

*optymalizacja wielokryterialna z ograniczeniami,
pozycyjny układ napędowy, silnik liniowy, tarcie*

Marcin JASTRZĘBSKI*
Piotr WOŹNIAK*

WIELOKRYTERIALNA OPTYMALIZACJA Z OGRANICZENIAM POZYCYJNEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO

W artykule przedstawiono zmodyfikowaną metodę ewolucyjnej wielokryterialnej syntezy regulatora pozycyjnego układu napędowego. Badania dotyczyły zwiększenia efektywności wybranej metody optymalizacji globalnej poprzez iteracyjne modyfikowanie dopuszczalnego obszaru w przestrzeni parametrów. W obliczeniach wykorzystano przeciwstawne kryteria całkowite ITAE i ISU oraz pomocnicze kryteria nadrzędne odwzorowujące ograniczenia narzucone na czas regulacji i przeregulowanie. Skuteczność metody potwierdzono symulacyjnie dla serwonapędu linowego z tarcie.

1. EWOLUCYJNA OPTYMALIZACJA WIELOKRYTERIALNA W PROJEKTOWANIU UKŁADÓW REGULACJI NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH

1.1. OPTYMALIZACJA WIELOKRYTERIALNA

Ze względu na liczne wymagania stawiane układom napędowym, w projektowaniu coraz częściej stosuje się algorytmy optymalizacyjne o wielu kryteriach [8], [9]. W przypadku kryteriów zgodnych możliwa jest ich agregacja [2]. W takim przypadku istnieje pojedyncze rozwiązanie optymalne w sensie zagregowanego kryterium. Dużo bardziej złożone są zadania z kryteriami przeciwstawnymi, gdzie nie istnieje pojedyncze rozwiązanie optymalne, lecz zbiór rozwiązań efektywnych w sensie Pareto [2], które powinny znajdować się dopuszczalnym obszarze parametrów.

* Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, e-mail: marcin.jastrzebski@p.lodz.pl, piotr.wozniak@p.lodz.pl

Definicja: Kryteria przeciwstawne

Dla dwóch kryteriów K_1 i K_2 określonych w obszarze D przestrzeni parametrów oraz dla dwóch dowolnych rozwiązań x_1 i x_2 kryteria są przeciwstawne jeśli zachodzi:

$$\forall_{x_1, x_2 \in D} K_1(x_1) \leq K_1(x_2) \Rightarrow K_2(x_1) \geq K_2(x_2) \quad (1)$$

W przypadku serwonapędu wymagana jest duża szybkość działania przy zachowaniu dużej dokładności. Są to kryteria przeciwstawne, dlatego do ich projektowania powinny być stosowane algorytmy optymalizacji wielokryterialnej [9]. W literaturze dominują metody globalne [2], podczas gdy w zastosowaniach technicznych poszukuje się efektywnego rozwiązania z obszaru rozwiązań dopuszczalnych określonych przez ograniczenia.

Przedmiotem tego artykułu jest nowa metoda uwzględnienia ograniczeń w optymalizacji wielokryterialnej układu sterowania pozycyjnego. Do badań wybrany został znany z literatury przedmiotu algorytm Pareto Archived Evolution Strategy (PAES) [6]. Jego charakterystykę przedstawiono w rozdz. 1.2.

1.2. ALGORYTM PARETO ARCHIVED EVOLUTION STRATEGY (PAES)

Knowles i Corne [6] zaproponowali ewolucyjną optymalizację wielokryterialną opartą na operatorze mutacji używanym w odniesieniu do pojedynczego rozwiązania-rodzica. W PAES zastosowano strategię poszukiwań lokalnych klasy (1 + 1) z wykorzystaniem archiwum rozwiązań niezdominowanych.

ALGORYTM PAES

W każdej k -tej iteracji jedno rozwiązanie-rodzic x_k generuje w wyniku mutacji jedno rozwiązanie potomne x_{k+1} które jest porównywane z x_k . Jeśli x_{k+1} dominuje x_k , to zastępuje ono x_k w archiwum rozwiązań niezdominowanych. W przeciwnym przypadku (tzn. jeśli x_k dominuje x_{k+1}), x_{k+1} jest pomijane i operacja mutacji jest powtarzana dla tego samego x_k . Jeśli x_{k+1} oraz x_k są nieporównywalne, wtedy x_{k+1} jest porównywane ze wszystkimi rozwiązaniami z archiwum. Jeśli którekolwiek z rozwiązań z tego archiwum dominuje x_{k+1} , to jest ono pomijane. Jeśli nie istnieje takie rozwiązanie dominujące, to do $(k + 1)$ -szej iteracji przechodzi to rozwiązanie, które znajduje się w mniej zatłoczonym fragmencie zbioru Pareto. Aby to rozstrzygnąć, konieczne jest badanie gęstości w otoczeniu obydwu rozwiązań, czyli x_k i x_{k+1} . Oryginalnie zaproponowane podejście polegało na zliczaniu liczby rozwiązań w prostokątnych, równych co do objętości n -wymiarowych wielościanach.

Istnieją różne warianty algorytmu PAES [2]. W jego adaptacyjnej wersji [7] wprowadzony został mechanizm zapobiegania sytuacji, w której rozwiązanie-rodzic przy kolejnych, nieefektywnych, mutacjach tworzy rozwiązania zdominowane.

W artykule zaproponowano modyfikacje metody, które pozwalają unikać wielokrotnego generowania nieefektywnych rozwiązań oraz pozwalają uwzględnić ograniczenia istotne dla rozpatrywanego zadania.

1.3. ALGORYTM PAES Z UWZGLĘDNIENIEM OGRANICZEŃ

W artykule zaproponowano dwa nowe kroki w algorytmie PAES :

- modyfikacja 1 – pozwala zidentyfikować i wymienić z archiwum rozwiązania, dla których rozwiązania potomne są w większości nieefektywne (zdominowane);
- modyfikacja 2 – pozwala zidentyfikować i ograniczyć rozwiązania-potomne, oceniane jako niedopuszczalne (np. prowadzące do awarii serwonapędu).

W modyfikacji 1, w przypadku niepowodzenia w utworzeniu niezdominowanego rozwiązania potomnego w ustalonej liczbie prób, następuje losowy wybór z archiwum innego rozwiązania-rodzica. Kryterium wyboru nowego rozwiązania-rodzica jest jego lokalizacja w znormalizowanej przestrzeni kryteriów o najmniejszym zagęszczeniu. Jako miarę gęstości wokół i -tego rozwiązania wykorzystano wskaźnik wykorzystywany w metodzie klasteryzacji subtraktywnej (*subtractive clustering*) [1]:

$$D_i = \sum_{j=1}^m \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{(r_a/2)^2}\right) \quad (2)$$

gdzie: r_a jest stałą określającą promień sąsiedztwa, x_j – sąsiednim rozwiązaniem.

W modyfikacji 2 wprowadzono tablicę ograniczeń stosując metodę cienia [4]. Tablica ma stały wymiar (parametr metody), a wartości wprowadzane są w trakcie optymalizacji. Następuje to w przypadku wystąpienia rozwiązania naruszającego ograniczenia, które są traktowane jako kryteria pomocnicze. Ich wartość nie wpływa na przebieg optymalizacji w inny sposób jak tylko poprzez eliminację niekorzystnych rozwiązań potomnych. W kolejnych iteracjach informacja z tablicy wykorzystywana jest do eliminacji x_{k+1} , w przypadku jeżeli leży on bliżej niż d (parametr metody) od elementu tablicy wcześniej oznaczonego jako znajdujący się w obszarze.

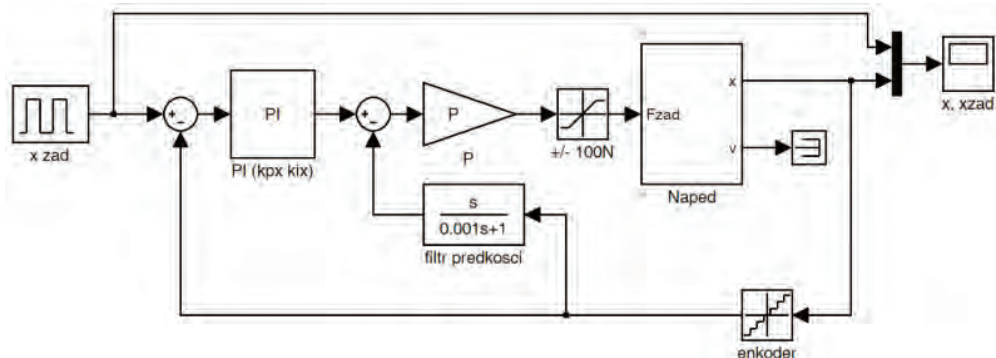
Jak wykazały badania przeprowadzone przez Autorów, zastosowanie modyfikacji korzystnie wpływa na efektywność algorytmu oraz jakość uzyskanych wyników przez:

- 1) przyspieszenie obliczeń dzięki zmniejszeniu liczby obliczeń (tu symulacji) kryteriów poprzez wczesne wykrywanie rozwiązań naruszających ograniczenia,
- 2) poprawienie zbieżności dzięki ograniczeniu obszaru dopuszczalnych parametrów,
- 3) eliminację rozwiązań w bezpośrednim otoczeniu obszaru zabronionego (nie bliżej niż d), co zwiększa odporność układu regulacji.

2. UKŁAD NAPĘDOWY Z SILNIKIEM LINIOWYM Z TARCIEM

Ogólny schemat napędu liniowego w którym zastosowano regulator PI z ograniczeniem części całkującej (anti-windup o strukturze z warunkowym całkowaniem [3])

przedstawiono na rys. 1. Sygnałem zadanym położenia jest przebieg skokowy o amplitudzie 0,2 [m] i okresie 2,0 [s].



Rys. 1. Schemat układu napędowego

W środowisku Matlab-Simulink zamodelowany został badany układ napędowy z silnikiem linowym o następujących parametrach:

- siła maksymalna $F_{\max} = 100$ [N], prędkość maksymalna 0,9 [m/s],
- masa $m = 7,04$ [kg], inercja układu regulacji siły ok. 1,0 [ms].

Wyznaczone eksperymentalnie [4], [5] parametry tarcia w modelu LuGre:

- tarcie lepkie $B = 50$ [Ns/m], $\sigma_1 = 100$ [Ns/m], $\sigma_0 = 2000$ [N/m],
- tarcie Coulomba $F_c = 15$ [N], prędkość Stribecka $v = 0,02$ [m/s],
- tarcie $F_s = 25$ [N].

3. OMÓWIENIE WYNIKÓW

Pierwszym krokiem programu badań było określenie dopuszczalnego obszaru D przestrzeni parametrów regulatora PI. Przyjęto $0 < k_p < 50$, $0 < k_i = 1/T_i < 20$.

Jako cel projektu przyjęto minimalizację dwóch całkowych wskaźników jakości:

J1 – ITAE (Integral Time-weighted Absolute Error),

J2 – ISU (Integral Squared Control).

Za kryteria pomocnicze (odwzorowujące ograniczenia) przyjęto:

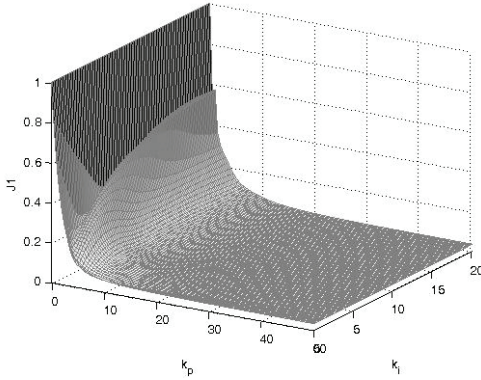
J3 – czas regulacji, który nie powinien przekraczać 0,5 [s],

J4 – przeregulowanie, które nie powinno przekraczać 0,25% (0,5 [mm]).

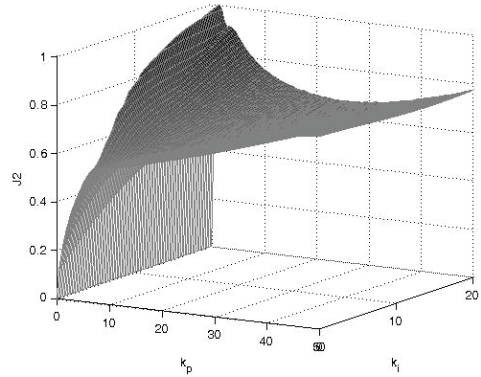
Nie są to kryteria zwiększające wymiarowość zadania optymalizacji, dlatego nie zwiększają nakładu obliczeniowego poszukiwań, a przeciwnie – pozwalają go zmniejszyć. Uzyskuje się to dzięki redukcji obszaru D.

3.1. WYNIKI BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI UKŁADU REGULACJI

W pierwszym etapie zbadano wzajemną relację pomiędzy J_1 oraz J_2 w obszarze D. Stwierdzono, że są to kryteria przeciwstawne. Potwierdzają to powierzchnie map kryteriów ITAE (rys. 2) oraz ISU (rys. 3).

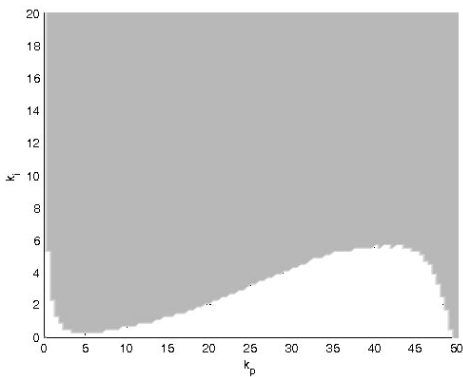


Rys. 2. Mapa kryterium ITAE nad obszarem $\{k_p, k_i\}$

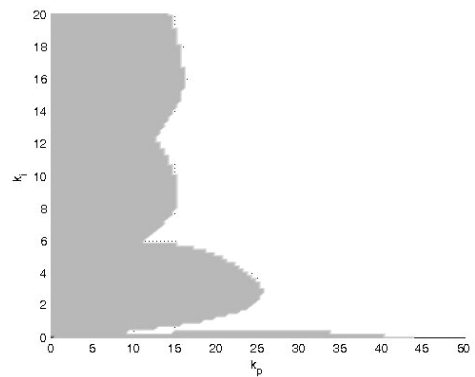


Rys. 3. Mapa kryterium ISU nad obszarem $\{k_p, k_i\}$

Kolejnym etapem badań było znalezienie cienia obszaru zabronionego opisanego kryteriami pomocniczymi. Porównanie uzyskanych wyników dla J_3 (rys. 4) oraz J_4 (rys. 5) można interpretować, że w części rozpatrywanego obszaru przestrzeni parametrów te kryteria mają przeciwstawny charakter.



Rys. 4. Cień obszaru zabronionego ze względu na ograniczenie J_3 (czas regulacji)

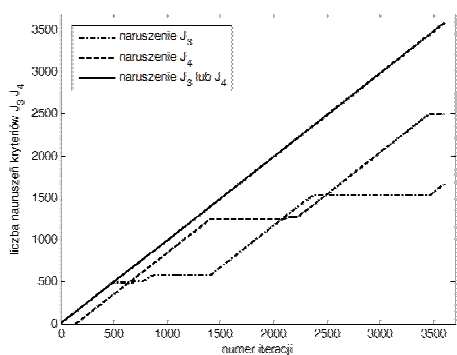


Rys. 5. Cień obszaru zabronionego ze względu na ograniczenie J_4 (przeregulowanie)

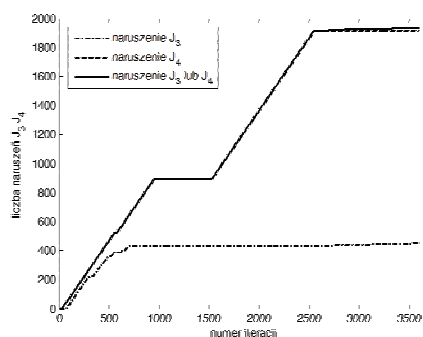
3.2. WYNIKI BADAŃ EWOLUCYJNEJ OPTIMALIZACJI WIELOKRYTERIALNEJ Z WYKORZYSTANIEM ZMODYFIKOWANEGO ALGORYTMU PAES

Dla potrzeb tej pracy przyjęto, że najłatwiejszym do rejestracji wskaźnikiem skuteczności iteracyjnego ograniczania dopuszczalnego obszaru D będzie liczba naruszeń ograniczeń: J_3 , J_4 oraz (J_3 lub J_4). Na rysunkach 6, 7 oraz 9 można obserwować malejącą liczbę naruszeń ograniczeń w czasie optymalizacji (przyjęto 3600 pokoleń – iteracji).

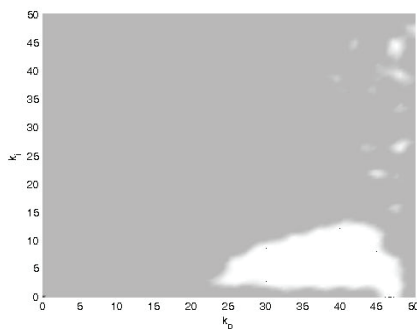
W dalszej części przedstawiono wyniki optymalizacji wielokryterialnej regulatora PI z iteracyjnym modyfikowaniem dopuszczalnej przestrzeni parametrów. Wynikowy obszar D przedstawiono na rys. 8. Widać, że jest on mniejszy od złożenia obszarów dla każdego z pomocniczych kryteriów z rys. 4 i 5.



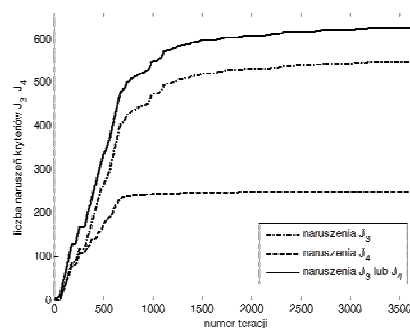
Rys. 6. Liczba naruszeń ograniczeń J_3 , J_4



Rys. 7. Liczba naruszeń ograniczeń J_3 , J_4



Rys. 8. Cień złożenia obszarów zabronionych ze względu na ograniczenia J_3 oraz J_4



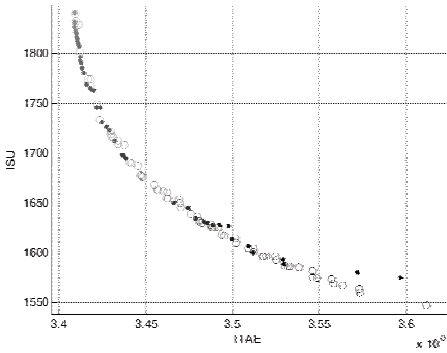
Rys. 9. Liczba naruszeń ograniczeń J_3 i J_4 dla cienia obszaru zabronionego z rys. 8

Front Pareto dla obszaru D z rys. 8 przedstawiono na rys. 10, a odpowiadający mu zbiór Pareto na rys. 11. Przed realizacją kolejnego kroku w syntezie regulatora PI, jakim mógłby być wybór pojedynczego rozwiązania ze zbioru Pareto przeprowadzono

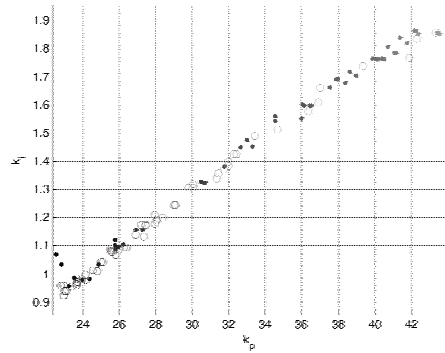
dotatkową oceną porównawczą. Ze zbioru Pareto wybrano dwa rozwiązania x_{J1} odpowiadające minimalnej wartości kryterium $J1$ oraz x_{J2} odpowiadające minimalnej wartości kryterium $J2$. Uzyskane dla tych rozwiązań przebiegi: odpowiedź układu – położenie (odpowiednio rys. 12 i 13) oraz przebiegi sterowania (rys. 15) i prędkości (rys. 14) wskazują na bardzo duże podobieństwo w pracy obydwu regulatorów. Dlatego uznano, że wybór pojedynczego rozwiązania metodą zaprezentowaną w pracy [9] nie poprawi jakości wyniku projektu.

4. PODSUMOWANIE

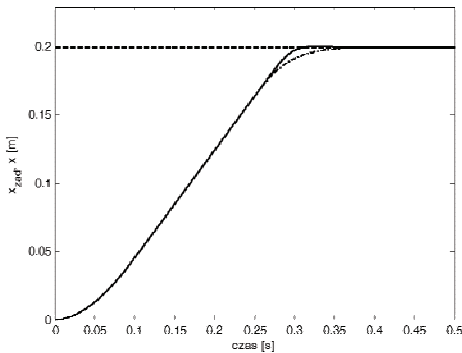
W artykule przedstawiono wyniki optymalizacji wielokryterialnej regulatora PI w pozycyjnym napędzie liniowym. Wykorzystano algorytm PAES [6], dla którego zaproponowano dwie modyfikacje.



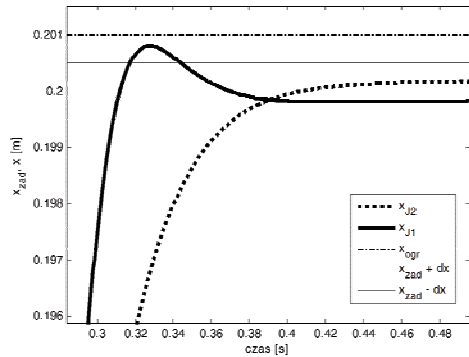
Rys. 10. Front Pareto



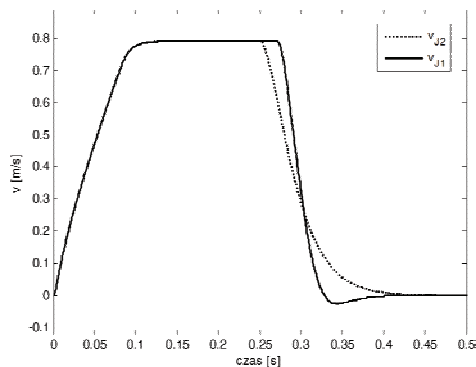
Rys. 11. Zbiór Pareto*



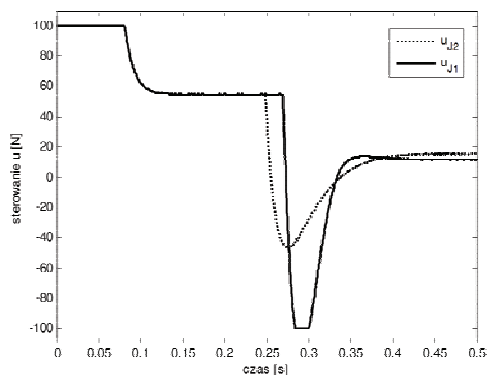
Rys. 12. Odpowiedź układu – położenie



Rys. 13. Powiększenie odpowiedzi przedstawionej na rys. 12 ($dx = 0.0005$ strefa tolerancji)



Rys. 14. Przebieg prędkości odpowiadającej zmianie położenia jak na rys. 12



Rys. 15. Przebieg sterowania odpowiadającego zmianie położenia z rys. 12

Pierwsza z nich pozwala wymienić w archiwum algorytmu te rozwiązania, dla których rozwiązania potomne są nieefektywne. Druga pozwala eliminować rozwiązania oceniane jako niedopuszczalne ze względu na ograniczenia uwzględnione jako kryteria pomocnicze. Wykorzystano całkowite kryteria przeciwstawne ITAE i ISU, oraz maksymalny dopuszczalny czas regulacji i dopuszczalne przeregulowanie. Uzyskano znaczne zwiększenie skuteczności PAES w wyznaczaniu rozwiązań efektywnych w małym obszarze spełniającym narzucone ograniczenia. Skuteczność metody potwierdzono symulacyjnie dla serwonapędu linowego z tarciem.

LITERATURA

- [1] CHIU S., *Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation*, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 1994, Vol. 2, No. 3, 267–278.
- [2] COELLO COELLO C.A., LAMONT G.B., VAN VELDHUIZEN D.A., *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*, 2nd Ed., Springer, Berlin 2007.
- [3] HODEL A.S., HALL C.E., *Variable-structure PID control to prevent integrator windup*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, Vol. 48, No. 2, 442–451.
- [4] JASTRZĘBSKI M., *Strojenie regulatora w układzie napędowym z zastosowaniem algorytmu genetycznego z emanacją cienia i poświaty*, VI Krajowa Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym (SENE), Łódź 2003, 195–200.
- [5] KABZIŃSKI J., JASTRZĘBSKI M., *Practical implementation of adaptive friction compensation based on partially identified LuGre model*, 19th International Conference On Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Międzyzdroje 2014, 699–704.
- [6] KNOWLES J., CORNE D., *Approximating the Nondominated Front Using the Pareto Archived Evolution Strategy*, Evolutionary Computation Archive, 2000, Vol. 8, No. 2, 149–172.
- [7] OLTEAN M. et al., *Multiobjective optimization using adaptive Pareto archived evolution strategy*, 5th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 2005, 558–563.
- [8] SUDHOFF S.D., *Power Magnetic Devices: A Multi-Objective Design Approach*, Wiley, 2014.
- [9] WOZNIAK P., *Preferences in multi-objective evolutionary optimisation of electric motor speed control with hardware in the loop*, Applied Soft Computing, 2011, Vol. 11, No. 1, 49–55.

DESIGN OF THE DRIVE SYSTEM CONTROLLER USING CONSTRAINED MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION

The article presents the results of multi-criteria optimization of the PI controller in positional linear drive with friction. In order to increase the effectiveness of known algorithm PAES [6] Authors proposed two modifications. The first one allows the exchange of archive solutions whose offspring solutions are ineffective. The second one allows elimination of solution violating limits. Optimization was based on two conflicting criteria – ITAE and ISU, and two subsidiary criteria – the maximum allowable set time and allowable overshoot. A significant increase in the efficiency of the algorithm PAES in determining effective solutions that meet the imposed limitations was achieved. The effectiveness of this method was confirmed by simulation.