УДК 519.713.1

І.В. МЕЛЬНИК, С.Б. ТУГАЙ
НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

ФОРМУВАННЯ ДИСКРЕТНОГО АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМ ЗАСОБОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ СКІНЧЕННИХ АВТОМАТІВ ТА МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОЇ СТАТИСТИКИ

У статті розглянуто модель керування транспортним засобом для лінійного закону зміни його швидкості у часі. Відмінною рисою сформованої математичної моделі є те, що вона створена з використанням аналітичних методів дискретної математики, теорії множин, теорії скінченних автоматів та математичної статистики. На основі аналізу простого закону руху транспортного засобу між двома заданими точками по прямій лінії з постійним зменшенням швидкості, теоретично обґрунтовано, що математичну модель такого закону руху можна реалізувати у просторі скінченних станів за часом, і, таким чином, звести її до відповідної моделі скінченного автомату. Безсумнівною перевагою запропонованої математичної моделі системи керування рухом транспортного засобу є її простота, а також відсутність коректувальної дії у ті моменти часу, коли рух транспортного засобу відповідає заданому закону із незначною похибкою. Це дозволяє уникнути зайвих викидів швидкості транспортного засобу та коливальних процесів, які можуть виникати у разі неперервної у часі керувальної дії за умови неправильного вибору параметрів системи керування. Окремо розглянуті математичні моделі для випадків квазістаціонарної та випадкової збурювальної дії. Для моделювання випадкової збурювальної дії використаний закон розподілу Стьюдента. Слід відзначити, що отримана у роботі схема скінченного автомату є універсальною та відповідає як квазістаціонарній, так і випадковій збурювальній дії. Змінюються лише аналітичні співвідношення дискретної математики та математичної статистики, за якими формується закон керування через аналіз станів скінченного автомату. Результати моделювання показали, що за умови квазістаціонарної збурювальної дії похибка керування складає приблизно 2–5%, а у разі випадкової збурювальної дії ця похибка становить приблизно 5–8%. Запропонований підхід до створення систем керування є досить універсальним та може бути успішно використаним для синтезу систем керування іншого призначення, зокрема технологічних.

Ключові слова: транспортна задача, автоматичне керування, статистичний аналіз, дискретний закон керування, скінченний автомат.

И.В. МЕЛЬНИК, С.Б. ТУГАЙ
НТУ Украины «Киевский политехнический институт им.Сикорского»

ФОРМИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ И МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

В статье рассмотрена модель управления транспортным средством для линейного закона изменения его скорости с течением времени. Отличительной чертой сформированной математической модели является то, что она создана с использованием аналитических методов дискретной математики, теории множеств, теории конечных автоматов и математической статистики. На основе анализа простого закона движения транспортного средства между двумя заданными точками по прямой линии с постоянным уменьшением скорости, теоретически обосновано, что математическую модель такого закона движения можно реализовать в пространстве конечных состояний по времени, и, таким образом, свести ее к соответствующей модели конечного автомата. Несомненным преимуществом предложенной математической модели системы управления движением транспортного средства является её простота, а также отсутствие корректирующего действия в те моменты времени, когда движение транспортного средства соответствует заданному закону с незначительной погрешностью. Это позволяет избежать излишних выбросов скорости транспортного средства и колебательных процессов, которые могут возникать в случае непрерывного во времени управляющего действия при неправильном выборе параметров системы управления. Отдельно рассмотрены математические модели для случаев квазистационарного и случайного возмущающего воздействия. Для моделирования случайного возмущающего воздействия использован закон распределения Стьюдента. Следует отметить, что полученная в работе схема конечного автомата является универсальной и соответствует как квазистационарному, так и случайному возмущающему воздействию. Меняются только аналитические соотношения дискретной математики и *математической статистики, по которым формируется закон управления через анализ состояний конечного автомата. Результаты моделирования показали, что при квазистационарном возмущающем воздействии погрешность управления составляет примерно 2-5%, а в случае случайного возмущающего воздействия эта погрешность составляет примерно 5-8%. Предложенный подход к созданию систем управления является достаточно универсальным и может быть успешно использован для синтеза систем управления другого назначения, в том числе технологических.*

Ключевые слова: транспортная задача, автоматическое управление, статистический анализ, дискретный закон управления, конечный автомат.

I.V. MELNYK, S.B. TUHAI
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnical Institute"

CREATION OF DISCRETE ALGORITHM OF VEHICLE CONTROL WITH USING THE THEORY OF FINITE-SEQUENCE MACHINES AND THE METHODS OF MATHEMATICAL STATISTICS

In the article a vehicle control model for the linear law of its speed change over the time is discussed. A distinctive feature of the formed mathematical model is that it was created with using analytical methods of discrete mathematics, set theory, theory of finite sequence machine and mathematical statistics. On the base of analysis of a simple law of motion a vehicle between two given points in a straight line with a constant decrease in speed, it is theoretically proved, that a mathematical model of such law of motion can be realized in the space of limited in time states, and, thus, it can be reduced to the corresponding model of a finite sequence machine. The undoubted advantage of the proposed mathematical model of the vehicle motion control system is its simplicity, as well as the absence of corrective action at those times when the vehicle movement corresponds to a given law with a slight error. This avoids unnecessary ejections of vehicle speed and oscillation processes that can occur in the case of a continuous control action in the time when the control system parameters are incorrectly selected. Mathematical models for the cases of quasi-stationary and random disturbing effects are considered separately. To simulate a random disturbing effect, the Student distribution law is used. It should be noted that the finite automaton scheme, had been obtained in this work, is universal and corresponds to both quasi-stationary and random disturbing effects. Only the analytical relations of discrete mathematics and mathematical statistics are changed, according to which the control law is formed through the analysis of the states of the finite sequence machine. The simulation results showed that with a quasi-stationary disturbing action, the control error is about 2-5%, and in the case of a random disturbing action, this error is about 5-8%. The proposed approach to the creation of control systems is quite universal and can be successfully used to synthesize control systems for other purposes, including technological ones.

Key words: transport problem, automatic control, statistical analysis, discrete control law, finite automaton.

Постановка проблеми

Сьогодні на наземному, водному та повітряному транспорті широко використовують комп'ютеризовані системи автоматичного керування рухом, які зазвичай працюють за алгоритмами оптимального керування [1–4]. Ці алгоритми є добре обґрунтованими з теоретичної токи зору та основані на відомих чисельних методах розв'язування систем диференціальних рівнянь. Несумнівними перевагами таких алгоритмів є висока точність обчислення контрольованих параметрів об'єкту керування, з урахуванням його фізичних властивостей та можливої дії випадкових збурювальних факторів [3, 4]. Проте загалом постановка завдання керування складними об'єктами через чисельне розв'язування систем диференціальних рівнянь також має низку недоліків. З теоретичної точки зору загальною причиною цих недоліків є те, що математична постановка завдання розв'язування систем диференціальних рівнянь на відрізку скінченної довжини завжди потребує аналізу нескінченної кількості станів через розбиття його на окремі відрізки нескінченно малої величини. Протиріччя полягає в тому, що за умови використання чисельних методів розв'язування рівнянь та засобів комп'ютерного моделювання кількість таких відрізків має бути обмеженою, а їх занадто велика кількість призводить не лише до непомірного зростання часу проведення обчислень, але й до збільшення обчислювальної похибки [5]. Крім цього, швидкість розв'язування складних систем диференціальних рівнянь у реальному часі, навіть у разі використання сучасних швидкодіючих комп'ютерів та хмарних обчислювальних технологій, також є обмеженою. Тому в багатьох випадках такий стандартний спосіб керування може не задовольняти сучасним вимогам щодо забезпечення високошвидкісної зміни параметрів складних технічних об'єктів та їхньої надійної роботи.

Інший підхід до вирішення завдань автоматизованого керування складними технічними об'єктами пов'язаний із використанням математичного апарату сучасної дискретної математики, зокрема теорії скінченних автоматів [6] та алгоритмів нечіткої логіки [6, 7].

Розглянемо спосіб формування дискретного алгоритму, призначеного для розв'язування задачі керування транспортним засобом за умови заздалегідь відомого закону його руху.

Викладення основного матеріалу дослідження

Постановка задачі. Для формалізації постановки задачі спочатку запишемо закон руху фізичного об'єкту у вигляді алгебраїчного рівняння. Для кращого розуміння способу формування дискретного алгоритму для наперед заданого закону керування почнемо з розв'язування простої транспортної задачі. Будемо вважати, що транспортний засіб рухається від точки A до точки B вздовж прямої лінії довжиною R, і протягом його руху швидкість руху $V(r)$ лінійно зменшується пропорційно відстані r, яка пройдена. У початковій точці A швидкість руху є максимальною та становить V_0, а в кінцевій точці B вона дорівнює 0. Такий закон руху в алгебраїчній формі можна записати через наступний простий аналітичний вираз:

$$V(r) = V_0 \frac{R-r}{R}. \quad (1)$$

Дискретні математичні співвідношення для закону руху, заданого рівнянням (1), будуть розглянуті в наступних розділах статті.

Дискретна форма закону руху у разі відсутності збурювальної дії

Для запису аналітичного виразу (1) в дискретній формі необхідно розбити відрізок руху $[A, B]$ на N однакових скінченних відрізків, довжина яких буде складати:

$$d = \frac{R}{N}. \quad (2)$$

Тоді, у разі відсутності збурювальної дії, закон руху (1) можна переписати в дискретній формі наступним чином:

$$V_{i0} = V_0\left(1 - \frac{i}{N}\right),\ V(i, \Delta r) = V_{i0} - \frac{V_0 \Delta r}{R} = V_0\left(1 - \frac{i}{N} - \frac{\Delta r}{R}\right),\ i = 1,2,\dots,N,\ \Delta r < d. \quad (3)$$

де i – номер відлікової точки P_i на відрізку $[A, B]$, Δr – відстань від відлікової точки P_i до поточної точки, в який знаходиться транспортний засіб.

З урахуванням записаного співвідношення (3), розглянемо тепер різні дискретні закони руху у разі наявності збурювальної дії.

Дискретна форма закону руху у разі наявності стаціонарної та квазістаціонарної збурювальної дії та відповідна схема скінченного автомату

Закон керування рухом для точки P_i з номером i, у разі наявності стаціонарної збурювальної дії, можна сформулювати наступним чином. Якщо значення швидкості $V(i-1, d)$ відповідає значенню $V(i, 0)$, можна вважати, що рух транспортного засобу відповідає закону (1) та залишити значення швидкості незмінним, а у протилежному випадку необхідно сформувати коректувальну дію ΔV, яку обчислювати як різницю між прогнозованим та реальним значенням швидкості, тобто:

$$\Delta V_i = V(i, 0) - V(i-1, d). \quad (4)$$

За такої умови закон регулювання рухом транспортного засобу можна записати через арифметико-логічний вираз [8–10]. Тоді відповідний аналітичний вираз має наступний вигляд:

$$\Delta V_i = \big(V(i,0) \neq V(i-1,d)\big) \cdot \big(V(i,0) - V(i-1,d)\big) +$$
$$+\big(V(i,0) = V(i-1,d)\big) \cdot V(i-1,d). \qquad (5)$$

Недоліком записаного арифметико-логічного виразу (5) є те, що для обчислення коректувальної дії необхідно знати точне значення швидкості $V(i, 0)$, отримане з використанням співвідношень (3).

Іншим способом обчислення коректувальної дії за умови наявності стаціонарної збурювальної дії є аналіз значень коректувальної дії у попередні моменти часу. Для проведення таких обчислень можна скористатися моделлю скінченного автомату [6]. Будемо вважати, що кількість попередніх станів автомату, які використовуються для формування коректувальної дії, становить k_{c}, а сама коректувальна дія є стаціонарною, тобто, однаковою для всіх попередніх станів системи. У такому разі значення похибки швидкості ΔV_i можна обчислити як середнє арифметичне від її значення в попередні моменти часу, і таку оцінку з точки зору теорії математичної статистики можна вважати найбільш правдоподібною [11]. Тобто, за визначених умов, коректувальну дію можна обчислити наступним чином:

$$\Delta V_i = \frac{\sum_{j=0}^{k_{\text{c}}} \Delta V_{i-j}}{k_{\text{c}}}. \qquad (6)$$

З урахуванням отриманих аналітичних виразів (5, 6), а також узагальнених дискретних співвідношень (3), можна переписати закон руху транспортного засобу, для випадку наявності стаціонарної збурювальної дії, у вигляді наступного дискретного арифметико-логічного співвідношення:

$$V(i,\Delta r) = (i \le k_{\text{c}}) \cdot \left((V_0 - \Delta V_i)\left(1 - \frac{i}{N} - \frac{\Delta r}{R}\right)\right) +$$
$$+(i > k_{\text{c}}) \cdot \left(\left(V_0 - \frac{\sum_{j=0}^{k_{\text{c}}} \Delta V_{i-j}}{k_{\text{c}}}\right)\left(1 - \frac{i}{N} - \frac{\Delta r}{R}\right)\right), \qquad (7)$$

де ΔV_i – поточне значення коректувальної дії для стану i, визначене як результат вимірювання швидкості.

Діаграма станів скінченного автомату Мура [6], призначеного для формування закону руху транспортного засобу, який описується співвідношенням (7) за умови $k_{\text{c}} = 2$, наведена на рис. 1. На цьому рисунку для позначення станів скінченного автомату та переходів між ними, яким відповідають вузли та ребра орієнтованого графу [8], введені наступні змінні:

$$S_i = V_i,\ W_i = \Delta V_i. \qquad (8)$$

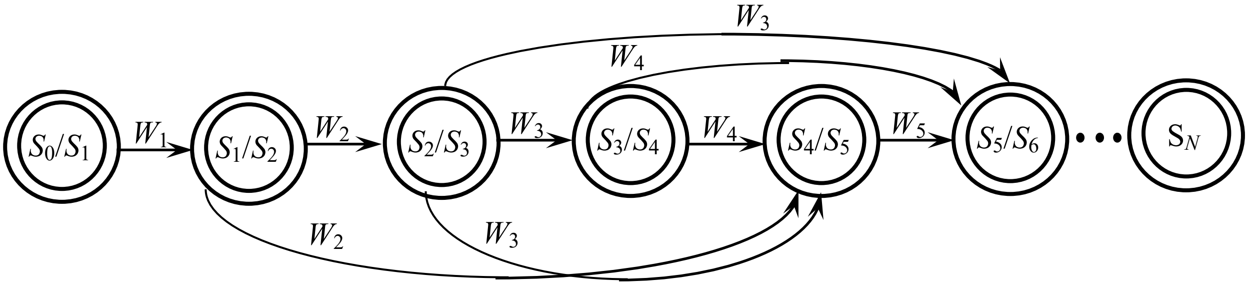


Рис. 1. Діаграма станів скінченного автомату Мура для закону керування рухом транспортного засобу, заданого співвідношенням (7)

З урахуванням введених змінних (8) у законі керування (7), який записаний для випадку наявності стаціонарної збурювальної дії, для визначення поточного стану скінченного автомату S_i можна записати наступний арифметико-логічний вираз:

$$S_i = (i \le k_c) \cdot \left((S_0 - W_i)\left(1 - \frac{i}{N}\right) \right) +$$
$$+(i > k_c) \cdot \left(\left(S_0 - \frac{\sum_{j=0}^{k_c} W_{i-j}}{k_c} \right) \left(1 - \frac{i}{N}\right) \right). \qquad (9)$$

Слід відзначити, що хоча закон руху (9) записаний для випадку наявності стаціонарної збурювальної дії, статистична оцінка з використанням співвідношення (6) за принципом максимальної правдоподібності дозволяє його використовувати також для випадку квазістаціонарної збурювальної дії. Типові залежності швидкості транспортного засобу від відстані у разі використання закону керування (9), для випадків стаціонарної та квазістаціонарної збурювальної дії, наведені на рис. 2.

Із графіка, наведеного на рис. 2, а, зрозуміло, що у разі стаціонарної дії залежність $V(t)$ цілком відповідає узагальненому закону руху транспортного засобу, записаного у вигляді лінійного рівняння (1). Проте, за умови квазістаціонарної випадкової дії швидкість руху відповідає прогнозованій лише у відлікових точках P_i, оскільки впродовж відрізків $[P_i, P_{i+1}]$ вона не контролюється. Похибка керування у точках P_i для різних значень i на рис. 2, б, позначена як ΔV_i, а прогнозована швидкість – як V_{i0}. Для зменшення середньої величини такої похибки можна збільшити кількість відлікових точок N, в яких проводиться контроль швидкості.

Похибка ΔV_i, яка обчислюється у співвідношенні (7), є значно меншою, ніж у разі використання співвідношення (5). Це пов'язано з тим, що у співвідношенні (7) обчислюється не поточне значення похибки, а її найбільш правдоподібне за умови квазістаціонарної випадкової дії. Це значення, згідно із співвідношенням (6), визначається як середнє арифметичне для кількох попередніх станів системи керування k_c.

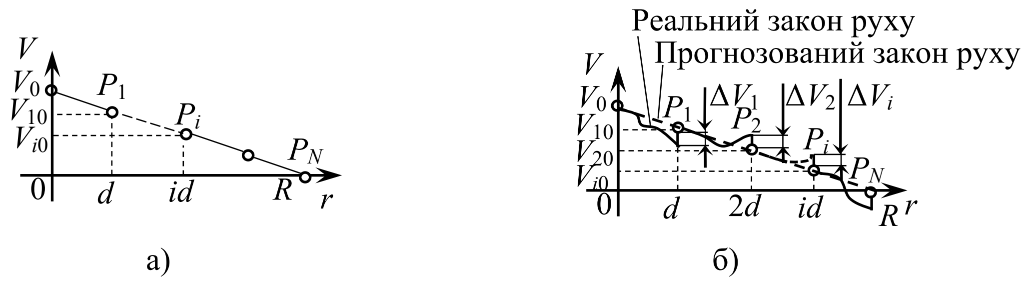


Рис. 2. Залежність швидкості транспортного засобу від відстані для дискретного закону руху, заданого співвідношеннями (7, 9), у разі наявності стаціонарної (а) та квазістаціонарної (б) збурювальної дії

Слід відзначити, що аналітичне співвідношення, аналогічне співвідношенню (7), може бути записано також у разі впливу випадкової збурювальної дії. Більш того, за такої умови схема скінченного автомату, яка наведена на рис. 1, також залишається незмінною. Необхідно змінити лише аналітичне співвідношення (6) та арифметико-логічне співвідношення (9), розраховуючи не середнє значення похибки швидкості ΔV_i, а її найбільш правдоподібне значення, яке обчислюється згідно з теорією математичної статистики [11]. Відповідний алгоритм розрахунку буде наведений у наступному підрозділі статті.

Дискретна форма закону руху у разі наявності випадкової збурювальної дії

Перепишемо співвідношення (7) у наступному вигляді:

$$V(i,\Delta r) = (i \le k_{\text{с}}) \cdot \left((V_0 - \Delta V_i)\left(1 - \frac{i}{N} - \frac{\Delta r}{R}\right)\right) + (i > k_{\text{с}}) \cdot \left((V_0 - \Delta V_{\text{нп}})\left(1 - \frac{i}{N} - \frac{\Delta r}{R}\right)\right), \quad (10)$$

де $\Delta V_{\text{нп}}$ – найбільш правдоподібне значення похибки, обумовлене дією випадкового збурювального фактору.

Скористаємося схемою скінченного автомату, наведеною на рис. 1, та будемо проводити оцінки правдоподібності величини $\Delta V_{\text{нп}}$ за обраним законом розподілу для всіх попередніх станів системи, починаючи з поточного стану i. Значення кількості станів автомату $k_{\text{со}}$, для яких необхідно просумувати значення ΔV_i з метою пошуку математичного сподівання похибки, будемо визначати за умовою відповідності закону розподілу величини ΔV_i критерію максимальної правдоподібності. Якщо для стану $k_{\text{со}}$ цей критерій виконується, а для стану $k_{\text{со}} + 1$ він є хибним, то проводити підсумовування слід за кількістю станів $k_{\text{со}}$. Враховуючи те що кількість станів системи, для яких проводиться аналіз швидкості, є невеликою та, зазвичай, не перевищує 30, то, згідно з теорією математичної статистики, можна вважати, що випадкова величина ΔV_i підпорядковується відомому закону розподілу Стьюдента [11]:

$$p(t) = \frac{\Gamma\left(\frac{l+1}{2}\right)\cdot\left(1+\frac{t^2}{l}\right)^{-\frac{l+1}{2}}}{\sqrt{\pi \cdot l}\cdot\Gamma\left(\frac{l}{2}\right)}; \qquad -\infty < t < \infty. \quad (11)$$

Якщо випадкова величина ΔV розподілена за законом Стьюдента, то інтервальна оцінка її математичного сподівання, за умови заданої довірчої ймовірності β, має вигляд [11]:

$$\Delta V^* - t_{l,\frac{1-\beta}{2}} \cdot \frac{s}{\sqrt{k_{\text{со}}}} < \Delta V < \Delta V^* + t_{l,\frac{1-\beta}{2}} \cdot \frac{s}{\sqrt{k_{\text{со}}}}; \; l = k_{\text{со}} - 1, \quad (12)$$

де

$$\Delta V^* = \frac{\sum_{j=0}^{k_{\text{с}}} \Delta V_{i-j}}{k_{\text{с}}}; \; s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{k_{\text{с}}} \left(\Delta V_{i-j} - \Delta V^*\right)^2}{k_{\text{с}} - 1}}. \quad (13)$$

Параметр β, який у математичної статистиці називається критерієм значущості [11], для завдань керування рухомими об'єктами можна вважати рівним 0,01 [3, 4].

Якщо співвідношення (11–13) виконуються за умови $k_{\text{с}} = j$, але не виконуються за умови $k_{\text{с}} = j + 1$, то значення $k_{\text{с}} = j$ вважається правильним, та можна вважати що $k_{\text{со}} = k_{\text{с}}$. У такому разі коректувальна дія ΔV_i для поточного вузла скінченного автомату обчислюється наступним чином:

$$\Delta V_i = \frac{\sum_{j=0}^{k_{\text{со}}} \Delta V_{i-j}}{k_{\text{со}}}. \quad (14)$$

Виходячи з наведених вище міркувань, та системи рівнянь (11–14), співвідношення для необхідного значення кількості станів скінченного автомату на поточній ітерації i $k_{\text{со}}(i, j)$ можна записати у вигляді рекурентного арифметико-логічного виразу наступним чином:

$$\Delta V_{i,j}^* = \frac{\sum_{k=1}^{j} \Delta V_{i-k}}{j}, \qquad s_{i,j}^* = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{j}\left(\Delta V_{i-k} - \frac{\Delta V_{i,j}^*}{j}\right)^2}{j-1}}}{\sqrt{j}}, \quad (15)$$

$$k_{\text{со}}(i,j) = j \cdot \left(\left(|\Delta V_i| \le \Delta V_{i,j}^* - t_{j-1,\frac{1-\beta}{2}} \cdot s_{i,j}^* \right) | (j < 2) \right) + k_{\text{со}}(i, j-1) \cdot$$

$$\cdot\left(\left(\left(|\Delta V_i| > \Delta V_{i,j}^* - t_{j-1,\frac{1-\beta}{2}} \cdot s_{i,j}^*\right) \& \left((j \geq 2) \& \left(k_{\text{co}}(i,j-1) \neq k_{\text{co}}(i,j-2)\right)\right)\right) \mid\right.$$
$$\left.\mid \left((j \geq 2) \& \left(k_{\text{co}}(i,j-1) = k_{\text{co}}(i,j-2)\right)\right)\right),$$
$$k_{\text{co}}(i,0) = \Delta V_i,\ j \in 0, \dots, i. \tag{16}$$

Блок-схема алгоритму обчислення значення $k_{\text{co}}(i,\ j)$, за яким сформоване рекурентне арифметико-логічне співвідношення (16), наведена на рис. 3.

Згідно із співвідношеннями (15, 16), для моделі випадкової збурювальної дії, яка розглядається, можна записати наступний аналітичний вираз для стану скінченного автомату, наведеного на рис. 1:

$$S_i = (i \leq k_c) \cdot \left((S_0 - W_i)\left(1 - \frac{i}{N}\right)\right) + (i > k_c) \cdot \left(\left(S_0 - \frac{\sum_{j=0}^{k_{\text{co}}(i)} W_{i-j}}{k_{\text{co}}(i)}\right)\left(1 - \frac{i}{N}\right)\right), \tag{17}$$

де поточне значення $k_{\text{co}}(i)$ визначається через арифметико-логічний вираз (16) з урахуванням співвідношень (15).

Результати моделювання дискретної керувальної системи та їх аналіз

Отримані результати розрахунків для квазістаціонарної збурювальної дії, одержані з використанням співвідношення (9), наведені на рис. 4, а, а результати моделювання процесу зміни швидкості для випадкової збурювальної дії, одержані з використанням співвідношення (17) – на рис. 4, б.

Слід відзначити, що у разі стаціонарної збурювальної дії відхилення швидкості від заданого лінійного закону (1) є значно меншим, а для заданих 10 відлікових точок прогнозоване та реальне значення швидкості повністю співпадають. Похибка, пов’язана із відхиленням швидкості від закону розподілу (1), не перевищує 2–3%.

Тобто, можна зробити висновок про те, що формування статистики зміни швидкості рухомого об’єкту у разі квазістаціонарної збурювальої дії з використанням співвідношення (6) та визначення закону керування за цією статистикою є значно простішим завданням, ніж формування такої статистики за умови наявності випадкової збурювальної дії з використанням розподілу Стьюдента та співвідношень (11– 16). Згідно з графічною залежністю, наведеною на рис. 4, б, похибка відхилення швидкості у разі наявності випадкової збурювальної дії є більшою та складає приблизно 5–8%. Більш того, як видно з графічної залежності, яка наведена на рис. 4, б, навіть у деяких відлікових точках прогнозоване та реальне значення швидкості можуть не співпадати. Під час проведення розрахунків для моделювання випадкової дії з використанням засобів програмування використовувалась відома математична функція `random` [9, 10].

Важливим результатом проведених досліджень є те, що узагальнена схема скінченного автомату, наведена на рис. 1, є досить універсальною та не залежить від характеру керувальної дії та обраної статистики.

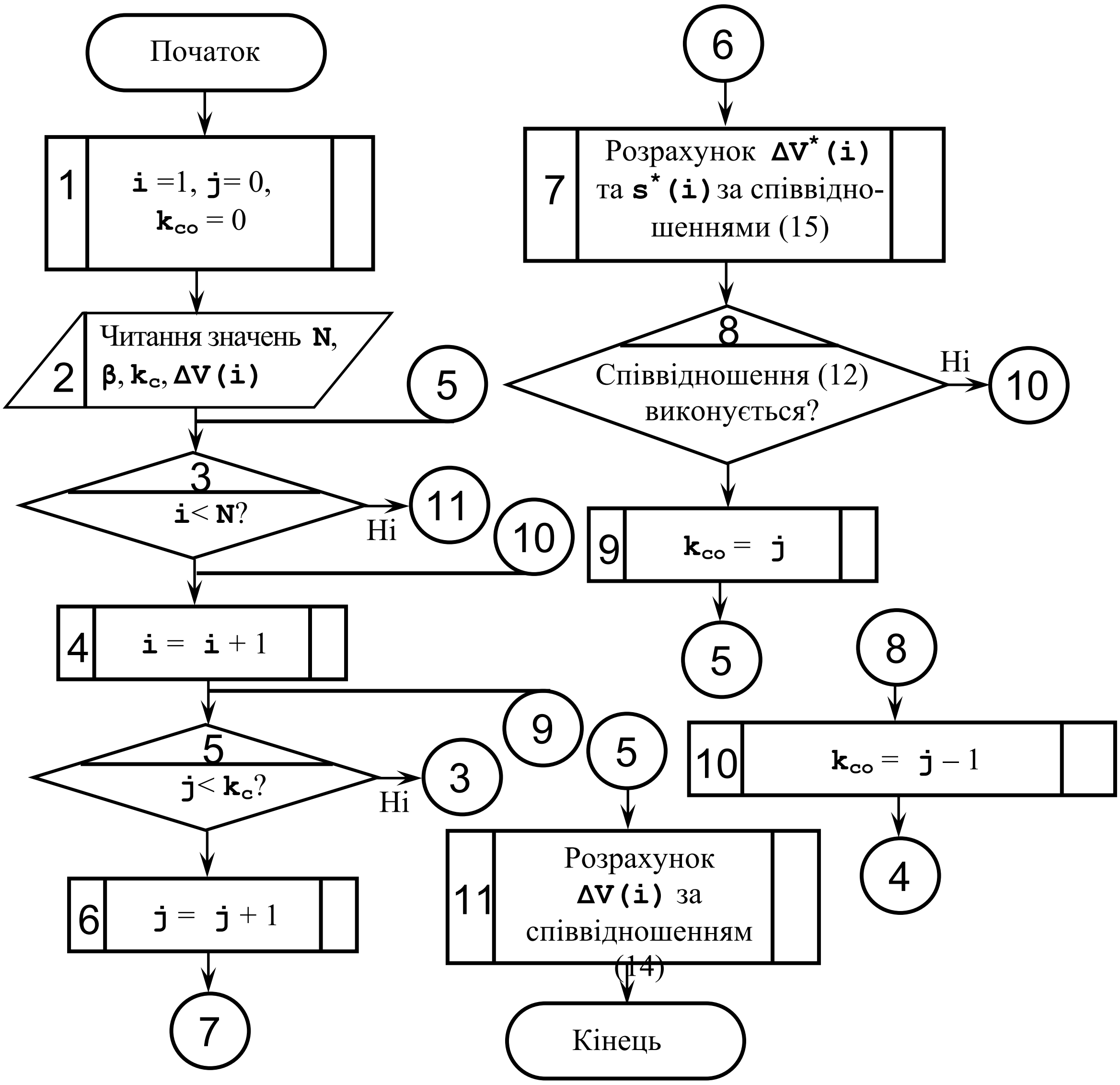
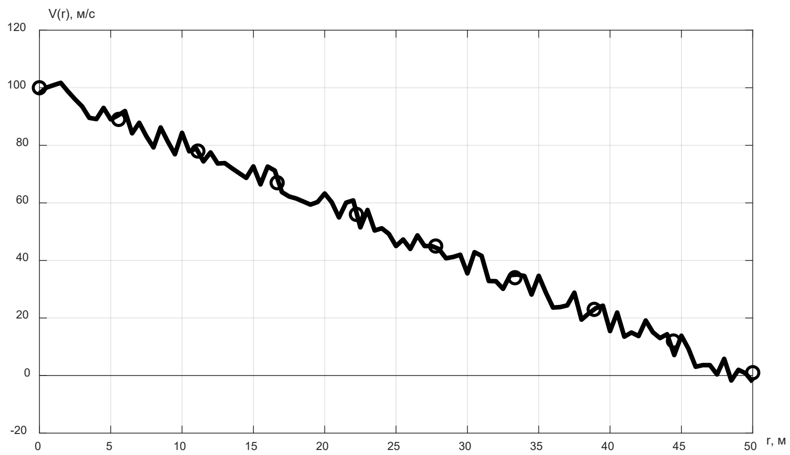
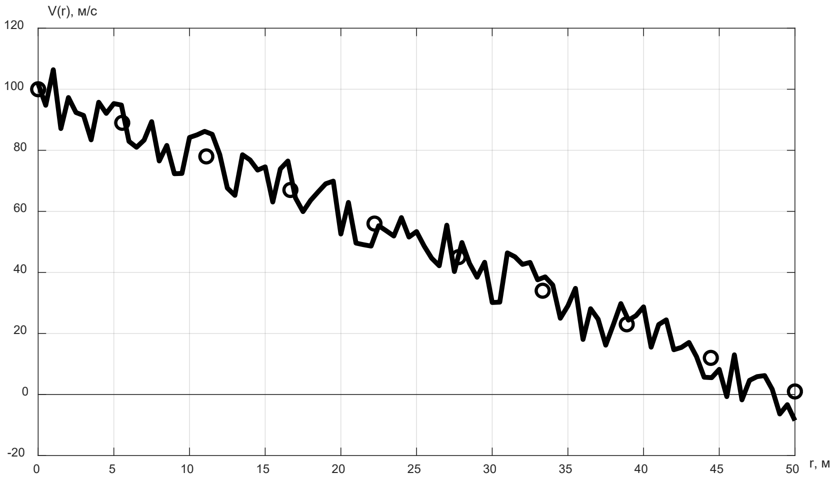


Рис. 3 Блок-схема алгоритму розрахунку коректувальної дії ΔV_i у разі наявності випадкового збурювального фактору

Також, зрозумілим є те, що, незалежно від закону керування, похибка керування швидкістю рухомого об’єкту залежить від кількості відлікових точок N та кількості попередніх станів скінченного автомату k_c, які аналізуються. Аналіз таких залежностей може бути предметом подальших досліджень. У будь-якому разі, запропонована математична модель, яка ґрунтується та методах дискретної математики, на теорії скінченних автоматів та на методах математичної статистики [6, 11], є значно простішою, ніж загальновідомі методи керування швидкістю, основані на чисельному розв’язуванні диференціальних рівнянь [1–5]. Тому отримані у роботі результати можуть бути використані не лише для транспортних задач, але й для моделювання інших систем керування складними технічними об’єктами, а також для формування та аналізу алгоритмів їхньої роботи. Дискретні системи керування значно простіше реалізувати з використанням програмованих компонентів сучасної цифрової електроніки, ніж відповідні аналогові системи [12].



а)



б)

Рис. 4 Результати моделювання процесу керування рухом у разі наявності квазістаціонарної а) та випадкової б) збурювальної дії

Висновки

У статті описаний метод керування швидкістю рухомого об’єкту, який ґрунтується на методах дискретної математики та є значно простішим, ніж відомі методи керування швидкістю, основані на розв’язуванні складних систем диференціальних рівнянь. Запропонована дискретна модель представлена у вигляді схеми скінченного автомату Мура. Тестові розрахунки показали, що похибка керування швидкістю рухомого об’єкту залежить від обраного закону керування та використовуваних методів статистичних оцінок. У разі стаціонарної збурювальної дії ця похибка відсутня, у разі квазістаціонарної збурювальної дії вона складає приблизно 2–5%, а у разі випадкової дії – 5–8%. Отримані в роботі результати можуть бути використанні для моделювання та проектування інших цифрових систем керування складними технічними об’єктами.

Список використаної літератури

1. Гудвин Г. К., Гребе С. Ф., Сальгадо М. Э. Проектирование систем управления. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 911 с.
2. Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. Москва : Едиториал, УРСС, 2005. 229 с.

3. Лазарева Т. Я., Мартемьянов Ю. Ф. Основы теории автоматического управления. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 352 с.
4. Ивахненко А. Г., Юрачковский Ю. П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. Москва : Радио и связь, 1987. 120 с.
5. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. Москва : Наука, 1989. 432 с.
6. Денбновецький С. В., Мельник І. В., Писаренко Л. Д. Кодування сигналів в електронних системах. Частина 2. Математичні основи теорії кодування. Том 3. Теорія систем штучного інтелекту. Київ : Кафедра, 2018. 348 с.
7. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MatLab и fuzzyTECH. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2003. 736 с.
8. Мельник И. В. Анализ возможностей использования матричных макроопераций системы MatLab при решении прикладных задач. *Электронное моделирование*. 2009. № 3. С. 37-51.
9. Мельник І. В. Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв'язання задач із електроніки. Т. 1. Основи роботи та функції системи. Київ : Університет «Україна», 2009. 507 с.
10. Мельник І. В. Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв'язання задач із електроніки: навчальний посібник у 2-х томах. Т. 2. Основи програмування та розв'язання прикладних задач. Київ: Університет «Україна», 2009. 327 с.
11. Денбновецький С. В., Мельник І. В., Писаренко Л. Д. Кодування сигналів в електронних системах. Частина 2. Математичні основи теорії кодування. Том 2. Основи теорії імовірностей, математичної статистики, теорії систем масового обслуговування та статистичної радіотехніки. Київ : Кафедра, 2018. 348 с.
12. Денбновецький С. В., Мельник І. В., Писаренко Л. Д. Кодування сигналів в електронних системах. Частина 1. Параметри сигналів та каналів зв'язку та методи їхнього оцінювання. Київ : Кафедра, 2016. 524 с.

References

1. Gudvin, G. K., Grebe, S. F., & Salgado, M. E. (2004). Proektirovaie sistem uprovlenia. Moscow: Binom, Laboratoriia Znaniy.
2. Kolesnikov, A. A. (2005). Sinergeticheskie metody upravlenia slozhnymi sistemami. Moscow: Editorial, URRS.
3. Lazareva, T. Ya., & Martemianov, Yu. F. (2004). Osnovy teorii avto,aticheskogo uprovlenia. Tambov: Izd-vo Tamb. gos. Tehn. un-ta.
4. Ivahnenko, A. G., & Yurachkovskiy, Yu. P. (1987). Modelirovanie slozhnyh system upravlenia po eksperimentalnym dannym. Moskva: Radio i Sviaz.
5. Samarskiy, A. A., & Gulin, A. V. (1989). Chislennye metody. Moskva: Nauka.
6. Denbnovetskiy, S. V., Melnyk, I.,V., & Pysarenko, L. D. (2018). Koduvannia syhnaliv v elektronnykh syste¬makh. Chastyna 2. Matematychni osnovy teorii koduvannia. Tom 3. Teoriia system shtuchnoho intelektu. Kyiv: Kafedra.
7. Leonkov, A. V. (2003). Nechetkoe modelirovanie v srede MatLab и fuzzyTECH. Saint-Petersburg: BHV-Petersburg.
8. Melnyk, I. V. (2009). Analyz vozmozhnostei yspolzovanyia matrychnыkh makrooperatsyi systemы MatLab pry reshenyy prykladnыkh zadach. *Эlektronnoe modelyrovanye*, **3**, 37-51.
9. Melnyk, I. V. (2009). Systema naukovo-tekhnichnykh rozrakhunkiv MatLab ta yii vykorystannia dlia rozviazannia zadach iz elektroniky. T. 1. Osnovy roboty ta funktsii systemy. Kyiv: Universytet «Ukraina».

10. Melnyk, I. V. (2009). Systema naukovo-tekhnichnykh rozrakhunkiv MatLab ta yii vykorystannia dlia rozviazannia zadach iz elektroniky: navchalnyi posibnyk u 2-kh tomakh. T. 2. Osnovy prohramuvannia ta rozviazannia prykladnykh zadach. Kyiv: Universytet «Ukraina».
11. Denbnovetskiy, S. V., Melnyk, I. V., & Pysarenko, L. D. (2018). Koduvannia syhnaliv v elektronnykh syste¬makh. Chastyna 2. Matematychni osnovy teorii koduvannia. Tom 2. Osnovy teorii imovirnostei, matematychnoi statystyky, teorii system masovoho obsluhovuvannia ta statystychnoi radiotekhniky. Kyiv: Kafedra.
12. Denbnovetskiy, S. V., Melnyk, I. V., & Pysarenko, L. D. (2016). Koduvannia syhnaliv v elektronnykh systemakh. Chastyna 1. Parametry syhnaliv ta kanaliv zviazku ta metody yikhnoho otsiniuvannia. Kyiv: Kafedra.

Мельник Ігор Віталійович – д.т.н., професор кафедри електронних пристроїв та систем факультету електроніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". E-mail: imelnik@phbme.kpi.ua, ORCID: 0000-0003-0220-0615.

Тугай Сергій Борисович, к.т.н., доцент кафедри електронних пристроїв та систем факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорского». E-mail: sbtuhai@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7646-1979.