

УДК 621.396.4

Тачиніна О.М., к.т.н.
Гальченко С.М., к.т.н.
Соколов Є.І.
Ціпов'яз А.О.
Зунунов А.О.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЛІДКУЮЧОЇ СИСТЕМИ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

Національний авіаційний університет

tachinina@rambler.ru
smgalchenko@gmail.com
sokolovsokolovzhenyazhenya@gmail.com
artemiypromark@gmail.com

Проведено розрахунок і аналіз слідкуючої системи промислового робота. Отримана математична модель виконавчого двигуна, проведена лінеаризація цієї моделі. Запропонована система автоматичного керування роботом, виконано розрахунок окремих її ланок

Ключові слова: промисловий робот, математична модель, коригуюча ланка

Вступ

На сьогоднішній день широке використання отримали промислові роботи, призначення яких – заміна людини при виконанні основних і допоміжних технологічних операцій у процесі промислового виробництва. При цьому вирішується важлива соціальна задача – звільнення людини від робіт, пов'язаних з небезпечною для здоров'я чи з важкою фізичною працею, а також від простих монотонних операцій, що не вимагають високої кваліфікації. Гнучкі автоматизовані виробництва, які створюються на базі промислових роботів, дозволяють вирішувати задачі автоматизації на підприємствах із широкою номенклатурою продукції. Маніпулятори, керовані людиною-оператором, необхідні при виконанні різних робіт з радіоактивними матеріалами. Крім того, ці пристрої незамінні при виконанні робіт у космосі, під водою, у хімічно активних середовищах. Таким чином, промислові роботи і маніпулятори є важливою складовою частиною сучасного виробництва.

Застосування робототехнічних комплексів призводить до підвищення продуктивності виробничих процесів. Перш за все, це пов'язано зі швидким їх переми-

щенням і позиціонуванням. Також важливу роль відіграє і такий фактор, як можливість їх автоматичної роботи без перерви та простоїв.

Робототехнічні системи та комплекси на промислових підприємствах виконують наступні задачі:

- завантажувально-розвантажувальні роботи;
- перенесення виробів з одної виробничої установки на іншу;
- завантаження важких предметів на конвеєр або палети;
- обробку деталей і заготовок;
- зварювання і свердління;
- випробування і контроль;
- монтаж друкованих плат;
- нанесення різних розчинів на поверхню.

При використанні робототехнічних комплексів постає завдання розробки системи автоматичного керування, яка буде виконувати складний комплекс задач. При апаратній реалізації системи керування необхідно мати задану швидкодію для вирішення поставлених завдань в реальному часі, з одного боку, і бути надійними, компактними, економними в споживанні енергії з іншого боку.

При проектуванні систем автоматичного керування (САК) роботами зазвичай задаються необхідні для нормальної роботи показники якості регулювання при деякому типовому зовнішньому впливі. При цьому вирішується як завдання аналізу, так і завдання синтезу. Завдання синтезу протилежне завданню аналізу. Якщо при аналізі структура і параметри задані, а розглядають поведінку системи в заданих умовах, то в задачі синтезу завдання і мета міняються місцями. Завдання синтезу зазвичай має безліч рішень, і вибір з цієї множини найбільш раціонального рішення не може бути зроблений тільки на підставі математичних розрахунків. Це більше інженерна, ніж математична задача. Найчастіше задається ряд елементів системи управління (об'єкт регулювання, двигуни, підсилювачі тощо), оскільки при побудові систем доцільно максимально використовувати широку номенклатуру елементів автоматики, що випускаються промисловістю. Нерідко вибір основних типових ланок зумовлює і основні риси структури системи.

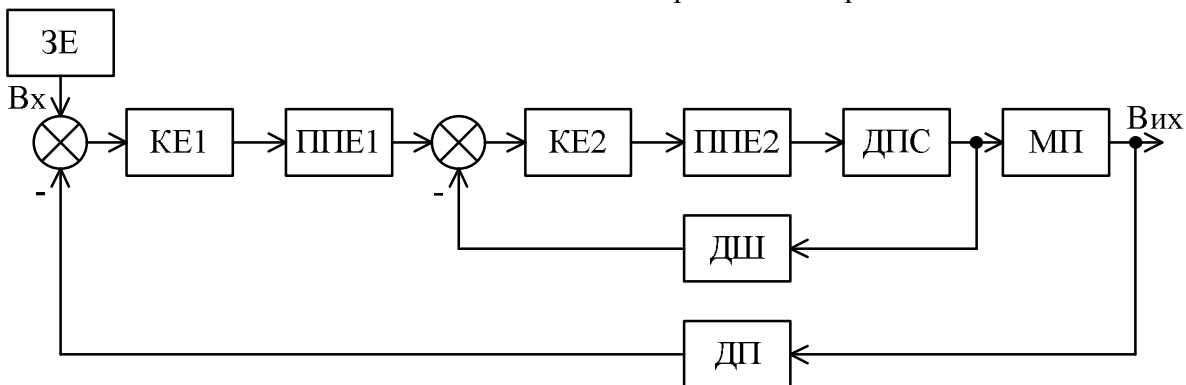


Рис. 1. Функціональна схема слідкуючої системи промислового робота

Задаючий елемент (ЗЕ) формує інформацію про необхідні траєкторії переміщення ланок маніпулятора і захватного пристрою. Коригувальний (КЕ1) і підсилювально-перетворюючий (ППЕ1) елементи спільно виконують функцію регулятора положення. Підсилювально-перетворюючий елемент (ППЕ2) є підсилювачем потужності, який спільно з коригувальним елементом (КЕ2) виконує

В даній статті пропонується проведення аналізу та синтезу системи автоматичного керування із застосуванням імітаційного моделювання, що дозволить проводити повне або часткове моделювання системи. При цьому стає можливим найбільш повне дослідження впливів різних чинників нелінійності, залежності параметрів від часу тощо.

Постановка задачі

У відповідності до необхідних умов виробничого процесу кінематичні ланки і захватні пристрої промислового робота (ПР) повинні переміщатися в просторі по заданим траєкторіям. Таке переміщення в автоматичному режимі здійснюється в сучасних роботах за допомогою системи управління, яка представляє собою складний комплекс слідкуючих систем управління положенням ланок маніпулятора – слідкуючих приводів. Кожен привід керує певним ступенем рухливості маніпулятора. У загальному випадку, структура окремої слідкуючої системи ПР може бути представлена функціональною схемою, зображеною на рис.1.

функцію регулятора швидкості. Інші елементи: двигун постійного струму (ДПС), датчик швидкості (ДШ), датчик положення (ДП), блок механічної передачі (МП) конструктивно входять до складу виконавчого органу маніпулятора і є незмінною частиною системи. Таким чином, функціональна схема містить два контури регулювання: контур регулювання швидкості двигуна (сервопривід) і контур ре-

гулювання кутового або лінійного положення (слідкуючий привід).

Слідкуючі системи ПР визначають найважливіші технічні характеристики роботи, зокрема, його точність і швидкість і повинні забезпечувати мінімальне значення похибки позиціонування захватного пристрою маніпулятора при максимально можливій швидкодії, а також аперіодичність процесів управління. В роботі розглядається слідкуюча система промис-

лового робота, в якій в якості виконавчого двигуна використовується двигун постійного струму з незалежним збудженням.

Математична модель слідкуючої системи промислового робота

Структурна схема двигуна постійного струму слідкуючої системи промислового робота представлена на рис. 2.

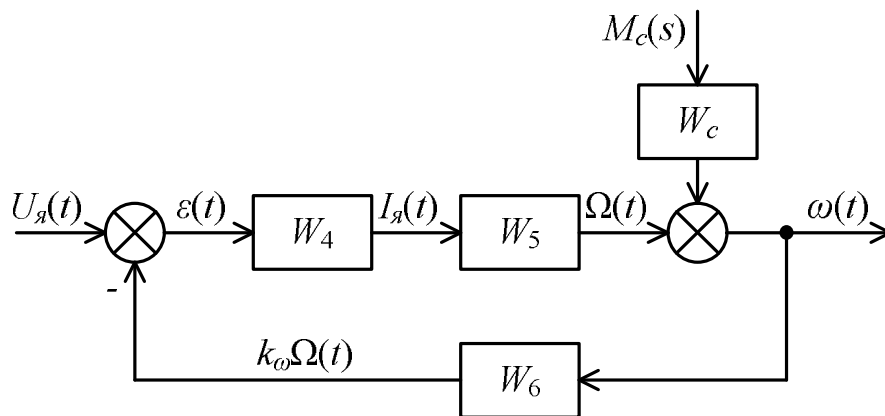


Рис. 2. Структурна схема двигуна постійного струму

З урахування позначень сигналів на структурній схемі, математичну модель двигуна постійного струму в часовій області на основі закону Кірхгофа і рівняння моментів можна записати в такий спосіб:

$$U_{я}(t) = R_{я} \cdot i_{я}(t) + L_{я}(t) \frac{di_{я}(t)}{dt} + E(\omega), \quad (1)$$

$$M_d(i_{я}) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + M_c(t), \quad (2)$$

де ω – кутова швидкість обертання вала двигуна;

J – момент інерції всіх обертових частин;

$E(\omega)$ – електрорушійна сила;

$L_{я}$ – індуктивність якірного ланцюга;

$R_{я}$ – активний опір якірного ланцюга;

M_c – момент опору на валу двигуна;

M_d – динамічний момент сил.

Виконавши перетворення в (1), (2) отримуємо систему диференціальних рівнянь:

$$\frac{di_{я}(t)}{dt} = \frac{1}{L_{я}} \cdot U_{я}(t) - \frac{R_{я}}{L_{я}} \cdot i_{я}(t) - \frac{1}{L_{я}} \cdot E(\omega), \quad (3)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot M_d(i_{я}) - \frac{1}{J} \cdot M_c(t), \quad (4)$$

Провівши лінеаризацію (3) і (4), приймаючи

$$i = i_{я0}; U = U_{я0}; \omega = \omega_0; M_c = M_{c0}$$

отримуємо

$$\frac{di_{я}(t)}{dt} = \frac{1}{L_{я}} U_{я}(t) - \frac{R_{я}}{L_{я}} i_{я}(t) - \frac{1}{L_{я}} k_w \Omega(t), \quad (5)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} k_M i_{я}(t) - \frac{1}{J} M_c(t). \quad (6)$$

Застосовуючи перетворення Лапласа до (5) і (6) отримуємо дану систему рівнянь в операторній формі:

$$s \cdot I_{я}(s) = \frac{1}{L_{я}} U_{я}(s) - \frac{R_{я}}{L_{я}} I_{я}(s) - \frac{1}{L_{я}} k_w \Omega(s),$$

$$s \cdot \Omega(s) = \frac{1}{J} k_M I_{я}(s) - \frac{1}{J} M_c(s), \quad (7)$$

Ввівши позначення

$$\frac{1}{R_{\text{я}}} = k_{\text{я}}; \quad \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = T_{\text{я}}$$

отримаємо вирази для передавальних функцій W_4, W_5, W_6 в операторній формі.

Вираз для передавальної функції $W_4(s)$ набуде вигляду

$$\begin{aligned} W_4(s) &= \frac{I_{\text{я}}(s)}{U_{\text{я}}(s)} = \frac{1}{s \cdot L_{\text{я}} + R_{\text{я}}} = \\ &= \frac{1}{R_{\text{я}}} \cdot \frac{1}{\frac{s \cdot L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} + 1} = \frac{k_{\text{я}}}{T_{\text{я}} \cdot s + 1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Передавальна функція $W_5(s)$ виходить з рівняння (7)

$$W_5(s) = \frac{\Omega(s)}{I_{\text{я}}(s)} = \frac{k_M \cdot I_{\text{я}}(s)}{I_{\text{я}}(s) \cdot J \cdot s} = \frac{k_M}{J \cdot s}, \quad (9)$$

передавальна функція $W_6(s)$

$$W_6(s) = \frac{k_w \cdot \Omega}{\Omega} = k_w. \quad (10)$$

Беручи до уваги момент M_c , знайдемо передавальну функцію W_c з рівняння (7), приймаючи струм якоря рівним нулю

$$\begin{aligned} W_c(s) &= \frac{\Omega}{M_c} = \frac{\Omega}{s \cdot \Omega \cdot J} = \frac{1}{s \cdot J}, \\ W_c(s) &= \frac{1}{60 \cdot s}. \end{aligned}$$

З урахуванням вище наведених рівнянь (8)–(10) отримуємо вираз для передавальної функції двигуна з управління.

$$W_{\text{ДБ}}(s) = \frac{W_4(s) \cdot W_5(s)}{1 + W_4(s) \cdot W_5(s) \cdot W_6(s)}.$$

Структурна схема слідкуючої системи в цілому представлена на рис. 3.

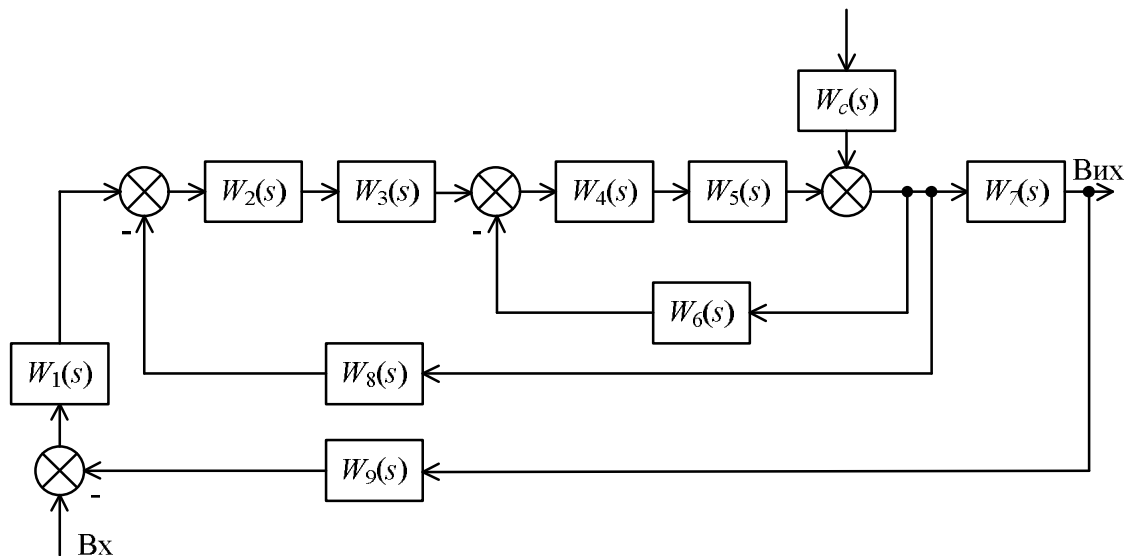


Рис. 3. Структурна схема слідкуючої системи

На схемі вказані наступні передавальні функції:

- $W_1(s) = k$ – коефіцієнт підсилення по параметру положення;
- $W_2(s)$ – передавальна функція коригувальної ланки;

- $W_3(s)$ – передавальна функція підсилювача-перетворювача (блок ППЕ2);
- $W_4(s), W_5(s), W_6(s)$ – передавальні функції двигуна постійного струму (блок ДПС);

– $W_7(s)$ – передавальна функція механічної передачі (блок МП);

– $W_8(s)$ – передавальна функція вимірювача швидкості (блок ДШ);

– $W_9(s)$ – передавальна функція датчика кутового положення (блок ДП).

Для нормального опрацювання в сервоприводі сигналів управління і встановлення на виході необхідного параметра на заданому рівні необхідно вирішити задачу точності. Точність в системах автоматичного управління визначається коефіцієнтами сталих помилок. Загальне значення помилки в сталому режимі може бути записано у вигляді суми:

$$e(t \rightarrow \infty) = e_0 + e_1 + e_2 + \mathbf{K},$$

де e_0 – статична помилка;

e_1 – швидкісна помилка;

e_2 – помилка прискорення.

Сервопривід повинен бути астатичний, тобто ґрунтуючись на цьому можемо записати наступне:

$$E(t) = C_0 \cdot U(t) + C_1 \cdot U(t) + \mathbf{K}.$$

де C_0 – коефіцієнт статичної помилки;

C_1 – коефіцієнт швидкісної помилки.

Вирішимо задачу синтезу коригувальної ланки в сервоприводі, виходячи з умови виконання вимог по точності і якості, тобто загальне завдання синтезу розділимо на два завдання: точності, якості. Вихідними даними для синтезу є показники якості і коефіцієнти швидкісної і статичної помилок.

Вирішення задачі точності

Передавальна функція

$$W_2(s) = W_{21}(s) \cdot W_{22}(s),$$

в якій $W_{21}(s)$ вирішує задачу точності, $W_{22}(s)$ вирішує задачу якості, оскільки вирішуючи завдання точності, необхідно

визначити $W_{21}(s)$. Щоб $C_0 = 0$ потрібно ввести інтегруючу ланку.

$$C_0 = \frac{1}{1 + W_1(s)} = \frac{1}{1 + K};$$

$$C_0 = \frac{1}{1 + W_1(s)} \cdot \frac{1}{s} = \frac{s}{s + W_1(s)} = 0.$$

Так як статична помилка по задаючому впливу дорівнює нулю ($C_0 = 0$), то система має астатизм першого порядку з управління. Тоді можемо записати, що

$$W_{21}(s) = \frac{K}{s}.$$

Оскільки в системі є астатизм першого порядку, то статична помилка дорівнює нулю, а швидкісна помилка буде визначатися співвідношенням

$$C_1 = \frac{s + W_1(s) - s \cdot (1 + W_1(s))}{(s + W_1(s))^2} = \frac{K}{K^2} = \frac{1}{K},$$

де K – загальний коефіцієнт підсилення системи в сервоприводі.

Очевидно, що вимоги по статичній помилці ми виконали.

Таким чином, можна отримати коефіцієнт підсилення K такий, що задовольняються умови заданої точності і повністю вирішується задача. Тобто

$$W_{21}(s) = \frac{K}{s}.$$

Передавальна функція сервоприводу прийме наступний вигляд:

$$\Phi_1(s) = \frac{W_3(s) \cdot W_{ДБ}(s)}{1 + W_3(s) \cdot W_{ДБ}(s) \cdot W_8(s)},$$

де $\Phi_1(s)$ – сервопривід без корекції.

Результати імітаційного моделювання слідкуючої системи без коригуючої ланки наведено на рис. 4.

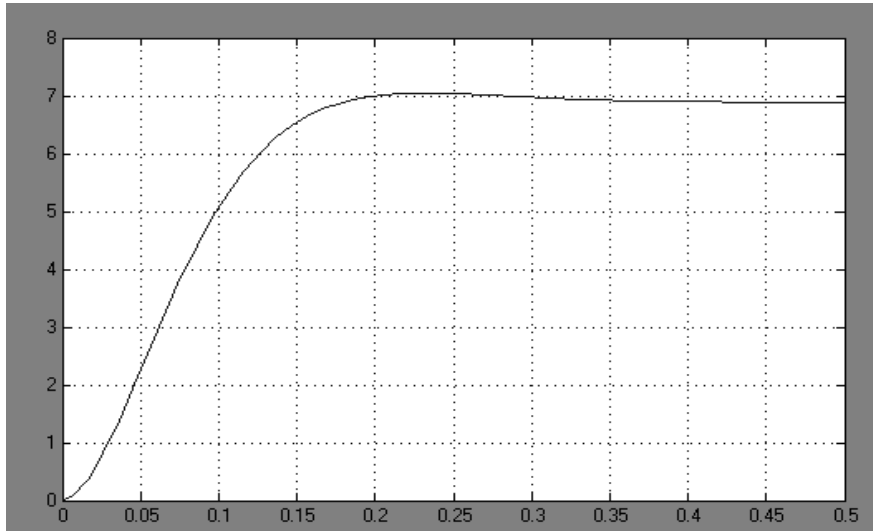


Рис. 4. Перехідний процес в сервоприводі без коригуючої ланки:

– час регулювання $t_p = 0,15$ с ;

– пере регулювання $s = 2,9$ %

Вирішення задачі забезпечення прямих показників якості

При неможливості вирішення задачі підвищення запасів стійкості в рамках наявної системи доводиться йти на зміну структури, тобто вводять коригувальні ланки в систему.

Маючи сталі часу T_2, T_3, T_4, T_5, T_6 , передавальна функція коригуючої ланки набуде наступного вигляду:

$$W_{кл}(s) = \frac{(T_4 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1) \cdot (T_3 \cdot s + 1)}{(T_6 \cdot s + 1)^2 (T_5 \cdot s + 1)}$$

Так як коригуюча ланка має складну передавальну функцію, а також відсутня елементарна ланка, ґрунтуючись на якій можна було б реалізувати ланку корекції, то необхідно скласти її з декількох складових.

Так як передавальні функції послідовно з'єднаних ланок перемножуються, а ЛАЧХ складаються, то варто скласти

необхідну ланку з трьох диференціальних з включенням між ними узгоджувального операційного підсилювача.

Передавальна функція замкнутого скоригованого контуру сервопривода набуде наступного вигляду:

$$\Phi_{іск}(s) = \frac{W_{кл}(s) \cdot W_H(s)}{1 + W_{кл}(s) \cdot W_H(s) \cdot W_8(s)}$$

де $W_H(s)$ – передавальна функція незмінної частини системи

Перевірка правильності вибору коригуючої ланки на конкретному випадку. За передавальною функцією замкнутого зкоригованого контуру будемо перехідний процес, за яким визначаємо прямі показники якості, які повинні збігатися або бути не більше заданих показників якості. Результати імітаційного моделювання слідкуючої системи з коригуючою ланкою наведено на рис. 5.

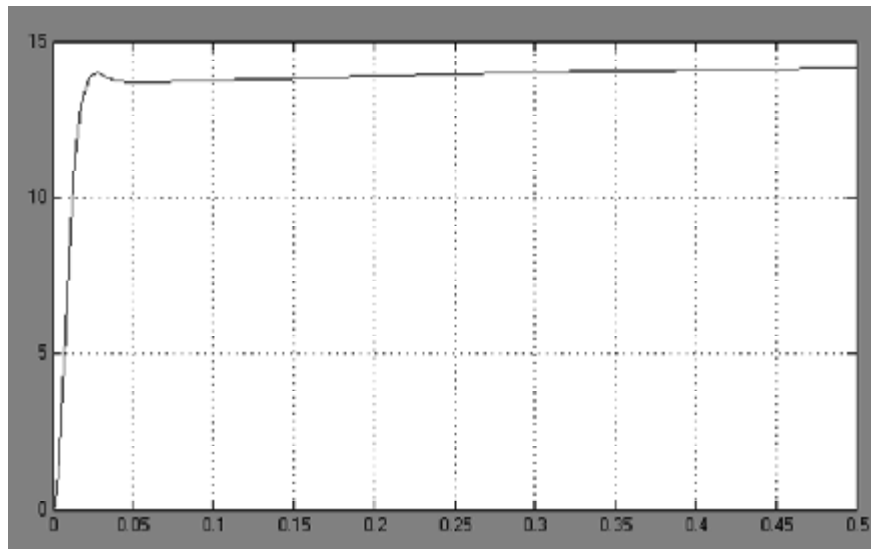


Рис. 5. Графік перехідного процесу для скоригованого замкнутого контуру:
 – час регулювання $t_p = 0,02$ с ;
 – перерегулювання $s = 0$ %

Висновки

Таким чином, було проведено розрахунок і аналіз САК слідкуючої системи промислового робота. Отримано математичну модель двигуна та проведено її лінеаризацію. Розроблено структурну схему САК. Для покращення динамічних характеристик було введено і розраховано корекцію в сервоприводі. З наведених графіків видно, що перехідний процес покращився завдяки правильно вибраній коригуючій ланці. Дана робота є продовженням і розвитком ряду досліджень пов'язаних з промисловими роботами.

Список літератури

1. Белман Р. Динамическое программирование / Пер. с англ. И.М. Андреевой, А.А. Корбута, И.В. Романовского, И.Н. Соколовой. Под ред. Н.Н. Воробьева. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 400 с.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб.: Изд-во «Лань-Профессия», 2004. – 752 с.
3. Дьяконов В.П. Компьютерная математика: Теория и практика / В.П. Дьяконов. – М.: Нолидж, 2000. – 430 с.
4. Макаров И.М. Управление робототехническими системами и гибкими автоматизированными производствами: По-

собие / Под ред. И.М. Макарова. – М.: Высшая школа, 1986. – 159с.

5. Russell Smith. Open Dynamics Engine. – 2014. – 773 с.

Статтю подано до редакції 02.03.2017