

dr inż. Adam Słota
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji
Politechnika Krakowska

MODEL KOORDYNACJI TRAJEKTORII EFEKTORÓW DWÓCH MANIPULATORÓW KARTEZJAŃSKICH Z UWZGLĘDNIENIEM DYNAMIKI UKŁADÓW NAPĘDOWYCH

W pracy przedstawiono model dwóch manipulatorów kartezjańskich płaskich obejmujący dynamikę układów napędowych elektrycznych z silnikami prądu stałego. Przedstawiono przyjęte założenia upraszczające. Do generowania wartości zadanych położenia wykorzystano algorytm koordynacji trajektorii z proporcjonalno-całkującą korekcją zaprogramowanego ruchu prostoliniowego do położenia docelowego. Dla wybranych parametrów modelu przeprowadzono symulacje i przedstawiono wyniki.

A TRAJECTORY COORDINATION MODEL OF TWO CARTESIAN MANIPULATORS WITH DRIVES DYNAMICS

A model of two planar Cartesian manipulators including dynamics of electric drives with DC motors is presented in the paper. For position set values generation an algorithm of trajectory coordination with proportional-integral correction of programmed linear motion to the final position is used. For selected values of model parameters simulations were carried out and results are presented.

1. WSTĘP

Prace dotyczące koordynacji pracy robotów ukierunkowane są na realizację zadań niemożliwych lub trudnych do wykonania przez pojedyncze roboty. Zadaniem takim jest transport dużych i ciężkich przedmiotów, który nie może być zrealizowany przez pojedynczy manipulator, ale może być wykonany przez dwa manipulatory działające w skoordynowany sposób. Realizacja takiego zadania przez dwa manipulatory wymaga sterowania, które uwzględnia ograniczenia wynikające z równoczesnej pracy manipulatorów. Może to być zrealizowane przez sterowanie centralne lub rozproszone. W przypadku sterowania centralnego jeden układ sterowania steruje pracą dwóch robotów. Rozwiązania dostarczane przez firmy produkujące roboty przemysłowe umożliwiają sterowanie dwoma robotami o 6 stopniach swobody. W przypadku sterowania rozproszonego każdy robot sterowany jest przez oddzielny układ sterowania, który realizuje zaprogramowane zadanie ruchu, równocześnie uwzględniając ograniczenia wynikające z faktu ciągłego współdziałania z drugim robotem.

W pracy [2] przedstawiono algorytm generowania trajektorii manipulatorów kartezjańskich w ruchu płaskim dla realizacji zadań transportowych. Zadanie sformułowano następująco: dwa manipulatory kartezjańskie mają zrealizować zadanie transportu elementu, wykonując równocześnie ruch z bieżącego położenia początkowego do zaprogramowanego położenia docelowego z zadaną prędkością. Założono, że trajektoria każdego z manipulatorów generowana jest przez ten sam algorytm, przy czym parametry generowania trajektorii dla

każdego z manipulatorów mogą być różne. Przyjęto, że układ sterowania jednego manipulatora posiada informacje o aktualnym położeniu efektora drugiego manipulatora, ale nie posiada informacji dotyczących jego zaprogramowanego położenia docelowego i zaprogramowanej prędkości ruchu. Trajektorie ruchu miały być generowane on-line w trakcie realizacji ruchu. Celem było wygenerowanie takich trajektorii, aby zmiany odległości efektorów manipulatorów w trakcie realizacji ruchu były możliwie małe. Generowany ruch efektora składał się z dwóch ruchów składowych: ruchu w kierunku zaprogramowanego położenia docelowego ze stałą zaprogramowaną prędkością oraz ruchu korekcyjnego w kierunku łączącym efektor manipulatorów (kierunku transportowanej belki). Prędkość ruchu korekcyjnego jest sumą części proporcjonalnej do zmiany odległości pomiędzy efektorami manipulatorów i części proporcjonalnej do całki ze zmiany odległości pomiędzy efektorami manipulatorów. Dla powyższych założeń zbudowano model i przeprowadzono symulacje.

W modelu przedstawionym w [2] nie uwzględniono parametrów dynamicznych układów napędowych manipulatorów oraz występującego pomiędzy efektorami manipulatorów oddziaływania siłowego. Wygenerowane wartości zadane położenia traktowane były jako rzeczywiście zrealizowane i jako takie przyjmowane do obliczeń kolejnych wartości zadanych. W układzie rzeczywistym serwonapędu występuje uchyb regulacji - w trakcie realizacji ruchu ze stałą prędkością położenie rzeczywiste różni się do położeniaadanego. Wartość tej różnicy zależy od parametrów dynamicznych napędu oraz zadanej prędkości ruchu. Algorytm generowania trajektorii wylicza zadaną wartość położenia na podstawie zmiany odległości pomiędzy efektorami manipulatorów, a więc na podstawie rzeczywistego położenia efektorów obydwu manipulatorów. Dlatego efekt działania algorytmu – generowana trajektoria ruchu – oraz realizacja wygenerowanej trajektorii będą zależeć od parametrów dynamicznych napędów manipulatorów.

2. MODEL SYMULACYJNY KOORDYNACJI TRAJEKTORII

2.1. Założenia przyjęte przy budowie modelu

Przy budowie modelu przyjęto poniższe założenia upraszczające:

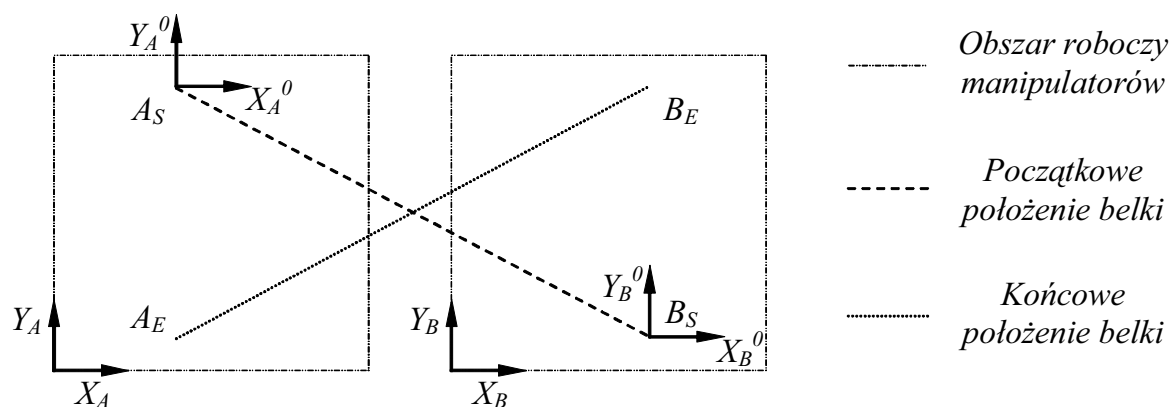
- zadanie transportu realizowane jest przez dwa takie same (o identycznych uwzględnianych w modelu wartościach parametrów dynamicznych) manipulatory kartezjańskie,
- zakresy ruchów manipulatorów oraz ich wzajemne usytuowanie (niezmienne w trakcie realizacji ruchu) są takie, że możliwa jest realizacja zaprogramowanego ruchu z bieżącego położenia początkowego do położenia docelowego z uwzględnieniem korekcji trajektorii ruchu,
- odpowiednie osie obydwu manipulatorów są wzajemnie równoległe,
- w części mechanicznej napędów manipulatorów nie występują luzy, pomija się podatność i tłumienie - część mechaniczna napędu jest traktowana jako idealny element proporcjonalny,
- opory ruchu są proporcjonalne do prędkości ruchu,
- oddziaływanie siłowe pomiędzy manipulatorami występuje tylko w kierunku łączącym efektor manipulatorów, połączenie pomiędzy manipulatorami jest traktowane jako liniowe połączenie sprężyste,
- model napędu uwzględnia ograniczenia prędkości ruchu i ograniczenie obciążenia (prądu/momentu) do maksymalnych wartości dopuszczalnych dla dobranych silników.

Tabela 1. Wartości parametrów modelu

L.p.	Nazwa parametru [jednostki]	Napęd osi X	Napęd osi Y
1	Model silnika	MT-2250-A	MT-3353-D
2	Stała momentowa [Nm/A]	0,115	0,159
3	Stała napięciowa [V/rad/s]	0,115	0,159
4	Moment bezwładności wirnika silnika [kg*m ²]	0,000054	0,000184
5	Rezystancja uzwojeń wirnika [Ω]	2,3	1,8
6	Indukcyjność uzwojeń wirnika [H]	0,0058	0,004
7	Dopuszczalny ciągły prąd wirnika [A]	3,42	4,9
8	Współczynnik wzmocnienia regulatora położenia [1/s]	10	10
9	Współczynnik wzmocnienia regulatora prędkości [1/s]	30	30
10	Czas zdwojenia regulatora prędkości [s]	0,005	0,005
11	Współczynnik wzmocnienia regulatora prądu [1/s]	20	20
12	Czas zdwojenia regulatora prądu [s]	0,01	0,01
13	Współczynnik wzmocnienia wzmacniacza	5	5
14	Skok śruby pociągowej [m/obr]	0,02	0,02
15	Zredukowany na wał silnika moment bezwładności części mechanicznej [kg*m ²]	0,000331	0,000566
16	Zakres ruchu osi [m]	1,1	1,1
17	Maksymalna prędkość ruchu liniowego efektora manipulatora [m/s]	1,38	1,00
18	Współczynnik wzmocnienia prędkości ruchu korekcyjnego [1/s]	3	3
19	Czas zdwojenia prędkości ruchu korekcyjnego [s]	0,5	0,5

2.3. Wyniki eksperymentu symulacyjnego

Symulacja skoordynowanego działania manipulatorów przy transporcie belki została przeprowadzona dla konfiguracji pokazanej na rys. 3.



Rys. 3. Ustawienie manipulatorów

Symulację przeprowadzono dla danych (podane wartości współrzędnych wyrażone są w metrach):

A_S – położenie początkowe efektora manipulatora A – punkt o współrzędnych $(0,4; 0,9)$ w układzie $X_A Y_A$.

A_E – położenie docelowe efektora manipulatora A – punkt o współrzędnych $(0,4; 0,1)$ w układzie $X_A Y_A$.

B_S – położenie początkowe efektora manipulatora B – punkt o współrzędnych $(0,6; 0,1)$ w układzie $X_B Y_B$.

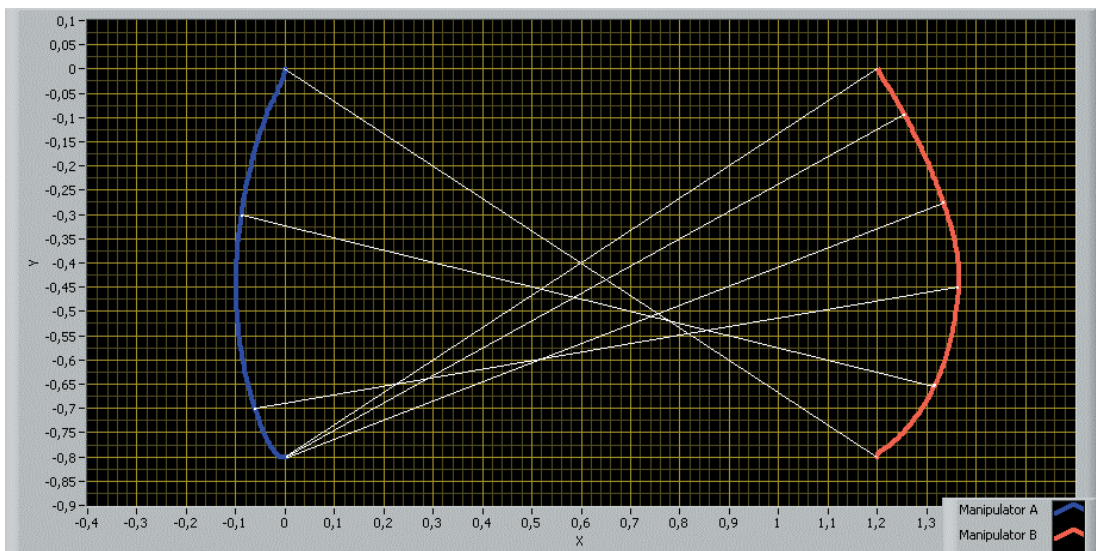
B_E – położenie docelowe efektora manipulatora B – punkt o współrzędnych $(0,6; 0,9)$ w układzie $X_B Y_B$.

Położenie układu współrzędnych $X_B Y_B$ względem układu współrzędnych $X_A Y_A$ określają współrzędne $(1,8; 0)$.

Zaprogramowane prędkości ruchu: efektora manipulatora A – $V_p^A=0,1[m/s]$, efektora manipulatora B – $V_p^B=0,05[m/s]$.

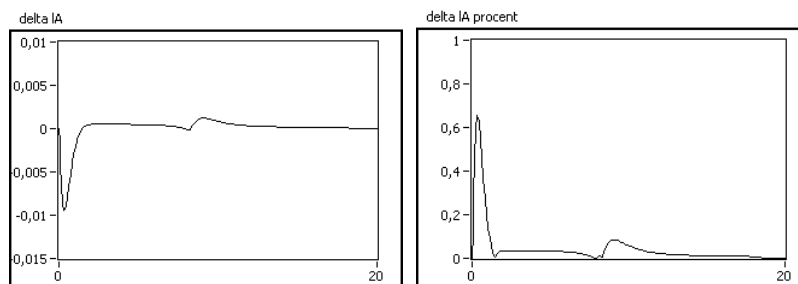
2.3.1 Trajektorie bez uwzględniania dynamiki układów napędowych

Na rys. 4 przedstawiono wygenerowane trajektorie efektorów manipulatorów (wartości zadane położenia) dla podanych powyżej danych wejściowych. Trajektorie zostały wygenerowane na podstawie algorytmu zamieszczonego w pracy [2] bez uwzględnienia dynamiki układów napędowych manipulatorów. Trajektorie na rys. 4 zostały przedstawione w układzie współrzędnych $X_A^0 Y_A^0$ (zaznaczonym na rys. 3). Białymi liniami zaznaczono kolejne położenia belki – ich niesymetryczne rozmieszczenie wynika z różnych zadanych prędkości ruchu V_p^A oraz V_p^B efektorów obydwu manipulatorów.



Rys. 4. Wygenerowane trajektorie efektorów

Rys. 5 przedstawia zmiany odległości efektorów manipulatorów dla wygenerowanych trajektorii w wartościach bezwzględnych odległości wyrażonych w metrach (ΔLA) oraz jako wartości procentowe początkowej odległości efektorów ($\Delta LA \text{ procent}$).

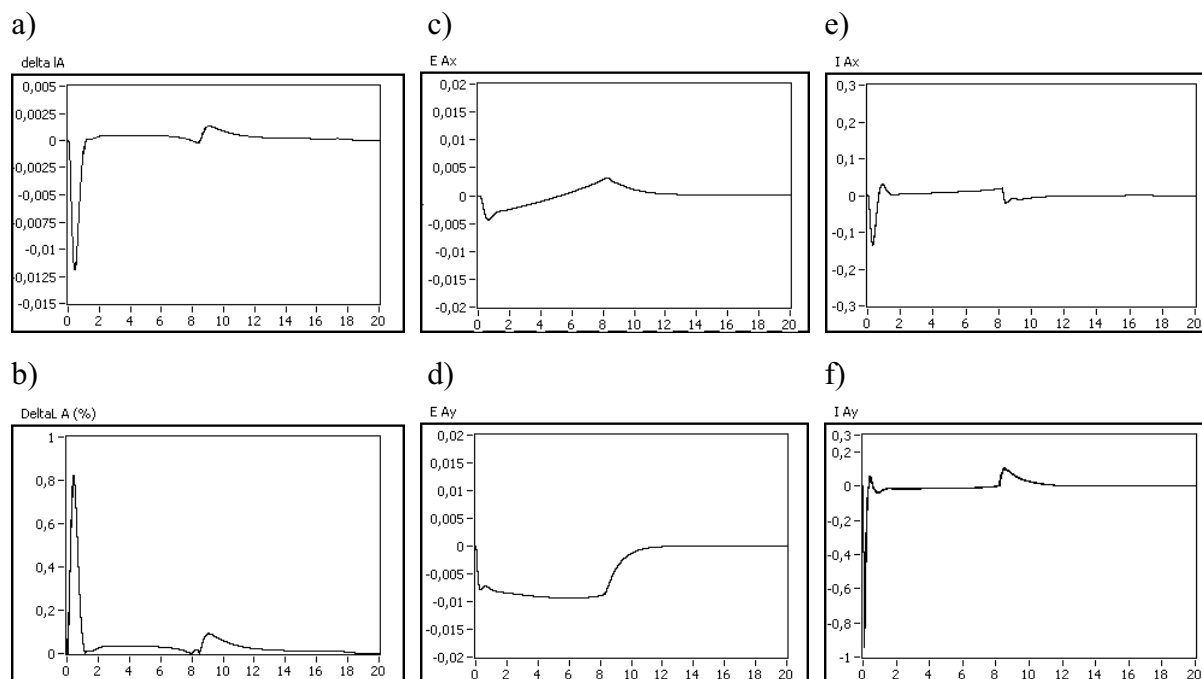


Rys. 5. Zmiany odległości efektorów manipulatorów

2.3.2 Trajektorie przy uwzględnieniu dynamiki układów napędowych

Algorytm koordynacji trajektorii został zastosowany do generowania wartości zadanych położenia dla modeli dwóch płaskich manipulatorów kartezjańskich. Modele te uwzględniają dynamikę układów napędowych (założenia – rozdział 2.1, wartości parametrów – tabela 1).

Na rys. 6 przedstawiono wyniki symulacji dla modelu bez oddziaływania siłowego pomiędzy efektorami manipulatorów: (a) – zmianę odległości pomiędzy efektorami manipulatorów (ΔL_A), (b) – względną zmianę odległości pomiędzy efektorami manipulatorów ($\Delta L_A(\%)$), (c) – uchyb położenia osi X manipulatora A (E_{Ax}), (d) – uchyb położenia osi Y manipulatora A (E_{Ay}), (e) – prąd wirnika silnika osi X manipulatora A (I_{Ax}), (f) – prąd wirnika silnika osi Y manipulatora A (I_{Ay}). Wyznaczone zmiany odległości pomiędzy efektorami manipulatorów są większe w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla modelu nie uwzględniającego dynamiki układów napędowych (rys. 5). Spowodowane jest to występowaniem w układzie napędowym uchybu położenia.

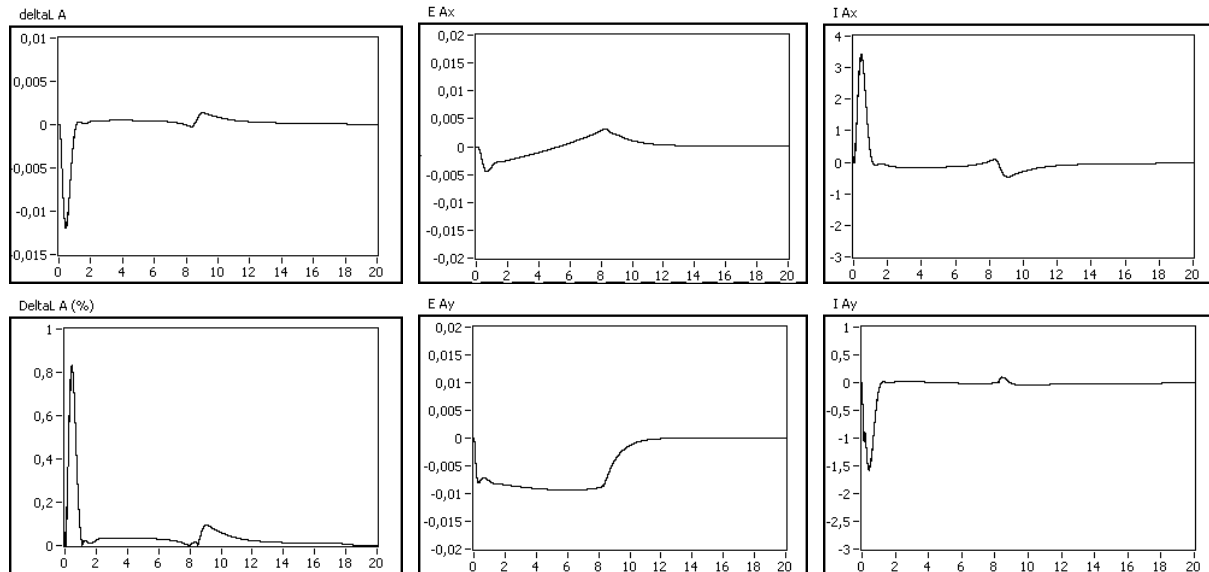


Rys. 6. Wyniki symulacji bez oddziaływania siłowego

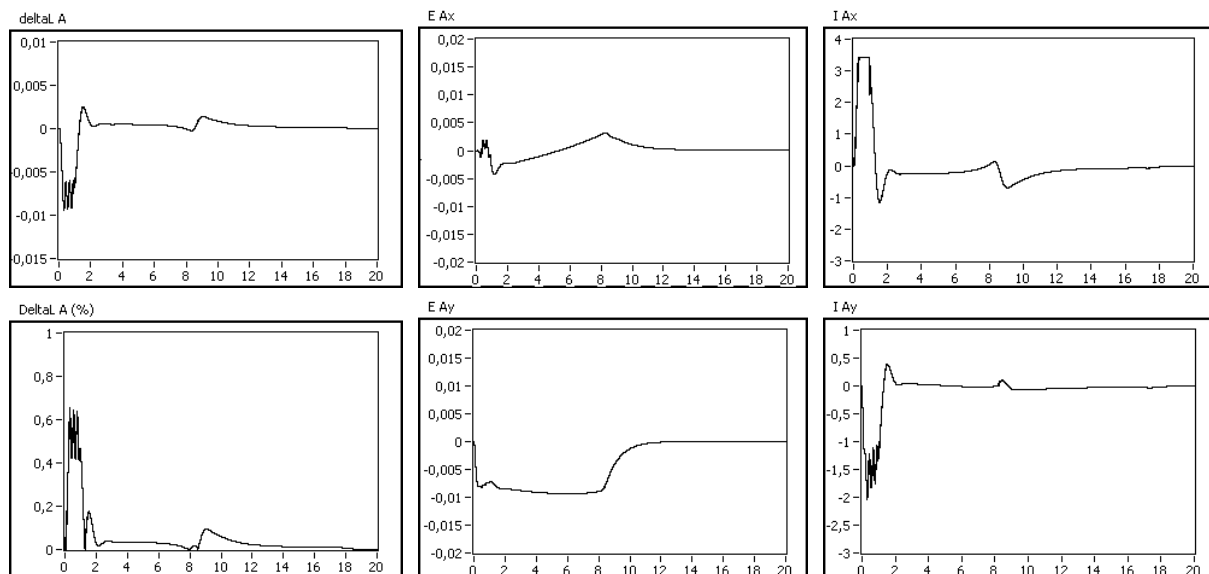
Występujące w trakcie ruchu zmiany odległości pomiędzy efektorami manipulatorów, przy założeniu sprężystego połączenia pomiędzy efektorami manipulatorów, powodują, że manipulatory wzajemnie na siebie oddziałują z siłą proporcjonalną do zmiany odległości. To

oddziaływanie jest źródłem dodatkowego obciążenia układów napędowych manipulatorów. Na rys. 7 przedstawiono wykresy wielkości (jak na rys. 6) przy uwzględnieniu oddziaływania siłowego dla dwóch różnych wartości współczynnika sztywności C połączenia pomiędzy efektorami manipulatorów: (a) – $C = 12560 \text{ N/m}$, (b) – $C = 18840 \text{ N/m}$. Wartość współczynnika $C = 12560 \text{ N/m}$ odpowiada, przy pominięciu strat, obciążeniu wałka silnika momentem $0,4 \text{ Nm}$ przy zmianie odległości pomiędzy efektorami o $0,01 \text{ m}$.

a)



b)



Rys. 7. Wyniki symulacji z uwzględnieniem oddziaływania siłowego

Dodatkowe obciążenie układów napędowych, będące wynikiem oddziaływania pomiędzy manipulatorami, ma wpływ na realizację zadanej trajektorii ruchu. W przypadku, gdy obciążenie osiąga dopuszczalne ciągłe obciążenie silnika napędowego (dopuszczalny ciągły prąd wirnika), działanie przejmuje obwód regulacji prądu. Na rys. 7b na wykresie I_{Ax} widoczne jest w początkowych chwilach symulacji (do około 1 s) ograniczenie wartości

prądu do dopuszczalnej wartości maksymalnej. Dla czasu odpowiadającego ograniczeniu wartości prądu na wykresie $E\Delta x$ (rys. 7b) widoczna jest zmiana wartości uchybu (w porównaniu z wykresem $E\Delta x$ na rys. 7a). W rozważanym okresie uchyb z wartości ujemnej (wykres $E\Delta x$ na rys. 7a) zmienia się na wartość dodatnią (wykres $E\Delta x$ na rys. 7b). Powoduje to, przy ustawieniu manipulatorów pokazanym na rys. 3 oraz występującej ujemnej zmianie odległości efektorów manipulatorów (skrócenie wektora łączącego efektor manipulatorów), zmniejszenie zmian odległości pomiędzy efektorami manipulatorów. Zmiana ta jest widoczna przy porównaniu wykresów ΔL_A na rys. 7a oraz rys. 7b.

3. PODSUMOWANIE

Algorytm generowania skoordynowanych trajektorii dla zadań transportowych manipulatorów kartezjańskich wylicza kolejne wartości zadane położenia efektora manipulatora na podstawie zadanej pozycji docelowej i zadanej prędkości ruchu manipulatora oraz na podstawie aktualnego rzeczywistego położenia efektorów obydwu manipulatorów. Ponieważ położenie rzeczywiste w trakcie realizacji ruchu zależy od parametrów dynamicznych napędów manipulatora, parametry te będą miały wpływ na trajektorie ruchu efektorów.

Uzyskane w drodze symulacji wyniki wskazują, że realizacja wygenerowanej trajektorii zależy, poza parametrami dynamicznymi układów napędowych manipulatorów, od wielkości oddziaływania siłowego pomiędzy efektorami. Wpływ ten jest szczególnie istotny, gdy oddziaływanie siłowe osiąga dopuszczalne ciągłe obciążenie silnika napędowego. Zmianie ulega trajektoria ruchu, przy czym kierunek tej zmiany jest taki, że powoduje zmniejszenie zmian odległości pomiędzy efektorami manipulatorów.

4. LITERATURA

- [1] Pritschow, G.: Technika sterowania obrabiarkami i robotami przemysłowymi, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- [2] Słota, A.: Model koordynacji trajektorii efektorów dwóch manipulatorów kartezjańskich dla zadań transportowych, *Pomiary Automatyka Robotyka* 2/2008, str. 688-697.
- [3] http://www.hiwin.pl/DownloadCenter/files/HN_PosSyst_eng.pdf, Katalog HIWIN, Positioning Systems.
- [4] http://www.baldor.com/pdf/literature/BR1202_F.pdf, Katalog BALDOR, DC Servo Motors & Drives for the automation industry.