук, с.н.с.)

СТАСЄВ Юрій Володимирович (д-р техн. наук, проф.)

СУХАНОВ Костянтин Георгійович (канд. техн. наук, с.н.с.)

ТОЛУБКО Володимир Борисович (д-р техн. наук, проф.)

ТУПКАЛО Віталій Миколайович (д-р техн. наук, проф.)

УРУСЬКИЙ Олег Семенович (д-р техн. наук, проф.)

ХОРОШКО Володимир Олексійович (д-р техн. наук, проф.)

ЧЕРЕПКОВ Сергій Тимофійович (канд. техн. наук, доц.)

ЯВТУШЕНКО Анатолій Миколайович (канд. військ. наук, проф.)

**Відповідальний секретар:**

КУЧУК Георгій Анатолійович (канд. техн. наук, с.н.с.)

**Секретар:**

КОЗЕЛКОВА Катерина Сергіївна (канд. техн. наук, с.н.с.)

*За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор*

*Затверджений до друку Вченою радою ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління»  
(протокол № 1 від 12 січня 2011 року)*

*Занесений до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати  
дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук", затвердженого постановою  
президії ВАК України від 16.12.2009 р., № 1-05/6 (технічні науки, № 75; бюлетень ВАК України, № 1, 2010)*

*Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 12154-1038Р від 28.12.2006 р.*

# З М І С Т

## НАВІГАЦІЯ

<i>Баранов Г.Л., Носовський А.М., Тарасюк В.І.</i> Фундаментальні властивості та відношення в сучасних системах навігації, зв'язку та управління рухом .....	2
<i>Тунік А.А., Вальденмайер Г.Г.</i> Аналіз процедур факторизації коваріаційних матриць для задач розширеної калманівської фільтрації в інерційно-супутникових навігаційних системах .....	10
<i>Цулая А.В.</i> Схемные решения и практические рекомендации построения СВЧ-компенсатора помех для контрольно-корректирующей станции .....	16

## КОНТРОЛЬ ПОВІТРЯНОГО І КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ

<i>Білько П.А.</i> Синтез структури повітряного простору вільних маршрутів .....	21
<i>Обод І.І., Охрименко М.Ю., Тюрін О.О., Черних О.П.</i> Структура та показники якості інформаційного забезпечення споживачів сполученими системами спостереження повітряного простору .....	24
<i>Обод І.І., Свид І.В.</i> Порівняльний аналіз варіантів управління інформаційного каналу у запитальних системах спостереження повітряного простору .....	27
<i>Храцевський Р.В.</i> Механізм виявлення проблемних ситуацій "неузгодженості" в системі планування повітряного простору .....	30

## РАДІОЛОКАЦІЯ І РАДІОТЕХНІКА

<i>Гудков М.В.</i> Алгоритм прогнозування технічного стану елементів радіоелектронного обладнання при експлуатації авіаційної техніки за станом з контролем параметрів .....	35
<i>Леценко С.П., Свистунов Д.Ю., Батурицький М.П.</i> Апаратно-програмна модель посадкового радіолокатора радіолокаційної системи посадки в складі тренажно-імітаційного комплексу підготовки офіцерів бойового управління командно-диспетчерських пунктів .....	38
<i>Мегельбей В.В.</i> Метод управління енергетическими (временними) ресурсами многофункциональной РЛС зенитного ракетного комплексу при сопровождении маневрирующих целей .....	42
<i>Попов А.В., Борцова М.В.</i> О поляризаціонной модуляции радиолокационных сигналов, отраженных морской поверхностью .....	46
<i>Смирнов О.Л., Ставицкий О.Н., Рябоконт Е.А., Чепига В.Н.</i> Оптимальное управление режимом сопровождения многофункциональной РЛС .....	55

## ПИТАННЯ УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

<i>Басанець О.П., Абрамович О.О.</i> Синтез робастної системи управління обертвовим БПЛА та її дослідження при наявності неструктурованої невизначеності .....	59
<i>Гороховатский В.А.</i> Применение кластеризации к элементам структурного описания в задаче классификации изображений .....	64
<i>Іванов С.В., Олійник П.Б., Теут В.М.</i> Синтез автостернового з забезпеченням заданої динамічної похибки .....	68
<i>Катунін А.М., Рибалка Г.В., Шигімага Н.В., Тітов О.С.</i> Зниження помітності об'єктів на основі застосування геометрично неоднорідних радіоізотопних покриттів .....	72
<i>Ковалев Е.Д., Зинченко В.П.</i> Исследование влияния геометрической кривизны лопасти на характеристики рулевого винта .....	76
<i>Козелкова Е.С.</i> Анализ выходного эффекта системы пространственно-временной обработки сигналов с фазоманипулированной диаграммой направленности .....	80
<i>Коломійцев О.В., Васильев Д.Г., Клівець С.І., Ільїн О.Ю.</i> Канал вимірювання кутових швидкостей літальних апаратів для ЛПВС з використанням ЧМ та можливістю формування і обробки зображення ЛА .....	84
<i>Кораблев Н.М., Макогон А.Э., Сорокина И.В.</i> Адаптация структуры и параметров нейросетевого нечеткого регулятора с использованием искусственных иммунных систем .....	89
<i>Кузнецов Б.И., Василец Т.Е., Варфоломеев А.А.</i> Исследование показателей качества нейросетевой системы наведения и стабилизации с учётом помех измерения регулируемых координат .....	94
<i>Кучер Д.Б., Харланов А.И., Зонтова Т.В., Макогон В.П.</i> О некоторых критериях максимального излучения антенн УКВ диапазона .....	98
<i>Ланта С.И., Соловьева О.И., Ланта С.С., Бутенко Н.С.</i> Численно-аналитический метод решения дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом математической модели гомеостатической саморегуляции .....	103
<i>Махонін Є.І.</i> Обґрунтування та удосконалення математичних моделей процесів ідентифікації бортової апаратури космічних апаратів .....	106
<i>Новгородська Л.О., Парахін С.В., Шабан Р.Г.</i> Аналіз тенденції зміни показників надійності авіаційної техніки за часом експлуатації з використанням методів факторного аналізу .....	109
<i>Пашков Д.П.</i> Принципы построения видеоспектрометров космических систем оптико-электронного наблюдения .....	113
<i>Приходько С.И., Волков А.С.</i> Метод декодирования алгебраических каскадных сверточных кодов в частотной области с применением быстрого преобразования Фурье .....	116
<i>Ракушев М.Ю., Манько О.В., Завада А.А.</i> Спосіб розрахунку ймовірності накриття району спостереження полем зору бортової апаратури космічних апаратів оптико-електронного спостереження .....	120
<i>Romanuke V.V.</i> A module for solving the search process evolving diagonal game within three-elemented indeterminacies .....	125
<i>Синотин А.М., Колесникова Т.А.</i> Исследование начала регулярного теплового режима в анизотропных телах .....	132
<i>Таран А.Н.</i> Обеспечение отказоустойчивости электромаховичной системы угловой ориентации и стабилизации космического аппарата .....	135
<i>Тимочко А.И., Турсунходжаев Х.А., Лошаков Е.С.</i> Метод определения параметров планируемого воздействия динамического объекта по целям на основе алгебраической полиномиальной аппроксимации .....	145

УДК 519.876.5

С.И. Лапта<sup>1</sup>, О.И. Соловьева<sup>2</sup>, С.С. Лапта<sup>3</sup>, Н.С. Бутенко<sup>4</sup><sup>1</sup>Харьковский национальный экономический университет, Харьков<sup>2</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков<sup>3</sup>Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков<sup>4</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ С ЗАПАЗДЫВАЮЩИМ АРГУМЕНТОМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГОМЕОСТАТИЧЕСКОЙ САМОРЕГУЛЯЦИИ

Предложен и математически обоснован новый эффективный метод численного анализа дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом, к которому сводятся задачи компартиментного функционально-структурного математического моделирования гомеостатических систем, широко распространенных в различных областях природы, техники и общественных отношений. Этот метод является специфическим для дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом: он существенно использует имеющуюся в нем запаздывание и сводит задачу к простой рекуррентной формуле, удобной для вычислений.

**Ключевые слова:** дифференциальное уравнение с запаздывающим аргументом, численный анализ, рекуррентная формула.

### Введение

**Постановка проблемы.** Известно, что компартиментный функционально-структурный подход к математическому моделированию гомеостатических систем, широко распространенных в различных областях природы, техники и общественных отношений, приводит к дифференциальным уравнениям с запаздывающим аргументом. Их решения, к сожалению, могут быть найдены аналитически лишь в очень ограниченном числе частных случаев [1], которые не исчерпывают всех практических приложений, поэтому их исследование приходится проводить в основном численными методами. Известно также, что применение к ним традиционных методов вычислений значительно повышает и так существующие проблемы сходимости и устойчивости решения дифференциальных уравнений, что, в конечном счете, приводит к неэффективности его нахождения [2]. Поэтому актуальной является проблема нахождения других методов численного анализа дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Авторами настоящей статьи в последнее время был разработан оригинальный численно-аналитический метод решения дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом, эффективность которого была продемонстрирована при решении ряда отдельных задач имитационного моделирования гомеостатических систем [3]. Однако ограниченные рамки предыдущих публикаций не позволили его подробно описать ранее.

**Формулировка цели статьи.** В связи с выше изложенным представляется целесообразным при-

вести достаточно подробное изложение нового метода численного решения дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом и его математическое обоснование, что, по-видимому, будет интересно для различных приложений.

### Изложение основного материала

Дифференциальное уравнение с запаздывающим аргументом гомеостатической саморегуляции имеет вид [3]:

$$y' = \varphi(t), \quad t \geq 0;$$

$$\varphi(t) = (1 - \alpha) \cdot f(t) - \beta \cdot y(t - \tau) - \gamma \cdot \text{Es}(y(t - \delta)); \quad (1)$$

$$y(t) = \phi(t), \quad -\max(\tau, \delta) \leq t < 0,$$

где  $y(t)$  – отклонение гомеостатически сохраняемой переменной от ее равновесного значения;  $\tau \geq \delta > 0$  – два времени запаздывания; пороговая функция  $\text{Es}(z) = z \cdot e(z)$  определяется как произведение ее аргумента на единичную функцию Хевисайда  $e(z)$ ;  $f(t)$  и  $\varphi(t)$  – известные функции;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – числовые параметры, значения которых найдутся в процессе параметрической идентификации модели.

Для численного анализа уравнения (1) был разработан новый, специфический для него метод, позволяющий устранить либо значительно снизить известные проблемы численного решения дифференциальных уравнений за счет существенного использования имеющегося в уравнении основного запаздывания  $\delta$  (основного не по величине, а по принципиальному наличию, так как дополнительное запаздывание  $\tau \geq \delta$  может и не проявляться) – времени установления единого значения переменной

$y(t)$  в розглянутому компартменті. Для зручності будемо вважати також, що величина  $\tau$  кратна значенню  $\delta$ , яке в подальшому поставимо рівним 1 мин, що ніяк не сказується на загальності методу.

Цей метод передбачає спочатку традиційне введення рівномірної різницевий сітки  $\{t_i = ih, i = 0, 1, 2, \dots, N\}$  на проміжку зміни неперервного аргумента  $t: 0 \leq t \leq T$ , при розбитті його на  $N$  рівних частин довжини  $h = T/N$  кожну точку  $t_i = ih$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, N; 0 < h \leq 1$ ), які називаються вузлами сітки. Початковий крок сітки довільний, але не більше часу запізнення  $\delta$ , яке для зручності будемо вважати кратним величині  $h$ . На цій сітці визначається сіткова функція  $y_i = y(t_i)$  дискретного аргумента  $t_i$ , яка відповідає шуканому розв'язку  $y(t)$  і виступає його апроксимацією в вузлах. Неперервної функції  $\varphi(t, y(t))$ , що представляє праву частину рівняння (1) ставиться в відповідності сіткова функція  $\varphi_i = \varphi_i, h = \varphi(t_i, y_i)$ .

Далі, в припущенні, що обчислення вже виконані до  $i$ -го вузла, т.е. вже існують значення  $y_0 = y(t_0), y_1 = y(t_1), y_2 = y(t_2), \dots, y_i = y(t_i)$ , для знаходження наступного значення функції  $y(t)$   $y_{i+1} = y(t_{i+1})$  з рівняння (1) можна отримати вираження

$$y(t_{i+1}) = y(t_i) + \int_{t_i}^{t_{i+1}} \varphi(s) ds, \quad (2)$$

де  $\varphi(s) \equiv \varphi(s, y(s))$ , в якому зручно перейти до нової змінної інтегрування  $z$ , що змінюється від  $-1$  до  $0$  за формулою  $s = t_{i+1} + h \cdot z$ :

$$y(t_{i+1}) = y(t_i) + h \int_{-1}^0 \varphi(s_{i+1} + hz) dz, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

Різницевий план (3) передбачає знання значень функції  $\varphi(s)$  всюди на відрізку  $[t_i, t_{i+1}]$  або, що те ж саме, шуканої функції  $y(s)$  на проміжку часу, зсунутому на  $\delta$  хвилин назад. На перших кроках ми будемо брати з початкового умови в рівнянні (1). В подальшому ми можемо знайти приблизно, інтерполюючи по вже відомих значенням  $\varphi_0 = \varphi(t_0), \varphi_1 = \varphi(t_1), \varphi_2 = \varphi(t_2), \dots, \varphi_i = \varphi(t_i), \varphi_{i+1} = \varphi(t_{i+1})$  в вузлах сітки. Для цього зручно використати формулу Ньютона, призначену для інтерполювання в кінці таблиці зліва від точки  $t_{i+1}$ :

$$\varphi(s) = \varphi(s_{i+1} + zh) = \frac{(z)_0}{0!} \kappa_{i+1} + \frac{(z)_1}{1!} \Delta \varphi_i +$$

$$+ \frac{(z)_2}{2!} \Delta^2 \varphi_{i-1} + \frac{(z)_3}{3!} \Delta^3 \varphi_{i-2} + \frac{(z)_4}{4!} \Delta^4 \varphi_{i-3} + \dots + \frac{(z)_k}{k!} \Delta^k \varphi_{i+1-k} + r_k(s), \quad (4)$$

де  $k$  – порядок інтерполяційного полінома;  $(z)_m$  – символ Похгаммера:  $(z)_0 = 1; (z)_m = z(z+1)(z+2) \dots (z+m-1)$  при  $m \in \mathbb{N}; r_k(s)$  – залишковий член формули, який при умові наявності у функції  $\varphi(s)$  неперервної похідної до  $(k+1)$ -го порядку включительно на відрізку  $[a, b]$ , що містить точки  $t, t_j, \dots, t_{i-k}$ , має вигляд:

$$r_k(s) = h^{k+1} \frac{(z)_{k+1}}{(k+1)!} \varphi^{(k+1)}(\xi), \quad (5)$$

причому точка  $\xi \in [a, b]$ . В вираженні (4) використані традиційні позначення для кінцевих (спадкох) різниць першого  $\Delta \varphi_i \equiv \Delta^1 \varphi_i$  і вищих порядків  $\Delta^m \varphi_i$  ( $m = 2, 3, 4, \dots$ ):

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_i &= \varphi_{i+1} - \varphi_i \quad (i = 0, 1, 2, \dots); \\ \Delta^{m+1} \varphi_i &= \Delta^m \varphi_{i+1} - \Delta^m \varphi_i \\ (i = 0, 1, 2, \dots; m = 0, 1, 2, \dots, k); \\ \Delta^k \varphi_{n-k} &= \sum_{i=0}^k (-1)^i C_k^i \varphi_{n-i}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для подальшого зручності від першого члена в правій частині розкладу (4) відокремимо його половину і замінимо вираженням  $\varphi_{i+1}/2 = \varphi_i/2 + \Delta \varphi_i/2$ , що випливає з (6). При цьому інтерполяційний многочлен (4) приймає вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi(s) &= \frac{1}{2}(\varphi_{i+1} + \varphi_i) + \frac{z+1/2}{1!} \Delta \varphi_i + \frac{(z)_2}{2!} \Delta^2 \varphi_{i-1} + \\ &+ \frac{(z)_3}{3!} \Delta^3 \varphi_{i-2} + \frac{(z)_4}{4!} \Delta^4 \varphi_{i-3} + \dots + \frac{(z)_k}{k!} \Delta^k \varphi_{i+1-k} + \\ &+ r_k(s) = \frac{1}{2}(\varphi_{i+1} + \varphi_i) + \frac{z+1/2}{1!} \Delta \varphi_i + \\ &+ \sum_{m=2}^k \frac{(z)_m}{m!} \Delta^m \varphi_{i+1-m} + r_k(s). \end{aligned} \quad (7)$$

При його підстановці замість функції  $\varphi(s)$  в формулу (3) і почленному інтегруванні отримуємо вираження:

$$\begin{aligned} y(t_{i+1}) &= y(t_i) + h \left[ \frac{1}{2}(\varphi_{i+1} + \varphi_i) - \frac{1}{12} \Delta^2 \varphi_{i-1} - \right. \\ &- \frac{1}{24} \Delta^3 \varphi_{i-2} - \frac{19}{720} \Delta^4 \varphi_{i-3} - \frac{3}{160} \Delta^5 \varphi_{i-4} - \\ &\left. - \frac{1}{70} \Delta^6 \varphi_{i-5} - \frac{275}{24192} \Delta^7 \varphi_{i-6} + \dots + A_k \Delta^k \varphi_{i+1-k} \right] + R_{i+1,k}, \quad (8) \end{aligned}$$

$$+ R_{i+1,k}; \quad i = 0, 1, 2, \dots, N; \quad k \geq 2,$$

Где  
ос  
ме  
что  
ху  
по  
вы  
ша  
чер  
ра  
ша  
ус  
ши  
раз  
сгу  
инт  
мер  
под  
по  
сет  
точ  
ше  
вак  
ние  
рез  
вие  
слу  
вак  
вня  
тел  
вид  
тов  
of c  
tech  
equi  
com

где

$$A_k = \frac{1}{k!} \int_{-1}^0 (z)_k dz ;$$

$$R_{i+1,k} = \frac{h^{k+2}}{(k+1)!} \varphi^{(k+1)}(\mu) \int_{-1}^0 (z)_{k+1} dz . \quad (9)$$

При получении выражения (9) для интеграла от остаточного члена интерполирования (5) была применена вторая теорема о среднем. Можно показать, что величины  $A_k$  и  $R_{n+1,k}$  с ростом  $k$  убывают не хуже, чем  $k^{-1,35}$ .

Если в выражении (8) для  $y(t_{i+1})$  отбросить погрешность  $R_{n+1,k}$ , получится приближенная вычислительная рекуррентная формула на  $(i+1)$ -м шаге. По этой формуле значение  $y_{i+1}$  выражается через известную функцию  $f(t)$  и уже найденные ранее ее же значения  $y_m$ . Если при этом на первых шагах окажется недостаточным заданное начальное условие (1), его надо будет продолжить на более широкий интервал влево.

Как следует из формулы (9) для погрешности разностной схемы (8), ее понизить можно за счет сгущения сетки либо при повышении степени  $k$  интерполяционного полинома (4). Обычно, например, при вычислении определенного интеграла одно подразумевает другое, и традиционно уменьшают погрешность численного интегрирования, сгущая сетку. Этот путь дробления сетки для улучшения точности при численном нахождении значений решения дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом только в узлах, с использованием ранее найденных таких значений, приводит к резкому росту вычислительных затрат и, как следствие, к получению лишь отдельных результатов. В случае дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом с известными начальными

значениями искомой функции возможен альтернативный, более эффективный путь повышения степени интерполяционного полинома и точности счета. Целесообразно, не изменяя шаг сетки, который можно положить, например, 1, повышать степень интерполяции  $k$  за счет использования изначально заданных либо ранее уже вычисленных значений искомой функции слева от отрезка интегрирования.

## Выводы

Как следует из вышеизложенного, проведено математическое обоснование нового метода численного анализа дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом, специфического для него, существенно использующего имеющееся в нем запаздывание. Практическая эффективность этого метода обусловлена тем, что он приводит к рекуррентной формуле, удобной для вычислений.

## Список литературы

1. Лапта С.И. Аналитическое решение одного дифференциально-разностного уравнения динамики гликемии / С.И. Лапта // АСУ и приборы автоматики. – Х.: ХНУРЭ, 2002. – № 121. – С. 25-29.
2. Зверкина Т.С. К вопросу о выборе метода интегрирования уравнений с отклоняющимся аргументом / Т.С. Зверкина // Труды семинара по теории дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом. – 1969. – Вып. VII. – С. 75-81.
3. Соловьева О.И. Математическая модель системы регуляции углеводного обмена с учетом возрастных изменений в ней / О.И. Соловьева, С.И. Лапта, С.Н. Герасин // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: ХНУРЭ, 2007. – Т. 6, № 1. – С. 19-24.

Поступила в редколлегию 28.12.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Краснобаев, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, Харьков.

## ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД РОЗВ'ЯЗКУ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ З АРГУМЕНТОМ, ЩО СПІЗНЮЄТЬСЯ, МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ГОМЕОСТАТИЧНОЇ САМОРЕГУЛЯЦІЇ

С.І. Лапта, О.І. Соловйова, С.С. Лапта, Н.С. Бутенко

Запропоновано та математично обґрунтовано новий ефективний метод чисельного аналізу диференціального рівняння з аргументом, що спізнюється, до якого зводяться задачі компартментного функціонально-структурного математичного моделювання гомеостатичних систем, поширених у різних областях природи, техніки та суспільних відносин. Цей метод є специфічним до диференціального рівняння з аргументом, що спізнюється: він суттєво використовує присутнє у ньому спізнєння та зводить задачу до простої рекуррентної формули, яка є зручною для обчислень.

**Ключові слова:** диференціальне рівняння з аргументом, що спізнюється, чисельний аналіз, рекуррентна формула.

## A NUMERICALLY-ANALYTICAL METHOD OF A SOLUTION OF THE DIFFERENTIAL EQUATION WITH DELAY ARGUMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF HOMEOSTATIC SELF-CONTROL

S.I. Lapta, O.I. Solovjova, S.S. Lapta, N.S. Butenko

The new effective method of the numerical analysis of the differential equation with delay argument, to which the problems of compartmental functional-structural mathematical modeling of homeostatic systems, widespread in various areas of nature, technics and public relations, are reduced, is offered and mathematically substantiated. This method is specific to the differential equation with delay argument: it essentially uses delay available in it and reduces the problem to the simple recurrent formula convenient for calculations.

**Keywords:** the differential equation with delay argument, the numerical analysis, the recurrent formula.