

Jarosław SMOCZEK¹
Janusz SZPYTKO²

ZASTOSOWANIE INTELIGENTNYCH METOD OBLICZENIOWYCH W SYSTEMACH STEROWANIA I NADZOROWANIA SUWNIC

Rozwój zautomatyzowanych systemów transportu technologicznego zdeterminowany jest rosnącymi oczekiwaniami i wymaganiami stawianymi już nie tylko systemom sterowania, ale też systemom diagnostycznym i nadzorowania stanu eksploatacyjnego urządzeń. Wymaga to implementacji w tych układach coraz bardziej wyrafinowanych metod, w tym technik opartych na tak zwanej sztucznej inteligencji. Artykuł przedstawia przegląd wybranych rozwiązań dotyczących systemów sterowania suwnic, planowania i harmonogramowania operacji transportowych oraz oceny gotowości urządzeń transportowych, opartych na logice rozmytej, sztucznych sieciach neuronowych oraz algorytmach ewolucyjnych.

INTELLIGENT CRANE CONTROL AND SUPERVISING SYSTEMS

Optimization of manufacturing cycle, defined as obtaining maximum effectiveness together with assurance of expected quality of product, is the main aim of automation of manufacturing and material handling process. The growing requirements for automated material handling systems leads to implement soft computing methods to the control, supervisory, monitoring and diagnostic systems. The paper is a survey of chosen methods of crane control systems, crane movement scheduling, as well as system equipments health monitoring based on the fuzzy logic, artificial neural network and evolutionary algorithms.

1. WSTĘP

Efektywność, wydajność i jakość procesu przemysłowego jest w istotnym stopniu efektem automatyzacji procesów realizowanych na wielu poziomach działania przedsiębiorstwa, od samego procesu technologicznego, aż po wyższe poziomy nadzorowania i zarządzania produkcją i przedsiębiorstwem. O ile na najniższym poziomie przedsiębiorstwa przemysłowego automatyzacja jest wynikiem zastosowania głównie robotyzacji oraz układów automatyki, rozumianych w sposób klasyczny jako zespół urządzeń wykonawczych, sterujących i pomiarowych wraz z obiektem sterowania, to na

¹Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30, tel. +48 12 617-31-04, e-mail: smoczek@agh.edu.pl

²Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30, tel. +48 12 617-31-03, e-mail: szpytko@agh.edu.pl

wyższych poziomach od nadrzędnego sterowania (oprogramowanie typu SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*) do nadzorowania produkcją i przedsiębiorstwem (systemy typu MES – *Manufacturing Executing Systems*, i ERP – *Enterprise Resource Planning*) automatyzacja procesów sterowania i wspomagania podejmowania decyzji realizowana jest prawie wyłącznie z użyciem systemów informatycznych.

Jednym z istotnych celów automatyzacji procesu przemysłowego jest optymalizacja cyklu produkcyjnego (rozumiana jako osiągnięcie maksymalnej wydajności przy zachowaniu oczekiwanej jakości produktu), która wymusza zintegrowanie operacji technologicznych i działań pomocniczych, takich jak operacje transportowe. Rolą nowoczesnych systemów automatyki nie jest jedynie realizacja czynności związanych z samym sterowaniem, pomiarem wielkości charakteryzujących dany proces oraz przetwarzaniem i wymianą informacji, ale także czynności związanych z diagnostyką, oceną niezawodności, bezpieczeństwa i gotowości, których automatyzacja prowadzi do skrócenia czasu przestoju związanych z pracami konserwacyjnymi i usunięciem awarii oraz poprawy obsługiwalności. Cele te realizowane są częściowo na poziomie sterowania bezpośredniego i głównie przez komputerowe systemy sterowania nadrzędnego. Coraz częściej też, zarówno w systemach sterowania bezpośredniego i nadrzędnego, stosowane są metody oparte na sztucznej inteligencji. Logika rozmyta, sztuczne sieci neuronowe oraz algorytmy ewolucyjne wykorzystuje się z jednej strony w systemach automatycznego sterowania w celu realizacji odpornych i adaptacyjnych układów sterowania, jak również do celów diagnostycznych jak i w systemach wspomagania procesów decyzyjnych.

Przedmiotem artykułu jest przegląd rozwiązań opartych na sztucznej inteligencji, ukierunkowanych na rozwój zautomatyzowanych systemów sterowania bezpośredniego i nadrzędnego transportu wewnętrznego. Uwaga skupiona została w szczególności na rozwiązaniach dotyczących suwnic, których automatyzacja związana jest z koniecznością zastosowania adaptacyjnych technik sterowania uwzględniających złożoność zjawisk zachodzących w obiekcie sterowania jak i rozwiązań w zakresie optymalizacji trajektorii ładunku, planowania operacji transportowych z uwzględnieniem mapy przestrzeni roboczej systemu transportowego. W opracowaniu przedstawiono także własne rozwiązania dotyczące problematyki sterowania mechanizmami ruchu suwnic pomostowych oraz prognozowania czasu awarii elementów systemu transportu bliskiego, w których zastosowano metody oparte na sztucznej inteligencji.

2. KONWENCJONALNE PODEJŚCIE DO PROBLEMU STEROWANIA MECHANIZMAMI RUCHU SUWNIC

Problem automatyzacji operacji transportowych realizowanych w systemach transportu wewnętrznego przez suwnice najczęściej sprowadzany jest do poszukiwania odpornych i adaptacyjnych rozwiązań układów sterowania, których celem jest pozycjonowanie ładunku przemieszczanego przez mechanizmy ruchu suwnicy, co wiąże się z koniecznością tłumienia wahań ładunku wywołanych stanami nieustalonymi pracy urządzenia. Rozwiązania aplikacyjne dotyczące tego problemu oparte są głównie na otwartych systemach sterowania, bez sprzężenia zwrotnego od sygnału kąta wychylenia ładunku. Wśród rozwiązań aplikacyjnych systemów tłumienia wahań ładunku, proponowanych przez firmy i koncerny zagraniczne, które znalazły zastosowanie w przemyśle, należy wymienić rozwiązania działające przeważnie w otwartych, kompensacyjnych systemach sterowania,

takie jak moduł ASLC (Anti Sway Load Control) opracowany przez koncern HETRONIC projektowany dla suwnic pomostowych i bramowych. Otwarty system sterowania (bez sprzężenia zwrotnego z układu pomiarowego kąta wychylenia ładunku) wspomaga proces sterowania realizowany przez operatora suwnicy poprzez redukcję wahań ładunku, realizowaną na podstawie informacji o wartości sygnału sterowania zadawanego przez operatora przetwarzaną przez system na czasy przyspieszeń i opóźnień przemienników częstotliwości zasilających silniki mechanizmów napędowych, z uwzględnieniem mierzonej wartości długości liny, na której zawieszony jest transportowany ładunek. System SmartCrane Anti-sway, jest natomiast aplikacją, w której tłumienie wahań ładunku realizowane jest poprzez precyzyjnie określone wzorce czasów przyspieszeń suwnicy. Podobnie rozwiązanie o nazwie DynAPilot koncernu Konecranes oparte jest na doborze przyspieszeń mechanizmów ruchu suwnicy na podstawie wysokości zblocha hakowego. W rozwiązaniu firmy Rima zastosowano układ hydrauliczny sterujący kołowrotami w celu tłumienia wychyleń ładunku.

Problem pozycjonowania ładunku przemieszczanego przez suwnice jest często poruszany w pracach naukowych z uwagi na interesujące z punktu widzenia automatyki zagadnienia związane z tłumieniem wahań ładunku i konieczność zastosowania adaptacyjnych rozwiązań uwzględniających zmianę parametrów obiektu regulacji, które są wynikiem zmian długości liny lub/i masy przemieszczanego przez suwnicę ładunku. W wielu pracach problem sterowania suwnicą i tłumienia wahań ładunku rozważany jest jako zagadnienie sterowania optymalnego, w którym optymalna trajektoria ładunku wyznaczana jest zazwyczaj w oparciu o minimalizację funkcji kąta wychylenia ładunku i jego pochodnych, lub energetycznego wskaźnika jakości [2, 3, 12]. Wiele rozwiązań opartych jest na rozważaniu nieliniowego systemu dynamiki suwnicy jako liniowego układu ze zmiennymi w czasie parametrami. Wśród proponowanych rozwiązań problemu tłumienia wychyleń ładunku przemieszczanego przez suwnicę można wyróżnić układy regulacji oparte na linearyzacji sprzężenia zwrotnego [4, 6, 7], regulatorach LQR [5, 20], czy też metodzie Lapunova [11], a także wyróżnić należy systemy odporne i adaptacyjnego sterowania realizowane poprzez zastosowanie metod lokowania biegunów oraz estymatorów stanu [20, 23, 24, 30]. W pracy [9] zaproponowany został układ regulacji odpornej z programową zmianą nastaw regulatorów realizowaną w następstwie zmiany punktu pracy układu regulacji. W pracy [14] dobór parametrów w układzie regulacji odpornej zrealizowany został w oparciu o metodę Ackermana. Układ sterowania z adaptacją pośrednią przedstawiony został w pracy [6], w której w systemie sterowania ruchem suwnicy zastosowana została linearyzacja sprzężenia zwrotnego oraz estymator parametrów modelu obiektu regulacji.

3. ZASTOSOWANIE SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W ADAPTACYJNYM SYSTEMIE STEROWANIA SUWNICĄ

Wśród niekonwencjonalnych metod sterowania ruchem suwnic należy wymienić szereg rozwiązań inteligentnych systemów sterowania opartych na logice rozmytej, sztucznych sieciach neuronowych, algorytmach ewolucyjnych oraz systemach hybrydowych będących kombinacjami powyższych metod obliczeniowych.

Logika rozmyta, a w szczególności regulatory oparte na wnioskowaniu typu Mamdani [5, 8, 16, 22, 26, 29], znalazły częste zastosowanie w systemach sterowania ruchem suwnic

z uwagi na możliwość ujęcia wiedzy heurystycznej o sterowanym obiekcie w postaci prostych reguł, implikacji przedstawiających strategię sterowania. Wadą regulatorów z wnioskowaniem Mamdaniego jest jednak brak jasnej metodyki budowy i syntezy regulatora oraz złożoność procesu wyostrzania, która powoduje trudności w implementacji na sterownikach przemysłowych.

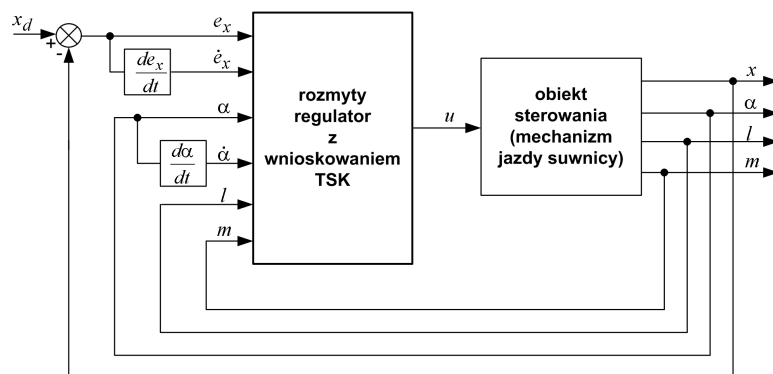
W pracy [26] regulator Mamdaniego został zastosowany w rozwiązaniu problemu sterowania optymalnego ruchem ładunku przemieszczanego przez suwnicę. Często proponowana kombinacja konwencjonalnych regulatorów proporcjonalno-różniczkujących (PD) stosowanych w regulacji pozycji suwnicy oraz regulatora Mamdaniego tłumiącego wychylenia ładunku przedstawiona została między innymi w pracy [8]. W pracy [5] porównane zostały rezultaty odpornej regulacji z zastosowaniem regulatora LQR oraz regulatora Mamdaniego, uzyskując lepsze wyniki w przypadku sterowania rozmytego.

Między innymi w pracach [18, 30, 31, 37, 38] w systemach sterowania suwnicą zaproponowano rozwiązania oparte na wnioskowaniu rozmytym typu Takagi-Sugeno-Kang (TSK). W pracy [18] przedstawiono układ odpornej regulacji z regulatorem TSK realizującym programową zmianę parametrów układu sterowania poprzez umieszczenie w następnikach funkcyjnych rozmytych implikacji zbioru regulatorów dobieranych na podstawie zmiennej wiodącej – długości liny, na której zawieszony jest ładunek.

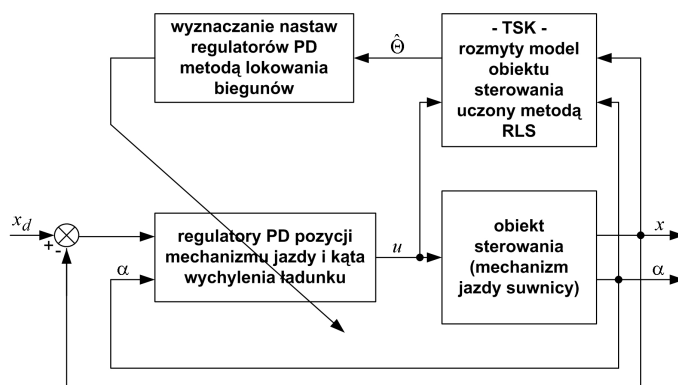
Rozwiązanie problemu sterowania ruchem suwnicy z zastosowaniem sieci neuronowych zostało przedstawione w pracach [1, 25, 27], w których w rezultacie badań symulacyjnych uzyskano system sterowania oparty na regulatorach pozycji suwnicy i kąta wychylenia ładunku, których nastawy obliczane przez samouczącą się sieć neuronową, trenowaną w sposób *on-line* z zastosowaniem algorytmu wstecznej propagacji błędów. Również kombinacje logiki rozmytej i sztucznych sieci neuronowych znalazły zastosowanie w pracach [15, 32] prezentujących rozwiązania systemów antywychyleniowych przemieszczanych przez mechanizmy ruchu suwnicy ładunków.

W pracy [30] przedstawione zostały między innymi propozycje odpornych i adaptacyjnych układów regulacji pozycji ładunku przemieszczanego przez mechanizmy jazdy suwnicy, oparte na systemach rozmytych z wnioskowaniem TSK. Przedstawiona została metodyka projektowania odpornego układu regulacji z regulatorem rozmytym typu TSK oparta na metodzie lokowania biegunów i optymalizacji zbioru reguł regulatora, który odpowiada minimalnemu zbiorowi punktów pracy układu regulacji. Rozmyty system TSK spełnia rolę regulatora z programową zmianą nastaw (*gain scheduling*) dokonywaną na podstawie zmiennych wiodących długości liny l i masy ładunku m (rys. 1). Mechanizm wnioskowania ma za zadanie aproksymację nastaw regulatora pomiędzy głównymi punktami pracy regulatora wyznaczonymi metodą lokowania biegunów.

W układzie regulacji z adaptacją pośrednią [30] zastosowany został rozmyty estymator parametrów modelu dynamiki suwnicy uczony rekurencyjną metodą najmniejszych kwadratów (RLS). Estymator parametrów $\hat{\Theta}$ modelu obiektu sterowania jest wyznaczany w czasie rzeczywistym przez system rozmyty TSK. Na podstawie estymatora parametrów modelu dostrajane są nastawy konwencjonalnych regulatorów PD zastosowanych w torach sprzężeń zwrotnych od sygnałów pozycji mechanizmu jazdy suwnicy i kąta wychylenia ładunku (rys. 2).



Rys. 1. Układ regulacji odpornej suwnicy z regulatorem rozmytym z wnioskowaniem TSK, gdzie: x_d, x - pozycja zadana i aktualna mechanizmu jazdy suwnicy, $\alpha, \dot{\alpha}$ - kąt wychylenia ładunku i jego prędkość, l - długość liny, m - masa ładunku, u - sygnał sterujący



Rys. 2. System sterowania suwnicą z pośrednią adaptacją z zastosowaniem rozmytego modelu TSK obiektu sterowania (mechanizm jazdy suwnicy) uczonego rekurencyjnym algorytmem najmniejszych kwadratów (RLS – recursive least squares) i metodą lokowania biegunów zastosowaną do dostrajania nastaw regulatorów PD na podstawie estymatora parametrów modelu $\hat{\Theta}$

W pracy [13] przedstawiono rozwiązanie sterowania optymalnego suwnicą w dwuwymiarowej przestrzeni transportowej z zastosowaniem algorytmu genetycznego. Opis modelu obiektu sterowania przedstawiony w przestrzeni stanów posłużył do sformułowania pojedynczego rozwiązania problemu w postaci chromosomu złożonego z sześciu zmiennych stanu. W algorytmie zastosowano selekcję turniejową na podstawie kosztów przejścia do stanu końcowego w zadanym okresie czasu oraz kombinację operacji krzyżowania i mutacji opartą na krzyżowaniu uśredniającym, w którym krzyżowane są dwa geny na tych samych pozycjach chromosomów rodziców oraz wymieniane dwa sąsiadujące

z genami krzyżowanymi, w efekcie otrzymując dwóch nowych potomków (nowe potencjalne rozwiązania problemu).

Problem sterowania suwnicą został rozwiązany w pracy [28] z zastosowaniem regulatora w postaci sztucznej sieci neuronowej uczonej poprzez klasyczny algorytm genetyczny, w którym zastosowano kodowanie binarne, jednopunktowe krzyżowanie, sekcję metodą koła ruletki oraz warunek zakończenia algorytmu w postaci określonej liczby iteracji. W artykule [10] przedstawiono niekonwencjonalne rozwiązanie algorytmu regulacji kąta wychylenia ładunku testowane na modelu suwnicy będącej stanowiskiem laboratoryjnym. Algorytm został przedstawiony w postaci prostych instrukcji warunkowych, w których kierunek ruchu mechanizmu jazdy suwnicy uzależniony jest od wartości progowych kąta wychylenia i jego prędkości. Osobno sformułowane są reguły dla przypadku narastania wartości kąta wychylenia i jego tłumienia, opracowane na podstawie wiedzy heurystycznej o obiekcie sterowania. Wartości progowe w algorytmie sterowania poddane zostały optymalizacji z zastosowaniem algorytmu genetycznego, w którym zastosowano kodowanie liczbami rzeczywistymi, krzyżowanie arytmetyczne, mutacje równomierną i nierównomierną przeprowadzane na populacji 40 osobników oraz sekcję elitarną.

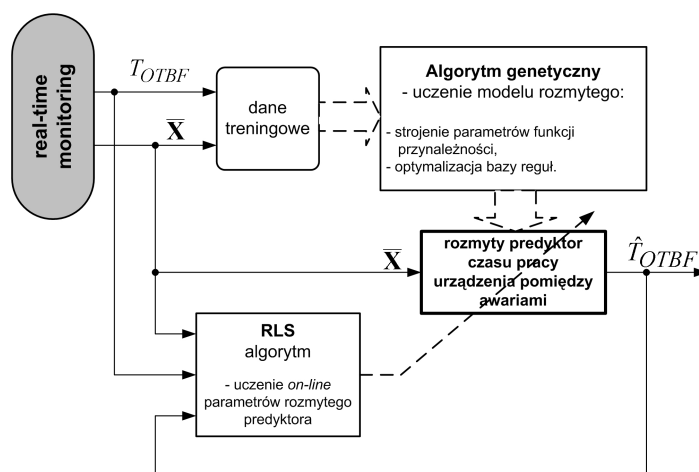
4. ZASTOSOWANIE INTELIGENTNYCH METOD W PLANOWANIU ZADAŃ I DIAGNOSTYCE URZĄDZEŃ TRANSPORTOWYCH

Planowanie operacji transportowych wykonywanych przez urządzenia transportu bliskiego we wspólnej przestrzeni roboczej z uwzględnieniem ich alokacji, kolizyjności trajektorii przemieszczających się urządzeń, czy też przeszkód znajdujących się w przestrzeni transportowej, jest złożonym problemem optymalizacyjnym. Optymalizacja operacji transportowych wykonywanych przez n dźwignic pracujących w terminalach przeładunkowych ma istotne znaczenie dla czasu załadunku i rozładunku środków transportu morskiego czy kolejowego. Zastosowanie inteligentnych technik w systemach sterowania nadrzędnego, a w szczególności algorytmów ewolucyjnych pozwala znacznie skrócić czas poszukiwania optymalnych lub bliskich optymalnym rozwiązań tych problemu. Przykłady rozwiązań powyższego problemu przedstawione zostały między innymi w pracach [17, 21, 36].

W pracy [17] dla problemu optymalizacji harmonogramu zadań dla suwnic pracujących w terminalu przeładunkowym zastosowano klasyczny algorytm genetyczny z kodowaniem permutacyjnym chromosomu reprezentującego rozwiązanie harmonogramu wypełniania kolejnych wolnych slotów kontenerami transportowanymi przez suwnice, z uwzględnieniem warunku niekolizyjności ich ruchu. Jako funkcję celu zdefiniowano sumę czasów wypełnienia wszystkich slotów kontenerami.

W pracy [21] zastosowano algorytm genetyczny w problemie optymalizacji planowania zadań systemu transportowego złożonego z suwnic odlewniczych. Postawiony problem polegał na optymalizacji harmonogramu określonego zbioru operacji wykonanych w określonym czasie przez trzy suwnice odlewnicze pracujące we wspólnej przestrzeni transportowej. Pojedynczy osobnik populacji zawierał zakodowaną informację zawierającą przydział określonych zadań dla poszczególnych suwnic, kolejność operacji transportowych, oraz operacje realizowane przez daną suwnicę w celu uniknięcia kolizji z pozostałymi suwnicami wykonującymi w tym czasie zadanie transportowe. Zastosowano

konwencjonalny algorytm genetyczny z selekcją metodą koła ruletki na podstawie kryterium, sformułowanego jako czas realizacji określonego zbioru operacji transportowych. Dla symulacji przeprowadzonych dla zbioru 60 operacji, dla których zdefiniowano pojedynczego osobnika w postaci chromosomu o 120 genach, oraz dla populacji złożonej z 64 osobników uzyskano czas trwania iteracji 100ms. Warunek zakończenia algorytmu sformułowano w postaci założonej liczby iteracji.



Rys. 3. Schemat procesu uczenia rozmytego modelu predykcji czasu wystąpienia awarii urządzenia, z zastosowaniem algorytmu genetycznego i rekurencyjnego algorytmu najmniejszych kwadratów

Techniki sztucznej inteligencji wykorzystywane są także w narzędziach diagnostycznych, między innymi do celów prognozowania czasu i identyfikacji przyczyn awarii, oceny gotowości i niezawodności urządzenia. W pracach [32, 33] przedstawiono rozmyty model prognozowania czasu pracy urządzenia lub jego elementów pomiędzy awariami \hat{T}_{OTBF} (Operating Time Between Failure) na podstawie wektora zmian parametrów eksploatacyjnych urządzenia \bar{X} w okresie czasu od ostatniej awarii do aktualnej chwili. Rozmyty model uczony jest w dwóch etapach *off-line*, a następnie *on-line* (rys. 3). W pierwszym etapie monitorowania procesu zbierane są dane dotyczące historii awarii zachodzących w systemie: czasy pracy pomiędzy awariami (OTBF) oraz zmiany zmiennych $\bar{X} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n]$ określających warunki eksploatacyjne procesu. Dane treningowe są następnie użyte w procesie uczenia modelu rozmytego z zastosowaniem algorytmu genetycznego i metody Pittsburgh'a. Pojedyncze rozwiązanie problemu jest przedstawione w postaci wektora, którego elementami są liczby rzeczywiste odpowiadające parametrom poprzedników i następników rozmytych implikacji typu TSK. Przy czym długość chromosomu jest zmienna, zależnie od ilości zmiennych wejściowych systemu rozmytego, liczby funkcji przynależności zdefiniowanych dla danego wejścia oraz liczby implikacji (rozmytych reguł jeżeli-to) w bazie wiedzy, które to parametry optymalizowane są poprzez zmodyfikowane metody krzyżowania uśredniającego i mutacji niejednorodnej

oraz z zastosowaniem selekcji turniejowej realizowanej na podstawie funkcji celu określonej przez wariancję błędu względnego, kompatybilności danych uczących z funkcjami przynależności oraz liczby reguł w bazie wiedzy. Uzyskany model rozmyty jest następnie uczony *on-line* z zastosowaniem rekurencyjnego algorytmu najmniejszych kwadratów (RLS), na podstawie danych dostarczanych z monitorowanego procesu w chwili pojawienia się następnej awarii. System rozmyty zrealizowany został jako jedno z narzędzi programowych nadrzędnego systemu sterowania i monitorowania gotowości zautomatyzowanego systemu transportu wewnętrznego. Celem systemu jest poprawa obsługiwalności procesu/urządzenia oraz wspomaganie procesu oceny gotowości systemu transportowego do wykonania zadań w ściśle określonych warunkach eksploatacyjnych.

5. WNIOSKI

Coraz wyższe wymagania stawiane zautomatyzowanym systemom transportu wewnętrznego odnośnie sterowania, poprawy eksploatacji i obsługiwalności wymusza poszukiwanie rozwiązań opartych na coraz bardziej wyrafinowanych narzędziach realizujących coraz bardziej złożone funkcje i zadania. Oczekiwania odnośnie szybkości i dokładność realizacji tych zadań coraz częściej spełniane są poprzez zastosowanie niekonwencjonalnych technik opartych na inteligentnych metodach obliczeniowych implementowanych na poziomie bezpośredniego jak i nadrzędnego sterowania.

W artykule przedstawiono przykłady rozwiązań problemów związanych ze sterowaniem, planowaniem i harmonogramowaniem operacji transportowych wykonywanych w systemach transportu wewnętrznego przez suwnice. Przedstawiono także przykład narzędzi umożliwiających monitorowanie gotowości systemu transportowego i prognozowania czasu awarii jego elementów. Rozwiązania te oparte zostały na logice rozmytej, sztucznych sieciach neuronowych i algorytmach ewolucyjnych oraz systemach hybrydowych będących kombinacją tych technik.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w roku 2011.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Acosta L., Méndez J.A., Torres S., Moreno L., Marichal G.N.: On the design and implementation of a neuromorphic self-tuning controller. *Neural Processing Letters* 9, 1999, s. 229–242.
- [2] Al.-Garni A.Z., Moustafa K.A.F., Nizami J.S.S.A.K.: Optimal control of overhead cranes. *Control Engineering Practice*, Vol. 3, No. 9, 1995, s. 1277-1284.
- [3] Auernig J.W., Troger H.: Time optimal control of overhead cranes with hoisting of the load. *Automatica*, Vol.23, No. 4, 1987, s. 437-447.
- [4] Bartolini G., Pisano A., Usai E.: Second-order sliding-mode control of container cranes. *Automatica* 38, 2002, s. 1783-1790.
- [5] Benhidjeb A., Gissinger G.L.: Fuzzy control of an overhead crane performance comparison with classic control. *Control Engineering Practice*, Vol. 3, No. 12, 1995, s. 1687-1696.

- [6] Boustany F., d'Andrea-Novel B: Adaptive control of an overhead crane using dynamic feedback linearization and estimation design. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France 1992, s. 1963-1968.
- [7] Cheng C.C., Chen C.Y.: Controller design for an overhead crane system with uncertainty. Control Engineering Practice, Vol. 4, No. 5, 1996, s. 645-653.
- [8] Cho S.K., Lee H.H.: A fuzzy-logic antishwing controller for three-dimensional overhead cranes. ISA Transactions 41, 2002, s. 235-243.
- [9] Corrigan G., Giua A., Usai G.: An implicit gain-scheduling controller for cranes. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 6 (1), 1998, s. 15-20.
- [10] Filipic B., Urbancic T., Krizman V.: A combined machine learning and genetic algorithm approach to controller design. Engineering Applications of Artificial Intelligence 12 (1999), pp. 401-409.
- [11] Giua A., Seatzu C. and Usai G.: Observer-controller design for cranes via Lyapunov equivalence. Automatica, Vol. 35, No 4, 1999, s. 669-678.
- [12] Hamalainen J.J., Marttinen A., Baharova L., Virkkunen J.: Optimal path planning for a trolley crane: fast and smooth transfer of load. IEE Proceedings D: Control Theory Applications, 142 (1), 1995, s. 51-57.
- [13] Henriksen S.J., Wang L., Goodwin G.C., Shook A.: Application of a genetic algorithm in crane movement scheduling. Proceedings of IFAC World Congress, Beijing, 1999.
- [14] Hicar M. and Ritok J.: Robust crane control. Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 3, No. 2, 2006, s. 91-101.
- [15] Ishide T., Uchida H., Miyakawa S.: Application of a fuzzy neural network in the automation of roof crane system. Proceedings of the 9th Fuzzy System Symposium, 1993, s. 29-32.
- [16] Itoh O., Migita H., Itoh J., Irie Y.: Application of fuzzy control to automatic crane operation. Proceedings of IECON 1, 1993, s. 161-164.
- [17] Javanshir H., Seyedalizadeh Ganji S. R.: Yard crane scheduling in port container terminals using genetic algorithm. International Journal of Industrial Engineering., 6 (11), pp. 39-50, 2010.
- [18] Kang Z., Fujii S., Zhou C., Ogata K.: Adaptive control of a planar gantry crane by the switching of controllers. Transactions of Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 35, No. 2, 1999, s. 253-261.
- [19] Kimiaghalam, B., Homaifar, A., Bikdash, M., Dozier, G.: Genetic algorithms solution for unconstrained optimal crane control, IEEE Congress on Evolutionary Computation, Washington DC, July 6-9, s. 2124-2230, 1999.
- [20] Lew J.Y. and Halder B.: Experimental study of anti-swing crane control for a varying load. Proceedings of American Control Conference, V. 2, 2003, s. 1434-1439.
- [21] Liang Y., Huang Y., Yang Y.: A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning. Computers & Industrial Engineering 56 (2009), pp. 1021-1028.
- [22] Mahfouf M., Kee C.H., Abbod M.F., Linkens D.A.: Fuzzy logic-based anti-sway control design for overhead cranes. Neural Computing and Applications, No. 9, 2000, s. 38-43.
- [23] Marttinen A.: Pole-placement control of a pilot gantry. Amer. Contr. Conf., ACC'89, Pittsburgh, PA, 1989.

- [24] Marttinen A., Virkkunen J., T.S. Riku: Control study with a pilot crane. *IEEE Transactions on Education*, Vol. 33, No. 3, 1990, s. 298-305.
- [25] Mendez J.A., Acosta L., Moreno L., Torres S., Marichal G.N.: An application of a neural self controller to an overhead crane. *Neural Computing and Applications* 8, 1999, s. 143-150.
- [26] Moon M.S., VanLandingham H.F., Beliveau Y.J.: Fuzzy time optimal control of crane load. *Proceedings of the 35th Conference on Decision and Control*, Kobe, Japan, 1996, s. 1127-1132.
- [27] Moreno L., Mendez J.A., Acosta L., Torres S., Hamilton A., Marichal G.N.: A self-tuning neuromorphic controller: application to the crane problem. *Control Engineering Practice* 6, 1998, s. 1475-1483.
- [28] Nakazono K., Ohnishi K., Kinjot H.: Load swing suppression in jib crane systems using a genetic algorithm-trained neuro-controller. *Proceedings of International Conference on Mechatronics*, Kumamoto Japan, 2007.
- [29] Nalley M., Trabia M.: Control of overhead crane using a fuzzy logic controller. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 8 (1), 2000, s. 1-18.
- [30] Smoczek J.: *Intelligent crane control systems*. Publishing House of Sustainable Technologies – National Research Institute, Library of Maintenance Problems Kraków-Radom 2010.
- [31] Smoczek J., Szpytko J.: A mechatronics approach in intelligent control systems of the overhead traveling cranes prototyping. *Information Technology and Control*, Vol. 37, No. 2, 2008, s. 154-158.
- [32] Smoczek J., Szpytko J.: Self-learning fuzzy predictor of exploitation system operating time. *Journal of KONES : powertrain and transport*, 2011 vol. 18 No. 4, s. 463–469.
- [33] Smoczek J., Szpytko J.: A genetic fuzzy approach to estimate operation time of transport device. *Journal of KONES : powertrain and transport*, 2011 vol. 18 No. 4 s. 601–608.
- [34] Szpytko J.: *Integrated decision making supporting the exploitation and control of transport devices*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2004.
- [35] Szpytko J.: *Kształtowanie procesu eksploatacji środków transportu bliskiego*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Kraków-Radom 2004.
- [36] Wang Y., Chen Y., Wang K.: A Case Study of Genetic Algorithms for Quay Crane Scheduling. *Studies in Computational Intelligence*, 2009, Volume 214/2009, pp. 119-125.
- [37] Yi J., Yubazaki N., Hirota K.: Anti-swing fuzzy control of overhead traveling crane. *Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 2002, s. 1298-1303.
- [38] Yi J., Yubazaki N., Hirota K.: Anti-swing and positioning control of overhead traveling crane. *Information Sciences* 155, 2003, s. 19-42.