УДК 681.51.015.4

В.І. Бессараб, В.В. Червинський, Е.Є. Зайцева
Донецький національний технічний університет, м. Донецьк
кафедра автоматики та телекомунікацій
E-mail: tscherwi@mail.ru

КОМПЕНСАЦІЯ ЗБУРЕНЬ В ДИСКРЕТНО-БЕЗПЕРЕРВНИХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

Анотація
Бессараб В.І., Червинський В.В., Зайцева Е.Є. Компенсація збурень в дискретно-безперервних системах автоматичного управління. *Виконано аналіз збурень на системи автоматичного управління дискретно-безперервними об'єктами, враховано їхній вплив в Max-Plus алгебраїчній моделі дискретно-безперервної системи (ДБС). Розроблено методику компенсації збурень в ДБС. Показана можливість забезпечення компенсації збурень в замкнутій системі шляхом внесення додаткових елементів в матриці зворотного зв'язку.*
Ключові слова: *дискретно-безперервна система, Max-Plus алгебра, компенсація збурень, система автоматичного управління, граф синхронізації, матриця зворотного зв'язку.*

Загальна постановка проблеми.

Основою для розглянутого в цій статті синтезу управління є Max-Plus алгебраїчне представлення графа синхронізації дискретно-безперервної системи (ДБС). Окремі елементи цієї методики розглядались в публікаціях [1,2,3]. Ідея синтезу управління в ДБС полягає в формуванні такого вектора управління, який задає дискретно-подійному процесу бажану поведінку. Задана поведінка ДБС може характеризуватись через множину недопустимих маркувань позицій, або − якщо говорити про простір стану – заборонених станів системи. Тобто, деяка позиція не може маркуватись або деякий стан системи не може досягатись в конкретний момент часу. Таке завдання поведінки ДБС означає, що через управління розвиток циклічного процесу необхідно затримати в попередній позиції, щоб виключити досягнення забороненого стану у відповідній момент часу.

Для досягнення бажаної поведінки використовуються додаткові логічні умови переключення окремих переходів графа синхронізації. Через управління логічний вираз, що дозволяє перехід, стає дійсним у вказаній у відповідній компоненті вектора управління u_i часовій точці. Після того, як переключення відбулося, логічний вираз за допомогою управління повертається в вихідне положення і в подальшому не враховується при виконанні інших переходів в системі. Часові точки маркувань (переключень) з урахуванням логічних умов сповільнюють в цілому розвиток процесу по відношенню до динаміки в системі з некерованими переходами [42].

Такий підхід дозволяє розглядати управління як результат дії зворотного зв'язку, за допомогою якого через рішення системи рівнянь Max-Plus алгебри можна формувати умови часових точок маркувань. Фактично за допомогою зворотного зв'язку і специфікації математичної моделі процесу можна говорити про класичну структуру системи управління. При такій побудові управління в системі цілеспрямовано може змінюватись власне число і власний вектор в залежності від зовнішніх збурень, які безумовно діють на реальну ДБС.

Структура системи управління має вигляд, представлений на рисунку 1.

В основі синтезу алгоритму управління лежить ідея: так як через управління, розвиток у часі дискретно-безперервного процесу, який залежить від власного числа матриці динаміки, може тільки сповільнюватись, то очевидною є потреба зменшення різниці між власними числами матриць динаміки керованої і некерованої систем.

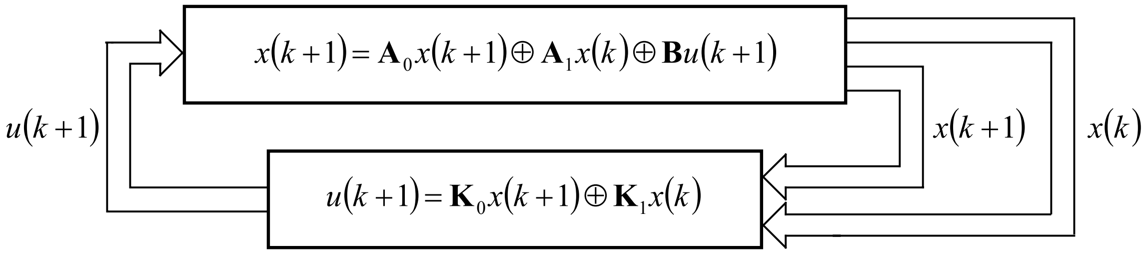

Рисунок 1 – Структура системи управління

Постановка задач дослідження.

На дискретно-безперервні системи, як і в системах інших класів, можуть діяти збурення, які необхідно враховувати при розрахунках систем керування. Для ДБС з одним власним вектором необхідно:

1) внести доповнення до Max-Plus алгебраїчній моделі ДБС, які дозволяють врахувати вплив збурень;

2) сформулювати умови до замкнутої керованої системи, виконання яких дозволяє зменшити вплив збурень і як найшвидше повернути ДБС у власний стан, де знову почнуть формуватись керуючи впливи з урахуванням логічних умов;

3) розробити методику синтезу системи управління ДБС, яка дозволяє компенсувати вплив збурень, діючих на ДБС;

4) провести моделювання розробленої системи з метою оцінки її якості.

Рішення задач і результати досліджень.

Формально збурення в системі можне враховувати в Max-Plus алгебраїчній моделі керованого дискретно-безперервного процесу за допомогою введення в рівняння стану додаткового доданка:

$$x(k+1) = \mathbf{A}_0 x(k+1) \oplus \mathbf{A}_1 x(k) \oplus \mathbf{B} u(k+1) \oplus \mathbf{E} z(k+1), \quad (1)$$

або після перетворень:

$$x(k+1) = \mathbf{A}_0^* \mathbf{A}_1 x(k) \oplus \mathbf{A}_0^* \mathbf{B} u(k+1) \oplus \mathbf{A}_0^* \mathbf{E} z(k+1). \quad (2)$$

В цих рівняннях матриця $\mathbf{E}$ показує, на яких позиціях графа синхронізації виникають збурення, що призводять до затримок заняття позицій в порівнянні з часом заняття в некерованому процесі. Вектор $z(k)$ включає часові точки закінчення затримок, пов’язаних з дією завад. Якщо $z_i(k) = \varepsilon$, то це означає, що на i-й позиції збурення відсутнє.

Перехідний процес в ДБС, породжений збуреннями, призводить до втрати власного стану. Ідея зменшення впливу збурень полягає в як найшвидшому поверненні системи у власний стан, де знову почнуть формуватись керуючи впливи з урахуванням логічних умов.

Для досягнення таких властивостей матриця динаміки $\mathbf{M}_s$ замкнутої керованої системи повинна задовольняти як мінімум 2 умовам [4]:

- циклічність ρ кожного жорстко зв’язаного компонента $G^c(\mathbf{M}_s)$ повинна дорівнювати 1, що забезпечує якнайшвидше переведення ДБС у власний стан;
- матриця $\mathbf{M}_s$ замкнутої системи повинна мати тільки один власний вектор.

Виконання цих умов в замкнутій системі можна забезпечити шляхом внесення додаткових елементів в матриці зворотного зв’язку K_0 і K_1.

Циклічність жорстко зв’язаних компонентів критичних графів $G^c(\mathbf{M})$ або $G^c(\mathbf{M}_s)$ тільки тоді більше 1, коли в них немає замкнутих циклів довжиною 1. Тому, для того щоб досягти циклічності 1, в критичний граф треба примусово внести цикл, довжиною 1. Це можна зробити за допомогою модифікації, наприклад, матриці K_1, якщо існує відповідний керований перехід, що належить будь-якому критичному циклу. При цьому необхідно мати на увазі, що якщо циклічність графа $G^c(\mathbf{M})$ некерованої системи більша ніж 1, то для жорстко зв'язаних компонент необхідний керований перехід може бути знайдений не завжди. В цьому випадку мінімізувати час повернення ДБС у власний стан практично неможливо.

Якщо ж в системі циклічність $G^c(\mathbf{M})$ дорівнює 1, а її значення підвищується для графа $G^c(\mathbf{M}_s)$, то в цьому випадку жорсткі логічні умови керованого переходу можна за рахунок особливого вибору компонент матриці зворотного зв'язку K_1 "пом'якшити" і досягти значення циклічності, що дорівнює 1. Для досягнення можливості зменшення циклічності керованого переходу з управлінням необхідною умовою є приналежність цього переходу до критичного циклу $G(\mathbf{M}_s)$. Цей цикл належить до жорстко зв'язаних компонент $G^c(\mathbf{M}_s)$, циклічність якого більше за 1. Так як ребро критичного графа є відповідною частиною циклу, то в мережі Петрі існує шлях, який не проходить через вершини, що відповідають початковим умовам маркування. Тобто із вершини S_k в післяобласті переходу і до початково маркованого положення S_i можна потрапити тільки через вершину, яка належить до жорстко зв'язаних компонент графа $G^c(\mathbf{M}_s)$. Вага цього шляху ω_{ik} розраховується за наступною формулою:

$$\omega_{ik} = \left(\left(\mathbf{A}_0 \oplus \mathbf{BK}_0\right)^* \mathbf{Bw}\right)_i, \tag{3}$$

де: $\mathbf{w} = \lfloor \mathbf{w}_1 \ldots \mathbf{w}_p \rfloor$,

p – кількість керованих переходів;

$$\mathbf{w}_j = \begin{cases} 0 & \text{при } j = m \\ \varepsilon & \text{в інших випадках.} \end{cases}$$

Тоді за допомогою елемента матриці зворотного зв'язку K_1, який відповідає m-му керованому переходу розрахованому за формулою:

$$\left(\mathbf{K}_1\right)_{mi} = \lambda_s - \omega_{ik}, \tag{4}$$

Додатково вводиться критичний цикл довжиною 1, який розпочинається і закінчується в вузлі k_i. Завдяки цьому циклічність цього жорстко зв'язаного компонента в графі $G^c(\mathbf{M}_s)$ дорівнює 1. Власні вектора і власні числа матриці $\mathbf{M}_s$ при цьому залишаються незмінними.

Наведемо приклад, що ілюструє компенсацію збурень в ДБС.

Нехай структура графа синхронізації має вид як показано на рисунку 2. Логічні умови керування таким процесом повністю відповідають типовим, які сформульовані раніше.

Критичний граф некерованої системи $G^c(\mathbf{M}_s)$ має жорстку зв'язну компоненту. Циклічність цього графа $\rho = 1$. Якщо жорстку логічну умову керування реалізувати через матрицю зворотного зв'язку $\mathbf{K}_0$, то структура графа $G(\mathbf{M}_s)$ має вид, представлений на рисунку 3.

«Жирними» лініями виділено $G^c(\mathbf{M}_s)$, звідки очевидно, що циклічність цього графа $\rho = 2$. Графік перехідного процесу для ДБС в цьому випадку представлено на рисунку 4.

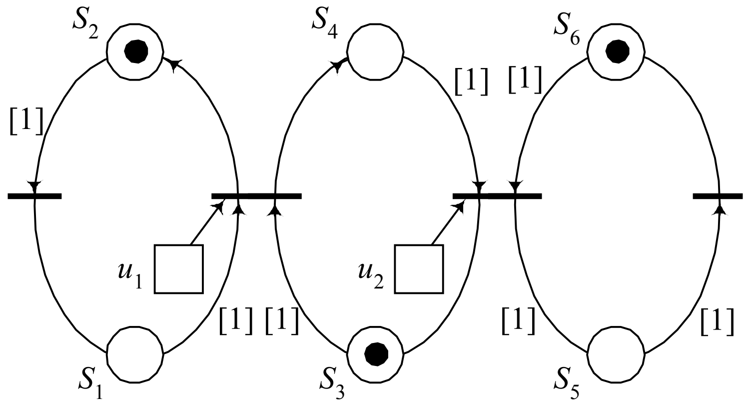

Рисунок 2 – Приклад графа синхронізації

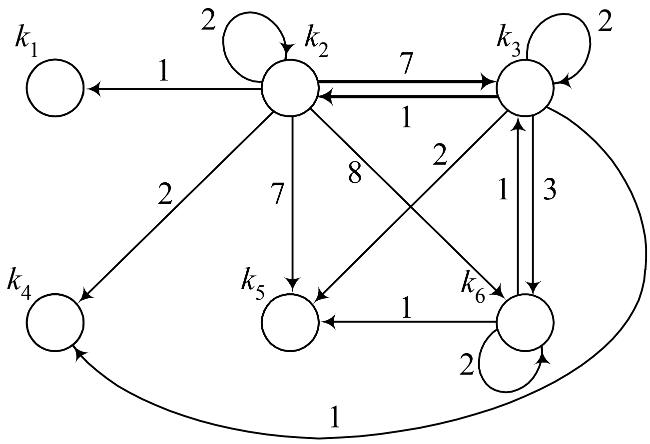

Рисунок 3 − Граф $G(\mathbf{M}_s)$ при трансформуванні жорсткої логічної умови керування через $\mathbf{K}_0$

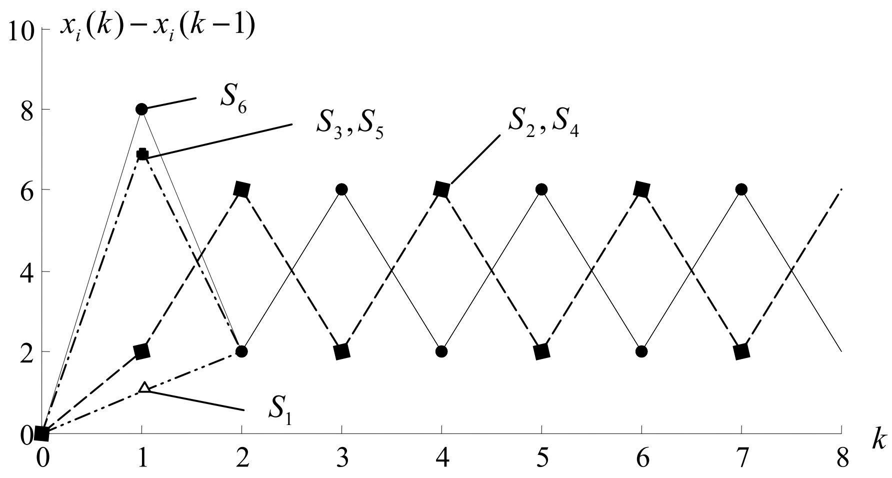

Рисунок 4 − Перехідний процес в ДБС з циклічністю $\rho = 2$

Якщо жорстку логічну умову керування реалізувати через матрицю зворотного зв’язку $\mathbf{K}_1$, то граф, що відповідає матриці замкненої системи $G(\mathbf{M}_s)$ матиме вид, як представлено на рисунку 5.

Критичний граф $G^c(\mathbf{M}_s)$ на цьому рисунку також виділений «жирними» лініями. Звідки очевидно, що циклічність цього графа $\rho = 3$.

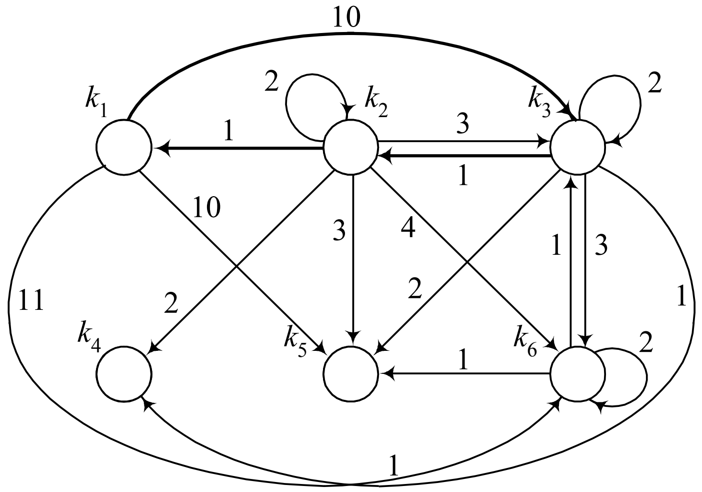

Рисунок 5 − Граф $G(\mathbf{M}_s)$ при трансформуванні жорстких логічних умов керування через $\mathbf{K}_1$

Перехідний процес в системі представлено на рисунку 6.

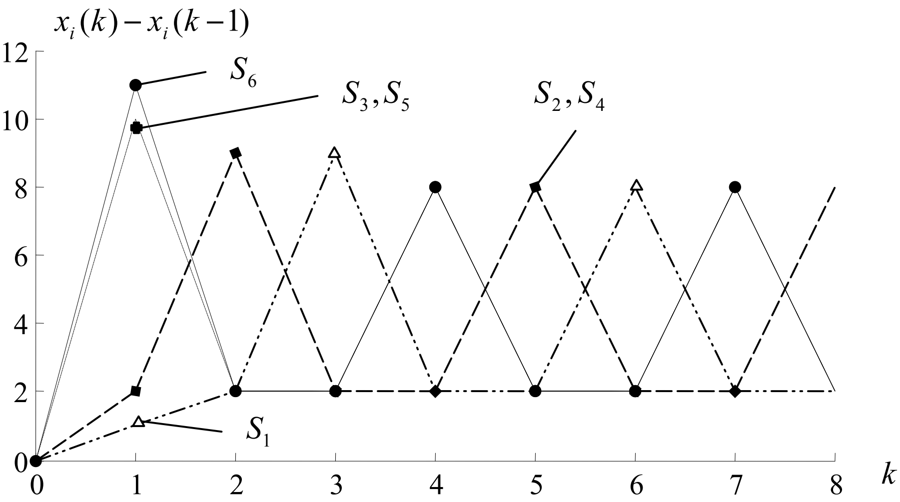

Рисунок 6 − Перехідний процес в ДБС з циклічністю $\rho = 3$

Для компенсації збурень можна застосувати теорію, основи якої наведено вище. Для цього задається вектор $\mathbf{w}$:

$$\mathbf{w}^T = [\varepsilon \quad e].$$

В першому випадку

$$(\mathbf{A}_0 \otimes \mathbf{B}\mathbf{K}_0)^* \mathbf{B}\mathbf{w} = [\varepsilon \quad \varepsilon \quad e \quad \varepsilon \quad e \quad 1]^T,$$

а в другому випадку:

$$(\mathbf{A}_0^* \mathbf{B}\mathbf{w}) = [\varepsilon \quad \varepsilon \quad e \quad \varepsilon \quad e \quad 1]^T.$$

Таким чином, в обох випадках $w_3 = e$ і елемент матриці зворотного зв’язку для керованого переходу k_3 можна визначити:

$$\left(\mathbf{K}_1\right)_{23} = \lambda_s - w_{33} = 4 - 0 = 4 .$$

Якщо логічна умова керування реалізується через $\mathbf{K}_1$, маємо:

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ 10 & \varepsilon & 4 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \end{bmatrix},$$

$$\left(\mathbf{K}_0\right)_{ij} = e ,$$

$$\mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} \varepsilon & 1 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & 2 & 1 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ 10 & 3 & 4 & \varepsilon & \varepsilon & 1 \\ \varepsilon & 2 & 1 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ 10 & 3 & 4 & \varepsilon & \varepsilon & 1 \\ 11 & 4 & 5 & \varepsilon & \varepsilon & 2 \end{bmatrix}.$$

Тоді граф, що відповідає замкнутій системі при трансформації умов в $\mathbf{K}_1$ і $\rho = 1$ матиме вид, що представлений на рисунку 7. Циклічність досягнуто за рахунок додаткового контуру в вузлі k_3 вагою 4 і довжиною 1.

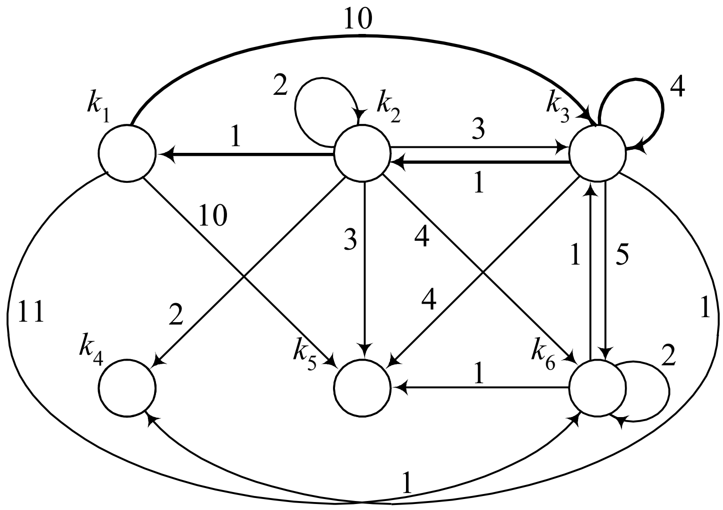

Рисунок 7 − Граф $G(\mathbf{M}_s)$ при трансформуванні жорсткої логічної умови керування в $\mathbf{K}_1$ і $\rho = 1$

На рисунку 8 наведено графік перехідного процесу в ДБС, який наочно ілюструє встановлення власного стану в системі.

Якщо логічні умови керування з урахуванням інваріантності трансформувати в $\mathbf{K}_0$ одержимо наступні перетворення. Оскільки $\mathbf{K}_1$ має тільки один елемент відмінний від ε, а саме $\left(\mathbf{K}_1\right)_{23} = 4$, матриця замкненої системи матиме такий вид:

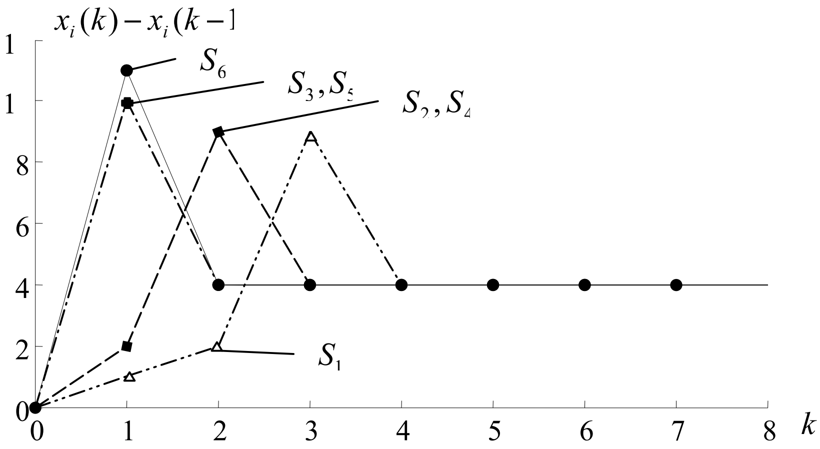

Рисунок 8 − Перехідний процес в ДБС з $\rho = 1$

$$\mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} \varepsilon & 1 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & 2 & 1 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & 7 & 4 & \varepsilon & \varepsilon & 1 \\ \varepsilon & 2 & 1 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & 7 & 4 & \varepsilon & \varepsilon & 1 \\ \varepsilon & 8 & 5 & \varepsilon & \varepsilon & 2 \end{bmatrix}.$$

Цій матриці відповідає граф, який представлено на рисунку 9.

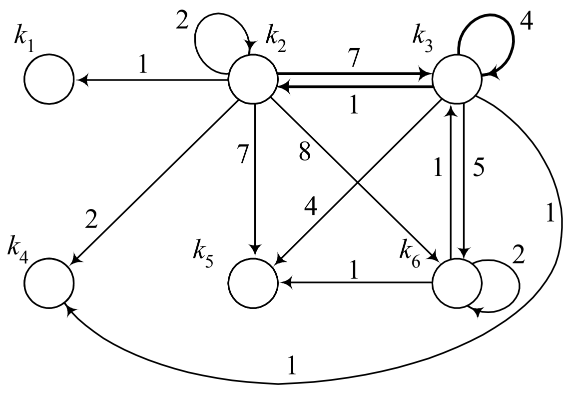

Рисунок 9 − Граф $G(\mathbf{M}_s)$ при трансформації жорстких логічних умов керування в $\mathbf{K}_0$ і $\rho = 1$

Циклічність $\rho = 1$ досягається знову за рахунок додаткового шляху з вагою 4 і довжиною 1 в вершині k_3. Власний вектор ДБС в обох випадках залишається незмінним:

$$v_s = \begin{bmatrix} -3 & e & 3 & e & 3 & 4 \end{bmatrix}^T,$$

і власне число $\lambda_s = 4$ також відповідає значенню, що було в системі без урахування компенсації збурень.

Висновки.

1. Проведено аналіз впливу збурень на систему автоматичного управління дискретно-безперервним об'єктом. Показано, що перехідний процес в ДБС, породжений збуреннями, призводить до втрати власного стану.

2. Представлені доповнення в Max-Plus алгебраїчної моделі ДБС, які дозволяють врахувати вплив збурень.

3. Розроблена методика зменшення впливу збурень, ідея якої полягає є найшвидшому поверненні системи у власний стан, де знову почнуть формуватись керуючі впливи з урахуванням логічних умов. Виконання цих умов в замкнутій системі запропоновано забезпечити шляхом внесення додаткових елементів в матриці зворотного зв'язку K_0 і K_1.

4. Проведено моделювання розробленої системи управління та отримані перехідні процеси в ДБС, що ілюструють повернення системи до власного стану за мінімальний час.

Література

1. Peterson, J. Petri net theory and modeling of systems [Text] / j. Peterson. – Prentice Hall. -1981. – ISBN 0-13-661983-5.
2. mossig, K. Einfuerung in die "Max-Plus"-Algebra zur Beschreibung ereignisdiskreter dynamischer Prozesse [Text] / K. mossig, A. Rehkopf // Automatisierungstechnik. VoL. 44.- Karlsruhe, 1996.- P. 3-9.
3. mossig, K. Steuerungsentwurf fuer ereignisdiskrete Systeme durch Vorgabe eines Eigenvektors der "Max-Plus"-Algebra [Text] / K. mossig // Automatisierungstechnik. VoL. 44.- Karlsruhe, 1996.- P. 80 - 86.
4. mossig, K. Algebraischer Steuerungsentwurf fuer eine Klasse ereignisdiskreter Prozesse mittels der Max-Plus-Algebra [Text] / K. mossig/ VDI – Fortschrittsberichte, volume 20. Duesseldorf: VDI Verlag. – 1996. 137 s.
5. Червинская Н.В. Моделирование процессов динамики комплекса шахтного водоотведения в базисе Max-Plus алгебры [Текст] / Н.В. Червинская, В.И. Бессараб, В.В. Червинский // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Випуск 147 (16). – Донецьк: ДонНТУ, 2009. С. 51 – 58.

Аннотация
Бессараб В.И., Червинский В.В., Зайцева Э.Е. Компенсация возмущений в дискретно-непрерывных системах автоматического управления. *Выполнен анализ возмущений на системы автоматического управления дискретно-непрерывными объектами, учтено их влияние в Max-Plus алгебраической модели дискретно-непрерывной системы (ДБС). Разработана методика компенсации возмущений в ДБС. Показана возможность обеспечения компенсации возмущений в замкнутой системе путем внесения дополнительных элементов в матрицы обратной связи.*
Ключевые слова: *дискретно-непрерывная система, Max-Plus алгебра, компенсация возмущений, система автоматического управления, граф синхронизации.*

Abstract
Bessarab V.I., Chervinsky V.V., Zaytseva E.Y. Disturbance compensation in discrete-event automatic control systems. *The analysis of disturbance on the automatic control systems of discrete-event objects are performed, the influence in Max-Plus algebra model of discrete-event system are allowed for. The methodic of disturbance compensation in DES are developed. The disturbance compensation capability in closed loop system by means of additional elements addition into loopback matrix are presented.*
Keywords: *discrete-event system, Max-Plus algebra, disturbance compensation, automatic control system, synchronization graph.*

Здано в редакцію: 01.04.2010р.

Рекомендовано до друку: д.т.н, проф. Скобцов Ю.О.