

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-542-6-9>

**ADAPTIVE METHOD FOR CONTROLLING THE RELIABILITY
OF COMPUTATIONAL IMPLEMENTATION
OF DYNAMIC SYSTEMS MODELS IN THE PROCESSES
OF THEIR MODELLING AND CONTROL**

**АДАПТИВНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ДОСТОВІРНОСТІ
ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІЧНИХ
СИСТЕМ В ПРОЦЕСАХ ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ**

Polozhaenko S. A.

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department
of Computerized Systems
and Software Technologies
Odesa Polytechnic National University
Odesa, Ukraine*

Положаєнко С. А.

*доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри
комп'ютеризованих систем
та програмних технологій
Національний університет
«Одеська політехніка»
м. Одеса, Україна*

Prokofiev A. Yu.

*Postgraduate Student at the Department
of Computerized Systems
and Software Technologies
Odesa Polytechnic National University
Odesa, Ukraine*

Прокоф'єв А. Ю.

*аспірант кафедри
комп'ютеризованих систем
та програмних технологій
Національний університет
«Одеська політехніка»
м. Одеса, Україна*

Застосування цифрових регуляторів при управлінні динамічними системами пов'язано із реалізацією їх моделей, а також відповідних алгоритмів управління, на основі різноманітних обчислювальних (за прийнятою термінологією [1, 2] – моделююче-управляючих) пристроїв. Тому якість функціонування систем моделювання та управління багато в чому визначається характеристиками обчислювальних засобів, що використовуються. Проблема забезпечення якості функціонування, зокрема, управляючих систем з обчислювальною машиною в контурі управління, є дуже складною як з технічної, так і математичної точок зору. При вирішенні цієї проблеми практика висунула на одне з перших місць науковий напрямок, пов'язаний із розробкою методів та засобів, що забезпечують надійність процесів обчислень та обробки інформації [3].

При практичному впровадженні моделююче-управляючих комплексів динамічними системами обчислювальні процеси, що в них

реалізуються, неодмінно наражаються на різного роду *завади* та *похибки*. Зокрема, комп'ютерне розв'язування математичних виразів, що утворюють математичні моделі (ММ) динамічних систем, може зазнавати похибки, спричинені числовими алгоритмами реалізації ММ (наприклад, неточностями апроксимації неперервних моделей або накопичення похибок округлення), та збоями в роботі апаратних засобів. Причому, більшість похибок та збоїв мають *випадковий характер*. Тому потрібен дієвий поточний контроль, що дозволяє виявити та усунути похибки (збої) до їх поширення в контурі управління, що зумовлює *оперативність* як одну з основних характеристик засобів контролю похибок.

На поточний час використовуються як *програмні* і *апаратні* методи контролю процесів моделювання (чи управління), так і різноманітні їх поєднання, а детальний аналіз відповідних методів міститься, наприклад, в [4].

У загальному випадку, ММ динамічної системи, що реалізується в моделююче-управляючому комплексі, можна представити наступним чином:

$$\dot{\mathbf{Y}} = \mathbf{f}(\mathbf{Y}, \mathbf{U}, t), \quad \mathbf{Y}(t_0) = \mathbf{Y}_0, \quad (1)$$

де $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ – вектор змінних стану, $\mathbf{U} = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$ – вектор сигналів управління, $\mathbf{f} = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T$ – вектор-функція, t – незалежний параметр часу.

Для будь-яких методів числового розв'язування рівнянь динаміки виду (1) контроль збоїв можна організувати шляхом порівняння результатів, отриманих на поточному та наступному кроках інтегрування, відповідно. Наявність чи відсутність збоїв визначається перевіркою умови

$$\xi = \rho(y_i, y_{i+1}) \in D, \quad (2)$$

де ξ – міра близькості значень y_i та y_{i+1} , D – область допустимих значень цієї міри.

Для контролю похибок, викликаних збоями та відмовами, можуть використовуватися методи контролю методичної похибки числового розв'язку на етапі інтегрування або особливості побудови обчислювальних алгоритмів.

У методах прогнозу та корекції по різниці $\xi = |y_f - y_c|$ між прогнозованим y_f і скорегованим y_c значеннями шуканої функції можна робити висновки про наявності збою у роботі апаратури. Однак,

існуючий взаємозв'язок між значеннями y_f та y_c знімає достовірність контролю.

Дієвим при контролі достовірності обчислень може розглядатися підхід, що ґрунтується на застосуванні, крім основного алгоритму A_b реалізації ММ виду (1), контрольного алгоритму A_k , причому в останньому використовується вже інформація перевірена на попередніх кроках (наприклад, кроках ітераційної процедури інтегрування (1)). Відповідні *екстраполяційний* та *інтерполяційний* контрольні алгоритми, запропоновані в роботі [5], виглядають наступним чином:

$$\bar{y}_{i+1} = \sum_{p=0}^{p_1} a_p y_{p-1} + h \sum_{s=1}^{s_1} b_s f(\mathbf{Y}, \mathbf{U}, t_{i-s}) \quad (3)$$

$$\bar{y}_i = \sum_{p=-1}^{p_1} a_p y_{i-p} + h \sum_{s=-1}^{s_1} b_s f(\mathbf{Y}, \mathbf{U}, t_{i-s}) \quad (4)$$

де $h = t_{i+1} - t_i$ — крок інтегрування, a_p, b_s — коефіцієнти.

Інтерполяційна формула контролю (4), на відміну від екстраполяційної (3), враховує зміну розв'язку на кроці обчислень, який контролюється, що зменшує різницю між величинами y та $\bar{y}$ в алгоритмах A_b та A_k , відповідно.

Зазначимо, що коефіцієнти контрольних алгоритмів виду (3) та (4) визначаються з умови отримання точного результату за контрольним алгоритмом A_k для розв'язку $y_j(t)$, $j = \overline{1, n}$, який являє собою багаточлен якомога більшого ступеня. Такий вибір коефіцієнтів a_p та b_s дозволяє отримати заданий порядок похибки контролю при відносно невеликому обсязі обчислень за контрольним алгоритмом A_k в процесі підрахунку.

Нижче запропоновано метод організації контролю розв'язування системи рівнянь (1) за допомогою контрольного алгоритму A_k , що перебудовується залежно від поведінки контрольованого розв'язку $y_j(t)$, $j = \overline{1, n}$. Особливість даного підходу полягає в тому, що проконтрольовані на черговому кроці результати використовуються для визначення параметрів контрольного алгоритму A_k (тобто коефіцієнтів a_p, b_s). При цьому параметри визначаються з умови

мінімуму певної міри близькості результатів, отриманих за контрольним A_k та основним A_b алгоритмами на ділянці розв'язку, що включає останній проконтрольований крок обчислень. Отриманий алгоритм, що позначимо як A_a , використовується для контролю наступного кроку обчислень. Після цього параметри знову уточнюються.

Очевидно, що описану процедуру методу та реалізуючий її алгоритм A_a , зважаючи на вищесказане, можна вважати *адаптивними*.

Застосовуючи результати обчислень за основним алгоритмом A_b , отримані до $(i+1)$ -ого кроку обчислень, можна визначити параметри контрольного алгоритму A_a на $(i+1)$ -му кроці із системи алгебраїчних рівнянь

$$CQ = V, \quad (5)$$

До прикладу, для екстраполяційного способу контролю, що використовують оцінку розв'язку в точці $t_{i-1+\alpha}$, величини, що входять у вираз (5), визначаються на $(i+1)$ -му кроці обчислювальної процедури наступним чином:

$$Q = (a_{-1}, a_1, \dots, a_{p_1}, \dots, b_0, b_1, \dots, b_{s_1})^T,$$

$$V = (y_i, y_{i-1}, \dots, y_{i-k+1})^T,$$

$$C = \begin{bmatrix} y_{i-1} \dots y_{i-p_1-1} \dot{y}_{i-2+\alpha} \dot{y}_{i-2} \dots \dot{y}_{i-s_1-1} \\ y_{i-2} \dots y_{i-p_1-2} \dot{y}_{i-3+\alpha} \dot{y}_{i-3} \dots \dot{y}_{i-s_1-2} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ y_{i-k} \dots y_{i-p_1-k} \dot{y}_{i-k-1+\alpha} \dot{y}_{i-k-1} \dots \dot{y}_{i-s_1-k} \end{bmatrix}.$$

Якщо матриця C не вироджена, і число її рядків дорівнює розмірності вектора параметрів (для екстраполяційного методу $\Pi_{\text{ers}} = (a_{-1}, a_1, a_2, \dots, a_p, b_0, b_1, \dots, b_s)$ та інтерполяційного методу

$\Pi_{\text{int}} = (a_1, a_2, \dots, a_p, b_1, \dots, b_s)$, відповідно), що визначається

значенням k , то оцінкою $\hat{Q}$ матриці параметрів Q (як для екстраполяційного, так і для інтерполяційного методів) є розв'язок системи алгебраїчних рівнянь

$$\hat{\mathbf{Q}} = \mathbf{C}^{-1}\mathbf{B}$$

і результати, отримані за основним алгоритмом A_b та контрольним алгоритмом A_a на послідовності $y_i, y_{i-1}, \dots, y_{i-k+1}$ співпадають.

Таким чином, застосування адаптації дозволяє підвищити достовірність та точність екстраполяційного та інтерполяційного контрольних алгоритмів.

Література:

1. Ситнік Б. Т. Комп'ютерні системи керування : навч. посіб. Ч. 1. Моделювання систем. Харків : УкрДУЗТ, 2019. 182 с.
2. Ситнік Б. Т. Комп'ютерні системи керування : навч. посіб. Ч. 2. Цифрові комп'ютерні системи керування. Харків : УкрДУЗТ, 2019. 141 с.
3. Ляшенко, Б. М., Кривонос О. М., Вакалюк Т. А. Методи обчислень. Житомир : Вид-во ЖДУ, 2014. 228 с.
4. Яковина, В., Смирнов В. Огляд основних підходів до аналізу надійності програмного забезпечення Комп'ютерні науки та інформаційні технології. 2011. Вип. 719. С. 278–282.
5. Положаєнко, С. А., Прокоф'єв А. Ю. Моделі визначення надійності динамічних систем, функціонування яких характеризується режимом профілактики. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. 2024. Т. 35(74). № 1. С. 280–286.