

К. О. БЕЛИКОВ, О. П. ГУБАРЕВ

АДАПТАЦІЯ КЕРУВАННЯ В ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНИХ СИСТЕМАХ З ДИСКРЕТНИМ ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ

В технологічних процесах з використанням дискретних систем пневмо- і гідроавтоматики одним із шляхів підвищення ефективності системи можна вважати скорочення часу на виконання операцій. В роботі розглядається сегмент системи, що складається з двох приводів з програмним керуванням. За рахунок наявності програмної складової в системі керування, при усталених умовах та стабільних динамічних характеристиках системи, є можливість скорочення часу між ефективними діями приводів. Цього можна досягнути за рахунок суміщення ділянок холостого ходу приводів, якщо це не суперечить конфігурації системи та технологічним вимогам до циклу. Розглядається спосіб скорочення часу виконання операцій передчасною подачею сигналу керування на другий привод та описується алгоритм вибору моменту часу подачі керуючого сигналу. Зазначено, що при керуванні системою приводів, може виникати необхідність регулювання періода роботи групи модулів за встановленим ззовні часом, що викликає необхідність затримки керуючого сигналу і також, може бути введено в програму, в якості моделі для прогнозування часу спрацювання та визначення часових міток. Наведено приклад типового сегменту системи, для якого може бути використано запропонований спосіб керування. Описано алгоритм розрахунку часових проміжків та міток для прогнозування тривалості операції і врахування, через них, корегуючих значень для забезпечення необхідної послідовності спрацювання приводів автоматичної системи, з мінімальною кількістю помилкових спрацювань. Запропоновано використання адаптивної моделі напрацювання умовного рефлексу, що забезпечить врахування змін динамічних характеристик в процесі роботи приводів механотронної системи. Приведено критерій для оцінки можливості застосування запропонованого алгоритму на ділянках автоматизованих ліній та приведено оцінку скорочення затрат часу в залежності від характеристик приводів. Зазначено, що є необхідність енергетичного аналізу для оцінки енергоефективності запропонованого рішення.

Ключові слова: мехатронні системи; пневмо-гідроавтоматика; алгоритми керування; ефективність; технологічні цикли; адаптивні системи; програмне керування.

К. А. БЕЛИКОВ, А. П. ГУБАРЕВ

АДАПТАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ДИСКРЕТНЫМ ПРОГРАМНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В технологических процессах с использованием дискретных систем пневмо- и гидроавтоматики одним из путей повышения эффективности системы можно считать сокращение времени на выполнение операций. В работе рассматривается сегмент системы, состоящей из двух приводов с программным управлением. За счет наличия программной составляющей в системе управления, при сложившихся условиях и стабильных динамических характеристиках системы, есть возможность сокращения времени между эффективными действиями приводов. Этого можно достичь за счет совмещения участков холостого хода приводов, если это не противоречит конфигурации системы и технологическим требованиям к циклу. Рассматривается способ сокращения времени выполнения операций преждевременной подачей сигнала управления на второй привод и описывается алгоритм выбора момента времени подачи управляющего сигнала. Отмечено, что при управлении системой приводов, может возникать необходимость регулирования периода работы группы модулей по установленному извне времени, что вызывает необходимость задержки управляющего сигнала и также может быть введено в программу, в качестве модели для прогнозирования времени срабатывания и определения временных меток. Приведен пример типичного сегмента системы, для которого может быть использован предложенный способ управления. Описан алгоритм расчета временных промежутков и меток для прогнозирования продолжительности операции и учета, через них, корректирующих значений для обеспечения необходимой последовательности срабатывания приводов автоматической системы, с минимальным количеством ложных срабатываний. Предложено использование адаптивной модели наработки условного рефлекса, что обеспечит учет изменений динамических характеристик в процессе работы приводов механотронной системы. Приведен критерий для оценки возможности применения предложенного алгоритма на участках автоматизированных линий и приведена оценка сокращения затрат времени в зависимости от характеристик приводов. Отмечено, что есть необходимость энергетического анализа для оценки энергоэффективности предлагаемых решений.

Ключевые слова: мехатронные системы; пневмо-гидроавтоматика; алгоритмы управления; эффективность; технологические циклы; адаптивные системы; программное управление.

K. BELIKOV, O. GUBAREV

ADAPTATION OF CONTROL IN ELECTROPNEUMATIC SYSTEMS WITH DISCRETE SOFTWARE CONTROL

In technological processes with the use of discrete systems of pneumatic and hydraulic automation, one of the ways to increase the efficiency of the system can be considered to reduce the time to perform operations. The paper considers a segment of the system consisting of two drives with software control. Due to the presence of a software component in the control system, under stable conditions and stable dynamic characteristics of the system, it is possible to reduce the time between the effective actions of the drives. This can be achieved by combining the idling sections of the drives, if it does not contradict the system configuration and technological requirements for the cycle. The method of reducing the execution time of operations by prematurely supplying the control signal to the second drive is considered and the algorithm for selecting the time of the control signal is described. It is noted that when controlling the drive system, it may be necessary to adjust the period of operation of the group of modules at externally set time, which necessitates a delay of the control signal and can also be entered into the program as a model for predicting operation time and timestamps. An example of a typical system segment for which the proposed control method can be used is given. An algorithm for calculating time intervals and labels for predicting the duration of the operation and taking into account, through them, corrective values to ensure the required sequence of operation of the drives of the automatic system, with a minimum number of false positives. The use of an adaptive model of the development of the conditioned reflex is proposed, which will take into account the changes in the dynamic characteristics in the process of operation of the drives of the mechanotron system. The criterion for estimation of possibility of application of the offered algorithm on sites of the automated lines is resulted and the estimation of reduction of expenses of time depending on characteristics of drives is resulted. It is noted that there is a need for energy analysis to assess the energy efficiency of the proposed solution.

© К. О. Бєліков, О. П. Губарєв, 2020

Keywords: mechatronic systems; pneumo-hydraulic automation; control algorithms; efficiency; technological cycles; adaptive systems; software control.

Вступ. В механічних автоматизованих системах, наприклад пакування, одним із показників ефективності є продуктивність, яка виражається через час, який було затрачено на упаковку і відвантаження певної кількості одиниць товару. Зменшення часу на виконання операцій може здійснюватись різними способами, але в межах, що не суперечать технологічному циклу, техніці безпеки, економічності тощо. З іншої сторони, одним із способів контролю виконання операцій є контроль за часом, який в певних приводних системах не є надійним, через зміну динамічних характеристик приводів під впливом зовнішнього середовища та інших факторів [1–5].

На відміну від задач параметричної адаптації, з пошуком раціональних параметрів для оптимального керування виконавчим пристроєм, певне коло задач потребує динамічної зміни алгоритму керування, у тому числі із заміною не тільки алгоритму, а й критеріїв пошуку раціонального рішення [6–13].

Викладення основного матеріалу. Задачею дослідження є розробка програмного алгоритму керування пневмоприводом з дискретним програмним керуванням для розширення можливостей адаптивного керування мехатронними системами та взаємодії з моделлю напрацювання умовного рефлексу [9–11].

Імітація роботи інерційної системи розглядається на прикладі сегменту автоматизованої системи з програмним керуванням. Робота пневмоприводів у складі системи виконується за циклом «...-1-2-n1, n2-...» (рис. 1). Виділений сегмент системи складається з двох пневматичних приводів. Контроль виконання операції 1-м приводом виконується за тиском, за допомогою реле тиску P1.

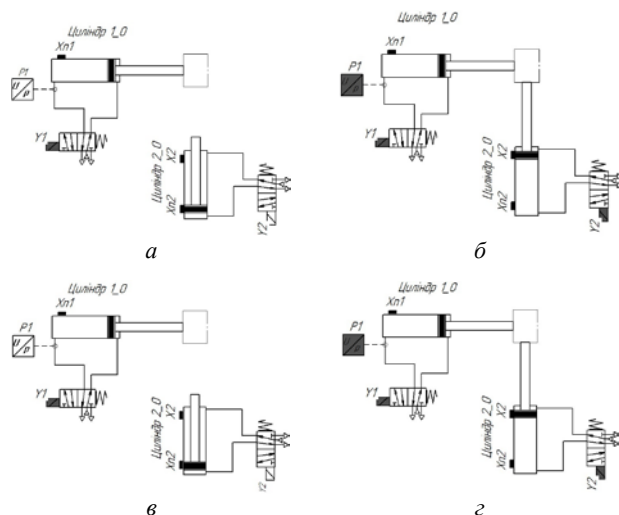


Рис. 1. Послідовність роботи пневматичних приводів: а – звичайний цикл; б – цикл з керуванням «на випередження»

Подача команди на спрацювання 2-го приводу Y2 подається при появі сигналу від реле тиску

P1 = "1" (рис. 1, б). Для задачі керування часом виконання послідовності операцій у виділеному сегменті, з метою мінімізації часу, результатом, який необхідно досягти є ситуація, коли 2-й циліндр знаходиться на мінімальній відстані від кінцевого положення в момент появи сигналу від реле тиску P1 (рис. 1, з).

Для запобігання передчасного входження 2-го циліндра в робочу зону (порушення технологічного циклу), сигнал датчика X2, який встановлено зі зміщенням є відносно кінцевого положення, при умові P1 = "0", відключає команду Y2. В такому випадку, повторна подача команди Y2 відбувається після сигналу P1 = "1". Даний випадок реєструється програмою, як помилкова спроба.

В ситуації, коли необхідно забезпечити виконання операцій 1-м і 2-м циліндрами в зазначений час, який визначається зовнішніми факторами, задачею алгоритму є підбір часової затримки подачі команди Y2 після появи сигналу P1 = "1".

Оскільки для застосування алгоритму вибору моменту часу подачі команди Y2 в системах керування від контролера є обмежена можливість введення в програму основних конструктивних характеристик, то необхідно привести модель розрахунку часу спрацювання циліндрів за часовими мітками.

Час спрацювання пневматичного приводу (рис. 2) при прямому ході прийнято поділяти на [14–20]:

- час перемикання керуючого розподільника (t_1);
- час проходження хвилі тиску через трубопровід (t_2);
- заповнення мертвого об'єму циліндра до тиску зрушення (t_3);
- переміщення поршня з певною швидкістю (усталеною або змінною, але відомим законом зміни) (t_4);
- зростання тиску в камері до рівня магістального (для контролю за тиском до встановленого значення або тиску налаштування реле) (t_5).

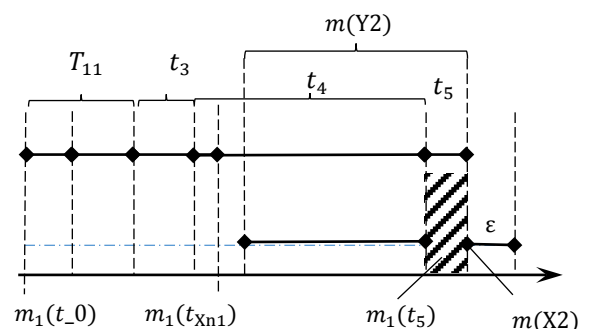


Рис. 2. Схема часових проміжків і міток для розрахунку моменту спрацювання команди Y2

Більшість часових показників напряму пов'язані з конфігурацією системи та чутливі до впливу зовнішнього середовища і енергетичних показників

системи живлення і можуть змінюватись впродовж циклічної роботи системи та відрізнятись в окремо взятих одиничних спрацюваннях. Якщо розглядати окремі спрацювання приводів і проаналізувати фактори, що впливають на динаміку їх роботи, то можна зробити висновок, що в кожному окремому спрацюванні приводів, вони працюють в ustalених умовах відносно зовнішніх факторів впливу, а динаміка внутрішніх процесів є подібною [16–19].

З огляду на це можна сказати, що сумарний час 1-ї ділянки спрацювання пневматичного приводу можна представити у вигляді функції від магістрального тиску:

$$T_{11} = t_1 + t_2 + t_3;$$

$$t_1 = [t_{\min}; t_{\max}];$$

$$t_2 = l/c,$$

де $[t_{\min}; t_{\max}]$ – час спрацювання електромагнітного клапану керування;

l – довжина лінії підводу;

c – швидкість проходження хвилі тиску,

$$t_3 = A \cdot \left(\frac{2\tau_1}{p_m} + \frac{\tau_2}{p_m \sqrt{\beta - \beta^2}} \right),$$

$$\text{для: } 0,52 \leq \beta < 1; \quad \frac{\tau_1}{t_3} + \frac{\tau_2}{t_3} = 1,$$

де p_m – магістральний тиск в системі;

A – коефіцієнт, який враховує характеристики лінії підводу повітря;

τ_1 і τ_2 – вагові коефіцієнти, які враховують відносний час витрати в робочу камеру при критичному і підкритичному режимах;

β – середнє інтегральне значення відношення магістрального і робочого тисків для камери циліндра.

Час між моментом подачі команди $Y1 \{m_1(t_0)\}$ і зникненням сигналу датчика $Xn1 \{m_1(t_{3-4})\}$ дає змогу оцінити значення часу прямого ходу (t_4):

$$t_4 = [m_1(t_{3-4}) - m_1(t_0) - T_1] \frac{S}{l_{Xn1}},$$

де S – повний ход циліндру;

l_{Xn1} – довжина ділянки від початкової координати циліндра до зникнення сигналу на датчику початкового стану $Xn1$.

Складава $\frac{S}{l_{Xn1}}$ відображає відношення часу

повного ходу до часу переміщення поршня з початкової координати до положення, що відповідає зникненню сигналу $Xn1 \{m_1(t_{Xn1})\}$.

За наявності в системі датчика тиску на магістралі кількість ітерацій розрахунку (підбору) моментів часу подачі керуючої команди $Y2$ може бути зменшено.

За значенням $m(t_4)$ для 1-го приводу і, враховуючи різницю між конструктивними параметрами, розраховується момент часу

спрацювання другого приводу:

$$m_2(t_0) = m(t_4) - T_{21} + \varepsilon$$

за умовою:

$$\varepsilon > m_1(t_5) - (m_1(t_{3-4}) + t_4),$$

де T_{21} – сумарний час перемикання розподільника, проходження хвилі тиску і зростання тиску в робочій камері другого циліндра до тиску зрушення.

Наведені розрахунки необхідно адаптувати в програмний код керування системою приводів, а часові показники для проведення розрахунку збираються в процесі роботи приводів. Тобто, передбачається кілька спрацювань системи в режимі без корегування моменту подачі команди $Y2$, в цей час отримані часові мітки появи сигналів фіксуються в контролері та порівнюються з розрахунковими значеннями.

Алгоритм підбору моменту подачі команди $Y2$ може реалізовуватись у випадку, коли час прямого ходу 2-го циліндру менший, ніж час 1-го (рис. 3): $S_2/v_2 < S_1/v_1$, що можливо в ситуаціях:

- 1) $S_1 = S_2$ & $v_1 < v_2$;
- 2) $S_1 > S_2$ & $v_1 = v_2$;
- 3) $S_1 > S_2$ & $v_1 < v_2$.

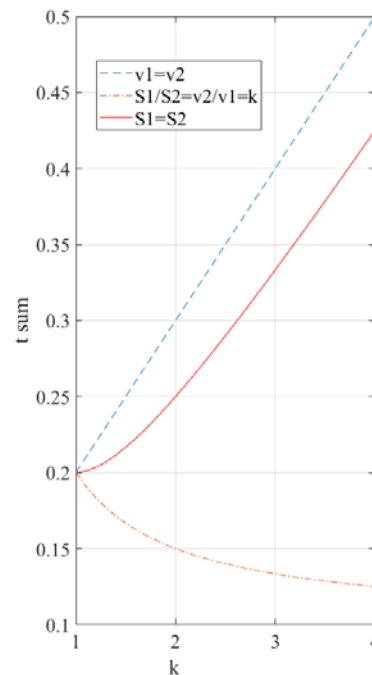


Рис. 3. Порівняння впливу відношення між величиною переміщень і швидкостями приводів

За умов, коли $S_2/v_2 \geq S_1/v_1$, логічно застосувати фіксований часовий зсув подачі команди $Y2$ ($S_2/v_2 = S_1/v_1$) або одночасну подачу сигналів $Y1$ та $Y2$.

Застосування алгоритму для визначення часу затримки команди $Y2$ в задачі забезпечення заданого часу виконання операцій може здійснюватися для всіх співвідношень швидкості і ходів приводів.

При одночасному переміщенні 1-го і 2-го приводів з єдиним джерелом живлення може відбуватися падіння магістрального тиску до певної межі, що

зменшити швидкості переміщення обох приводів та вплине на час загальної роботи. З іншого боку, паралельна робота двох приводів призводить до збільшення споживаної потужності. Тому, необхідно провести оцінку енергоефективності відповідно кількості проведених операцій до затраченої енергії при одночасній роботі двох циліндрів і послідовній.

За попередньою оцінкою, час виконання операцій в сегменті «... -1-2-n1, n2- ...» має тенденцію найбільшого зростання із збільшенням відношення робочих ходів циліндрів при сталих швидкостях переміщень (рис. 3). Тоді як, поступове збільшення загального відношення $S_1 > S_2$ & $v_1 < v_2$ зменшує вплив часу виконання операції 2-м циліндром на загальний час в сегменті. Вважаємо, що прямий і зворотній хід циліндрів відбувається з однаковою швидкістю, тобто час необхідний на прямий хід складає 50 % від загального часу.

Порівняння відношень між величиною переміщень приводів та швидкостями також дає можливість оцінити відносно скорочення часу виконання операцій в сегменті при успішних спробах подачі команди Y2.

За мінімальної різниці ($\varepsilon \rightarrow 0$) між появою сигналів P1 = "1" та X2 = "1", при цьому черга появи сигналів збігається з їх появою у технологічному циклі (успішна спроба) – ефективність скорочення часу, який відведено на виконання сегменту скорочується відповідно до співвідношення величин переміщень приводів та їх швидкостей (рис. 4). При цьому найбільший ефект досягається при малих коефіцієнтах відношень – незначних відхиленнях в швидкостях і переміщеннях приводів. За умов значних значень ходу 1-го циліндра, в порівнянні з 2-м ефективність скорочення часу зменшується.

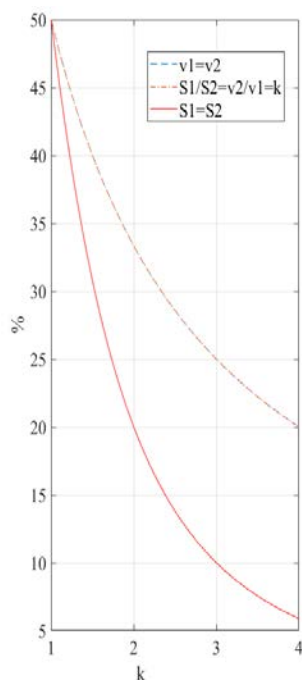


Рис. 4. Скорочення часу спрацювання виділеного сегменту в залежності від відношення між величиною переміщень і швидкостями приводів

Забезпечення надійності правильного спрацювання алгоритму керування покладається на модель напрацювання умовного рефлексу в системі. Визначення коефіцієнтів і підбір їх числових значень проводиться в частині програми керування і корегується відповідно до значень коефіцієнтів вдалих і невдалих спроб.

Висновки. За результатами проведеного аналізу встановлено, що можливо скорочення технологічного циклу, за рахунок введення в програму керування за часом. Встановлено можливість прогнозування часу спрацювання приводів в сегменті на основі часових показників на початку руху 1-го привода.

Наведено критерій, відповідно якого можна приймати рішення щодо застосування алгоритму, з точки зору задачі скорочення часу виконання операцій. Однак, він не є достатньо повним для прийняття рішень, щодо ефективності застосування алгоритму в цілому.

Список літератури

1. Плоткін Я. Д., Янушкевич О. К. *Організація і планування виробництва на машинобудівному підприємстві*. Львів: Світ, 1996. 350 с.
2. Bauernhansl T., Hoppel M., Vogel-Heuser B. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. 648 p.
3. Tolio T., Ceglarek D., ElMaraghy H. A., Fischer A., Hu S. J., Laperriere L., Newman S. T., Vañca J. SPECIES – Co-evolution of products, processes and production systems. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2010. Vol. 59, iss. 2. P. 672–693. doi: 10.1016/j.cirp.2010.05.008
4. Козлов Л. Г. Застосування нейромережі для зменшення часу регулювання в мехатронній гідросистемі. *Вісник Сумського державного університету. Сер.: Технічні науки*. Суми: СумДУ. 2013. № 4. С. 165–174.
5. Wozniak A., Jankowski M. Variable speed compensation method of errors of probes for CNC machine tools. *Precision Engineering*. 2017. Vol. 49. P. 316–321.
6. Demetgul M., Tansel I. N., Taskin S. Fault diagnosis of pneumatic systems with artificial neural network algorithms. *Expert Systems with Applications*. 2009. Vol. 36, iss. 7. P. 10512–10519.
7. Addad B., Amari S., Lesage J. J. Linear Time-Varying (Max,+) Representation of Conflicting Timed Event Graphs. *IFAC Proceedings Volumes*. 2010. Vol. 43, iss. 12. P. 300–305. doi: 10.3182/20100830-3-DE-4013.00050
8. Pham M.T., Teo T. J., Yeo S. H. Corrigendum to "Synthesis of multiple degrees-of-freedom spatial-motion compliant parallel mechanisms with desired stiffness and dynamics characteristics" [*Precision Engineering*. 2017. Vol. 47. P. 131–139]. *Precision Engineering*. 2017. Vol. 49. P. 493.
9. Губарев О. П., Ганпанцурова О. С. Адаптація логіки керування пневматичним виконавчим модулем мехатронної системи. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2016. No. 41 (1213). P. 32–38.
10. Ганпанцурова О. С., Губарев О. П. Логіко-інерційна складова команд керування виконавчим модулем мехатронної системи. *АС ППГ «Промислова гідравліка і пневматика». Тези доповідей XVII міжнародної науково-технічної конференції (19 жовтня 2016 р., Харків)*. Харків, 2016. 72 с.
11. Gubarev A., Yakhno O., Ganpanturova O. Control algorithms in mechatronic systems with parallel processes. *Solid State Phenomena*. 2010. Vol. 164. P. 105–110. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.164.105
12. Wang Y., Cho H. K., Liao H., Nazeem A., Kelly T. P., Lafortune S., Mahlke S., Reveliotis S. A. Supervisory Control of Software Execution for Failure Avoidance: Experience from the Gadara Project. *IFAC Proceedings Volumes*. 2010. Vol. 43, iss. 12. P. 259–266. doi: 10.3182/20100830-3-DE-4013.00044

13. Zhang Y., Bérard B., Kordon F., Thierry-Mieg Y. Automated Controllability and Synthesis with Hierarchical Set Decision Diagrams. *IFAC Proceedings Volumes*. 2010. Vol. 43, iss. 12. P. 281–286. doi: 10.3182/20100830-3-DE-4013.00047
14. Аврунин Г. А., Грицай И. В., Кириченко И. Г., Мороз И. И., Щербак О. В. Объемный гидропривод и гидропневмоавтоматика. Харьков: ХНАДУ, 2008. 412 с.
15. Черкашенко М. В. Гидропневмоавтоматика. Харьков: Гидроэлект, 2002. 75 с.
16. Черкашенко М. В. Автоматизация проектирования систем гидро- и пневмоприводов с дискретным управлением. Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. 210 с.
17. Козлов Л. Г., Лозовський С. М., Козлов С. Л. Гідропривод з пропорційним регулюванням швидкості паралельно підключених гідроциліндрів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2010. № 3. С. 38–43.
18. Saravanakumar D., Mohan B., Muthuramalingam T. A review on recent research trends in servo pneumatic positioning systems. *Precision Engineering*. 2017. Vol. 49. P. 481–492.
19. Фінкельштейн З. Л., Андренко П. М., Дмитрієнко О. В. Експлуатація, обслуговування та надійність гідравлических машин і гідроприводів. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. 308 с.
20. Zhou Z., Dou Y., Sun J., Jiang J., Tan Y. Sustainable Production Line Evaluation Based on Evidential Reasoning. *Sustainability, MDPI, Open Access Journal*. 2017. Vol. 9 (10). P. 1–14.

References (transliterated)

1. Plotkin Ya. D., Yanushkevych O. K. *Orhanizatsiya i planuvannya vyrobnytstva na mashynobudivnomu pidpryemstvi* [Organization and planning of production at a machine-building enterprise]. Lviv, Svit Publ., 1996. 350 p.
2. Bauernhansl T., Hoppel M., Vogel-Heuser B. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Springer Fachmedien Wiesbaden Publ., 2014. 648 p.
3. Tolio T., Ceglarek D., ElMaraghy H. A., Fischer A., Hu S. J., Laperrie're L., Newman S. T., Va'nca J. SPECIES – Co-evolution of products, processes and production systems. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2010, vol. 59, issue 2, pp. 672–693. doi: 10.1016/j.cirp.2010.05.008
4. Kozlov L. H. Zastosuvannya neyromerezhi dlya zmenshennya chasu rehulyuvannya v mekhatronniy hidrosystemi [Application of a neural network for reduction of time of regulation in a mechatronic hydraulic system]. *Visnyk Sums'koho derzhavnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky* [Sumy State University Bulletin: Technical Sciences Series]. Sumy, SumDU Publ., 2013, no. 4, pp. 165–174.
5. Wozniak A., Jankowski M. Variable speed compensation method of errors of probes for CNC machine tools. *Precision Engineering*. 2017, vol. 49, pp. 316–321.
6. Demetgul M., Tansel I. N., Taskin S. Fault diagnosis of pneumatic systems with artificial neural network algorithms. *Expert Systems with Applications*. 2009, vol. 36, issue 7, pp. 10512–10519.
7. Addad B., Amari S., Lesage J. J. Linear Time-Varying (Max,+) Representation of Conflicting Timed Event Graphs. *IFAC Proceedings Volumes*. 2010, vol. 43, issue 12, pp. 300–305. doi: 10.3182/20100830-3-DE-4013.00050
8. Pham M. T., Teo T. J., Yeo S. H. Corrigendum to "Synthesis of multiple degrees-of-freedom spatial-motion compliant parallel mechanisms with desired stiffness and dynamics characteristics" [*Precision Engineering*, 2017, vol. 47, pp. 131–139]. *Precision Engineering*. 2017, vol. 49, p. 493.
9. Hubarev O. P., Hanpanturova O. S. Adaptatsiya lohiky keruvannya pnevmatychnym vykonavchym modulem mekhatronnoyi systemy [Adaptation of control logic of pneumatic executive module of mechatronic system]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 41 (1213), pp. 32–38.
10. Hanpanturova O. S., Hubarev O. P. Lohiko-inertsiyna skladova komand keruvannya vykonavchym modulem mekhatronnoyi systemy [Logic-inertial component of control commands of the executive module of the mechatronic system]. *AS PHP "Promyslova hidravlika i pnevmatyka". Tezy dopovidey XVII mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi (19 zhovtnya 2016 r., Kharkiv)* [AS of IHP "Industrial hydraulics and pneumatics". Abstracts of the XVII Int. Sci.-Techn. Conf. (19 October 2016, Kharkiv)]. Kharkiv, 2016, 72 p.
11. Gubarev A., Yakhno O., Ganpanturova O. Control algorithms in mechatronic systems with parallel processes. *Solid State Phenomena*. 2010, vol. 164, pp. 105–110. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.164.105
12. Wang Y., Cho H. K., Liao H., Nazeem A., Kelly T. P., Lafortune S., Mahlke S., Reveliotis S. A. Supervisory Control of Software Execution for Failure Avoidance: Experience from the Gadara Project. *IFAC Proceedings Volumes*. 2010, vol. 43, issue 12, pp. 259–266. doi: 10.3182/20100830-3-DE-4013.00044
13. Zhang Y., Bérard B., Kordon F., Thierry-Mieg Y. Automated Controllability and Synthesis with Hierarchical Set Decision Diagrams. *IFAC Proceedings Volumes*. 2010, vol. 43, issue 12, pp. 281–286. doi: 10.3182/20100830-3-DE-4013.00047
14. Аврунин Г. А., Грицай И. В., Кириченко И. Г., Мороз И. И., Щербак О. В. Об'ємний гідропривод і гідро-пневмоавтоматика [Volumetric hydraulic drive and hydropneumatic automation]. Kharkov, KhNADU Publ., 2008. 412 p.
15. Черкашенко М. В. Гідро-пневмоавтоматика [Hydropneumoautomatiks]. Kharkov, Hidroelek Publ., 2002. 75 p.
16. Черкашенко М. В. Автоматизація проектування систем гідро- і пневмоприводів з дискретним управлінням [Automation of design of systems of hydraulic and pneumatic drives with discrete control]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2007. 210 p.
17. Козлов Л. Г., Лозовський С. М., Козлов С. Л. Гідропривод з пропорційним регулюванням швидкості паралельно підключених гідроциліндрів [Hydraulic drive with proportional speed control of parallel connected hydraulic cylinders]. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu* [Herald of Khmelnytskyi national university]. 2010, no. 3, pp. 38–43.
18. Saravanakumar D., Mohan B., Muthuramalingam T. A review on recent research trends in servo pneumatic positioning systems. *Precision Engineering*. 2017, vol. 49, pp. 481–492.
19. Фінкельштейн З. Л., Андренко П. М., Дмитрієнко О. В. Експлуатація, обслуговування та надійність гідравлических машин і гідроприводів [Operation, maintenance and reliability of hydraulic machines and hydraulic drives]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2014. 308 p.
20. Zhou Z., Dou Y., Sun J., Jiang J., Tan Y. Sustainable Production Line Evaluation Based on Evidential Reasoning. *Sustainability, MDPI, Open Access Journal*. 2017, vol. 9 (10), pp. 1–14.

Надійшла (received) 09.11.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Беліков Костянтин Олександрович (Беликов Константин Александрович, Belikov Kostiantyn) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», старший викладач кафедри «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5789-9235>; e-mail: belikovka@gmail.com

Губарев Олександр Павлович (Губарев Александр Павлович, Gubarev Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», професор кафедри «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0924-4103>; e-mail: gubarev@i.ua