

## 1 Sterowanie w podprzestrzeni typu *hiperkula*

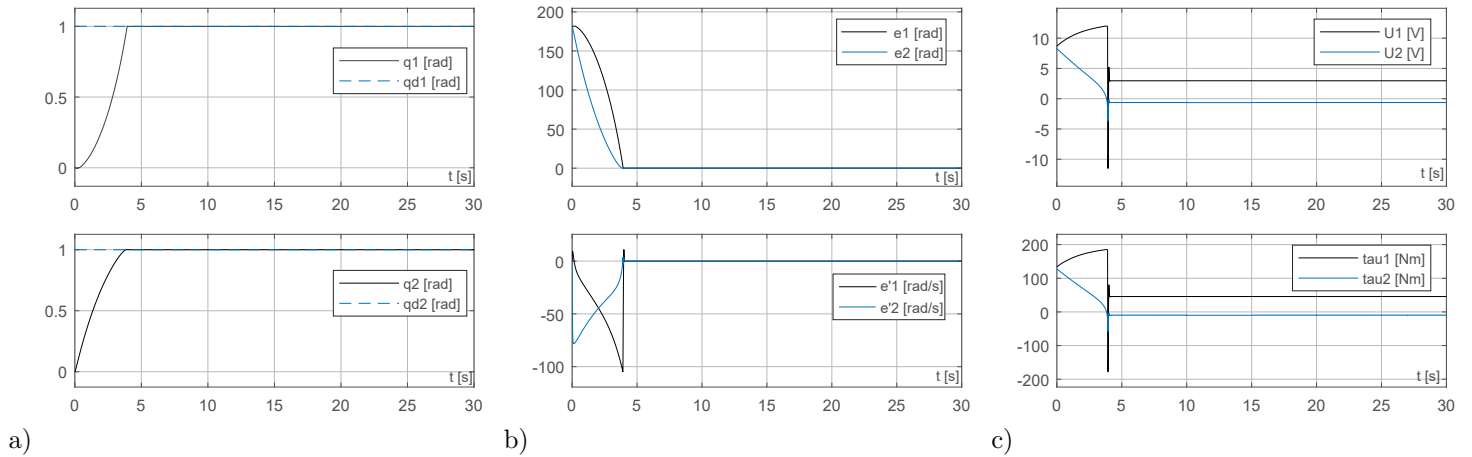
Dla modelu manipulatora PM2R z silnikami zaprojektowany został regulator ROOS dla ograniczonej podprzestrzeni sterowań: hiperkuli. Układ sterowania wyrażony jest wprost dla napięć wraz ze wzmacniaczem mocy, ograniczającym napięcia zasilania dla obu silników. Symulacje przebiegają dla zerowych warunków początkowych (manipulator wyprostowany w prawo).

Z założeń wynika, iż regulator ROOS jest odporny na nieznajomość strukturalną i parametryczną modelu, zatem dla celów symulacji wprowadzono niepewności parametryczne: 10% dla długości pierwszego oraz drugiego ramienia oraz 10% dla masy drugiego ramienia. Silnik został zamodelowany według danych *maxon DC motor FF2260, 883* oraz dwóch przekładni *110507* o przełożeniu  $\eta = 1/181$ . Wartości współczynników diagonalnych macierzy wzmocnienia dla  $\epsilon = 0,9$  przyjęto eksperymentalnie oraz ograniczono napięcia zasilania aktuatorów:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 2,3 & 0 \\ 0 & 2,2 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0,05 & 0 \\ 0 & 0,05 \end{bmatrix}, \quad u_{max} = \begin{bmatrix} 24 \\ 24 \end{bmatrix} [V] \quad (1)$$

Podstawowym ograniczeniem podprzestrzeni typu *hiperkula* jest ograniczenie napięcia sterującego  $u_{HKmax} = \min\{u_{max}\}$ . Efekt ograniczenia widoczny jest na rys. 1. W przypadku nierównych napięć zasilania, sygnał sterujący bazuje na najmniejszym z ograniczeń, zwiększając czas ustalania odpowiedzi układu, maksymalny moment napędowy. W takiej konfiguracji, zmieniając doświadczalnie napięcie zasilania  $\tau_{1max}$ , do wartości  $\overline{\tau_{1max}} = 16 [V]$ , przebieg uchybu przestał zbiegać asymptotycznie do otoczenia zera.

### 1.1 Prezentacja wyników



Rysunek 1: Wyniki symulacji dla zmniejszonego napięcia zasilania  $u_{2max} = 12 [V]$  o wymuszeniu  $Q_d = [1 \ 1]$ : przebiegi a) pozycji ogniw wraz z zadaniem sygnałem referencyjnym, b) uchybów pozycji i prędkości, c) napięć sterujących oraz odpowiadające im momenty generowane na wałach silników.

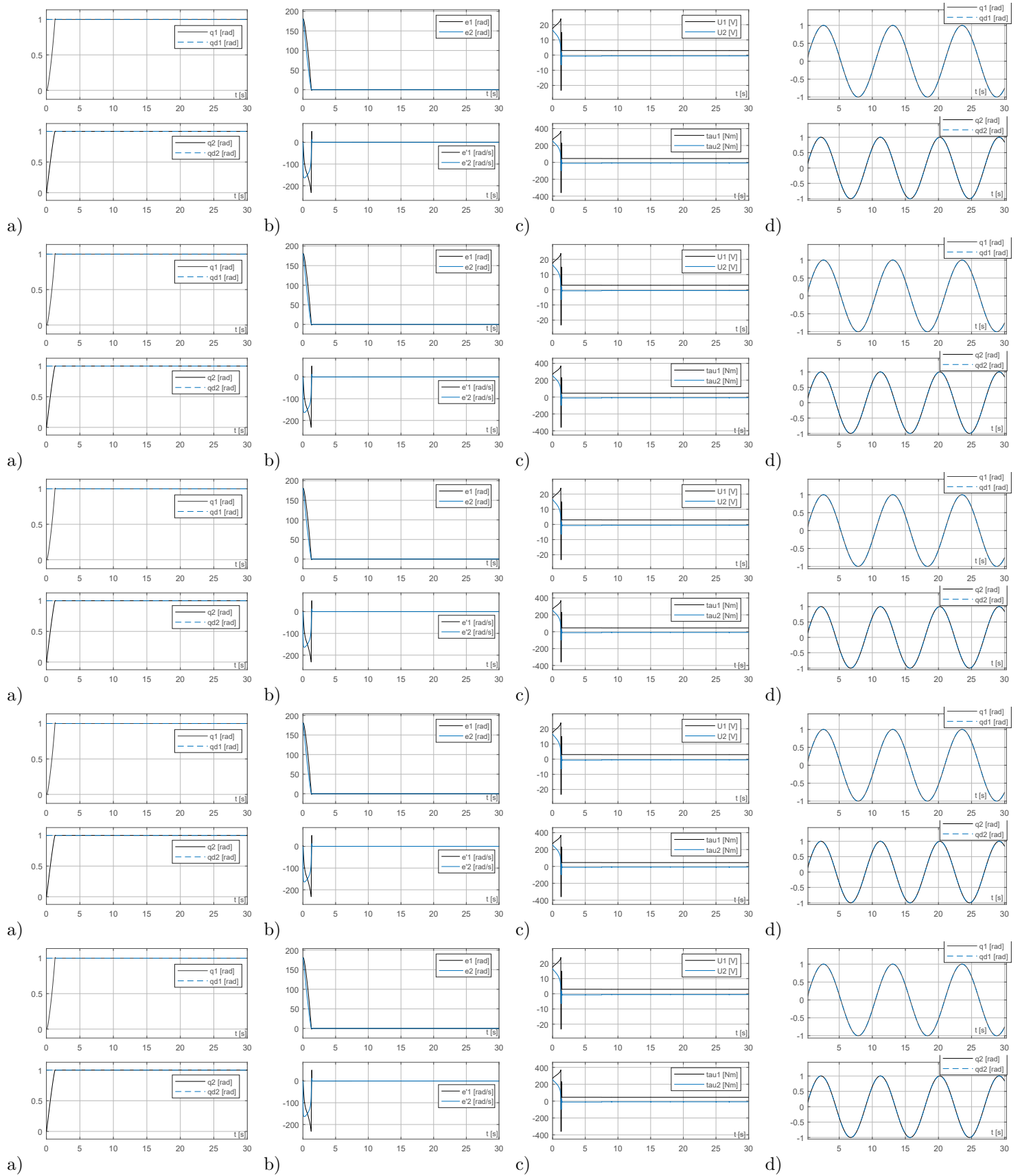
### 1.2 Wnioski

Z obserwacji wynika, iż zjawisko *chatteringu* staje się intensywniejsze, gdy wartość współczynnika  $\epsilon$  maleje. Dla dobranych nastaw (1) występują miejscowe *peaki* o wartości ok.  $0,15[V]$ . Przyjmując za  $\epsilon = 0$ , zjawisko znacznie się intensyfikuje, oscylując między granicznymi wartościami napięć sterujących z wysoką częstotliwością. Uniemożliwia to poprawne sterowanie obiektem i może doprowadzić do zniszczenia części mechanicznych.

Dla wymuszenia  $Q_{d1}$  błędy śledzenia zbiegają do wartości ok.  $e_1 = 0,04$  oraz  $e_2 = -0,01$ , i ich wartość jest zależna od współczynnika  $\epsilon$  - im jest większy, tym błędy śledzenia rosną. Dla wymuszenia  $Q_{d3}$  wartości uchybów również zbiegają asymptotycznie do zera, aż do momentu, gdy sygnał referencyjny pozycji zadanej rośnie zbyt szybko, by manipulator mógł nadążyć. Dla wymuszenia  $Q_{d2}$ , błędy śledzenia oscylują wokół zera, tworząc tunel.

Dla wymuszenia  $Q_{d1}$ , zmniejszając napięcie zasilania do  $\overline{u_{1max}} = 16[V]$  błędy śledzenia przestały zbiegać do zera.

Mimo niepewności parametrycznej, odpowiedź modelu manipulatora odwzorowuje zadane wartości referencyjne. Kluczowym ograniczeniem jest zmniejszenie maksymalnej wartości sterowania w przypadku wystąpienia dwóch różnych napięć zasilających aktulatory - prowadzi to do zwiększenia czasu ustalania odpowiedzi manipulatora oraz ogranicza możliwości sterowania.



Rysunek 2: Wyniki symulacji dla  $u_{HKmax} = 24$  [V]. Przebiegi (a, d, g) pozycji ogniów wraz z zadaniem sygnałem referencyjnym, (b, e, h) uchybów pozycji i prędkości, (c, f, i) napięć sterujących oraz odpowiadające im momenty generowane na wałach silników, o wymuszeniu:

**a-c:**  $Q_{d1} = [1 \quad 1]$ ;

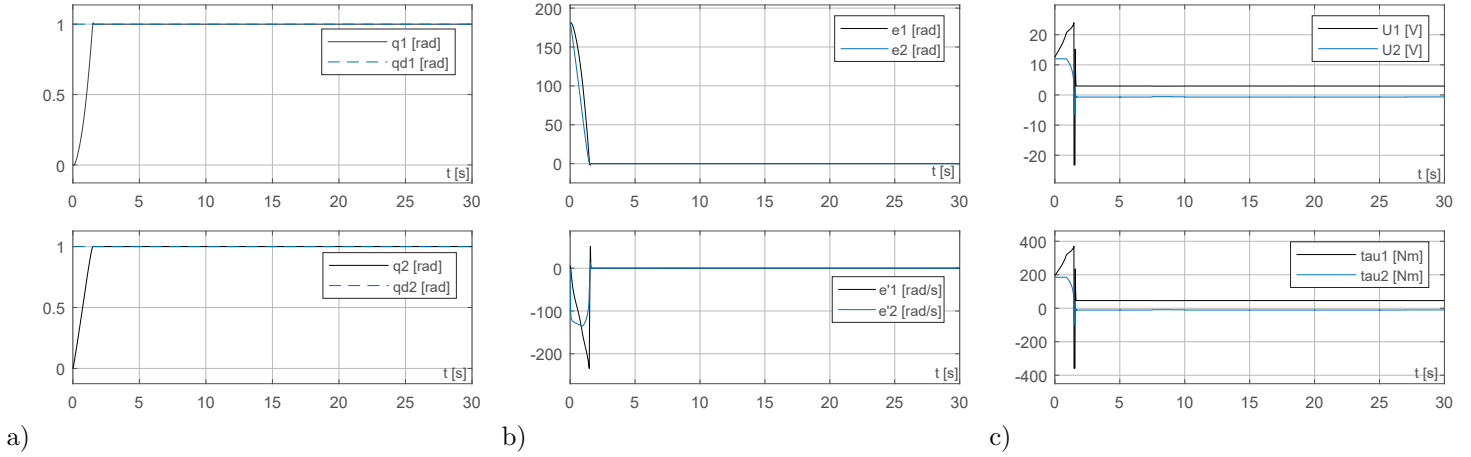
**d-f:**  $Q_{d2} = [\sin(0,6t); \sin(0,7t)]$ ;

**g-i:**  $Q_{d3} = [0,0025t^3 + 0,0020t^2 + 0,0015t + 0,001]$ .

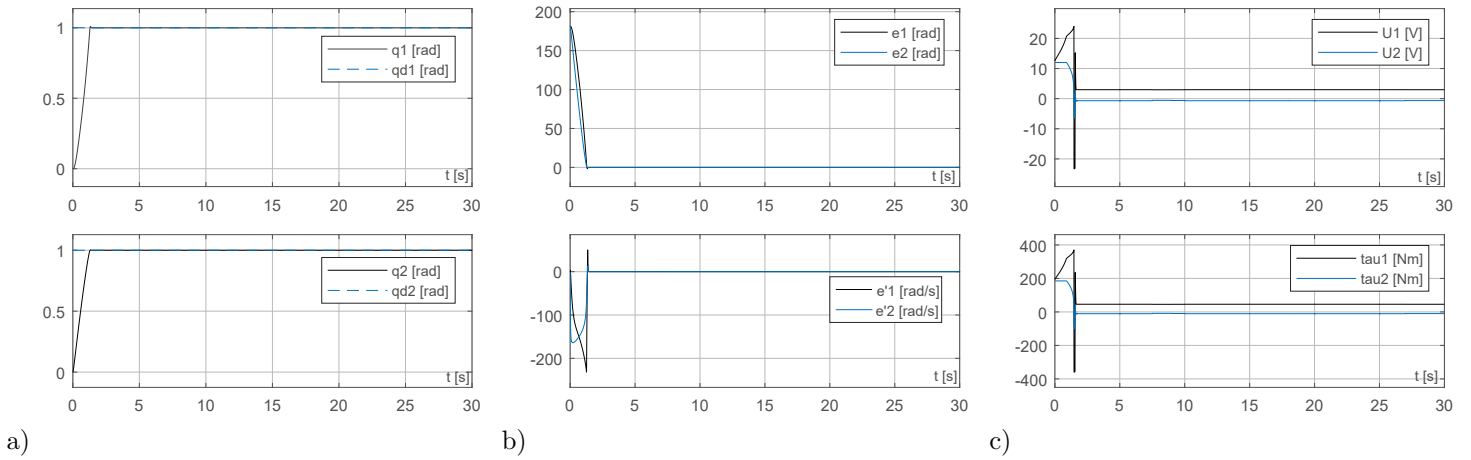
## 2 Sterowanie w podprzestrzeni typu *hiperprostopadłości*

Podstawowym założeniem sterowania w podprzestrzeni typu *hiperprostopadłości* jest usunięcie ograniczenia wynikającego z doboru minimalnej wartości  $u_{max}$ . Regulator ma zapewnić lepszą jakość sterowania, w przypadku wystąpienia różnych napięć zasilających akulatory. Symulacje przebiegają z identycznymi nastawami regulatorów (1).

### 2.1 Prezentacja wyników



Rysunek 3: Wyniki symulacji dla  $u_{2max} = 12$  [V] o wymuszeniu  $Q_d = [1 \ 1]$ : przebiegi a) pozycji ogniw wraz z zadaniem sygnałem referencyjnym, b) uchybów pozycji i prędkości, c) napięć sterujących oraz odpowiadające im momenty generowane na wałach silników.



Rysunek 4: Wyniki symulacji dla  $u_{HKmax} = 24$  [V]. Przebiegi a) pozycji ogniw wraz z zadaniem sygnałem referencyjnym, b) uchybów pozycji i prędkości, c) napięć sterujących oraz odpowiadające im momenty generowane na wałach silników, o wymuszeniu:  $Q_d = [1 \ 1]$

### 2.2 Wnioski

Błędy śledzenia w przypadku wymuszenia skokowego (rys. 4b) zmierzają asymptotycznie do zera. Jakość sterowania, w tym przypadku, jest identyczna dla obu podprzestrzeni. Różnica wynika natomiast po ograniczeniu napięcia sterującego:  $u_{2max} = 12$  V, wartość sterowania nie uległa zmniejszeniu jak w przypadku regulatora ROOS w podprzestrzeni typu *hiperkula* (rys. 1c, rys. 3c).

Zmniejszenie wartości napięcia zasilania do  $\overline{u_{1max}} = 16$  [V] w przypadku podprzestrzeni typu *hiperprostopadłości* spowodowało, iż błędy śledzenia zbiegały asymptotycznie do zera w odróżnieniu do podprzestrzeni typu *hiperkula*. Czas ustalania się odpowiedzi manipulatora uległ wydłużeniu.

Podsumowując, zmiana podprzestrzeni pozwala uniknąć zasadniczej wady. Manipulator może wykorzystać pełne możliwości zainstalowanych aktuatorów.

## 3 Asymptotycznie stabilny regulator adaptacyjny

Celem implementacji algorytmu jest identyfikacja dynamicznych parametrów modelu manipulatora PM2R (bez silników i przekładni) za pomocą regulatora zaproponowanego przez Slotine i Li. Według założeń wspomniany algorytm jest odporny na niepewności

parametryczne.

Jako model matematyczny manipulatora przyjęto sparametryzowaną wersję modelu:  $Y^T p = \tau$ . Zaimplementowano regulator Slotine i Li wraz z *Generatorem Trajektorii Wirtualnej*. W celu sprawdzenia założeń projektowych przyjęto niepewność parametryczną 10% dla masy drugiego ramienia oraz 10% długości obu ramion. Przyjęto parametry:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}, \quad K_V = \begin{bmatrix} 800 & 0 \\ 0 & 800 \end{bmatrix}, \quad \delta = \begin{bmatrix} 5000 & 0 \\ 0 & 5000 \end{bmatrix}, \quad \Lambda = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}, \quad \hat{p}_0, \quad \Gamma \quad (2)$$

gdzie  $\Gamma \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$  jest macierzą diagonalną o współczynnikach  $\gamma = 100$ , a wektor parametrów początkowych  $\hat{p}_0 \in \mathbb{R}^{1 \times 7}$  posiada współczynniki równe 0,1. Niezerowy uchyb pozycji  $e \neq 0$  przyjęto poprzez ustalenie warunków początkowych dla pozycji ramion  $q = [\pi/2 \quad \pi/2]$ .

### 3.1 Wnioski

Niezerowe warunki początkowe  $e \neq 0$  znacząco wpłynęły na przebieg momentów napędowych  $\tau$ , przy ich redukcji proporcjonalnie malała wartość szczytowa przebiegu sygnałów sterujących. Dla dynamicznej macierzy  $K_V$ , na zmniejszenie błędów śledzenia korzystnie wpływa zmniejszenie współczynnika  $\gamma$  oraz zwiększanie wartości  $\delta$ . Wiąże się to jednak ze wzrostem szczytowego momentu napędowego, który występuje na początku.

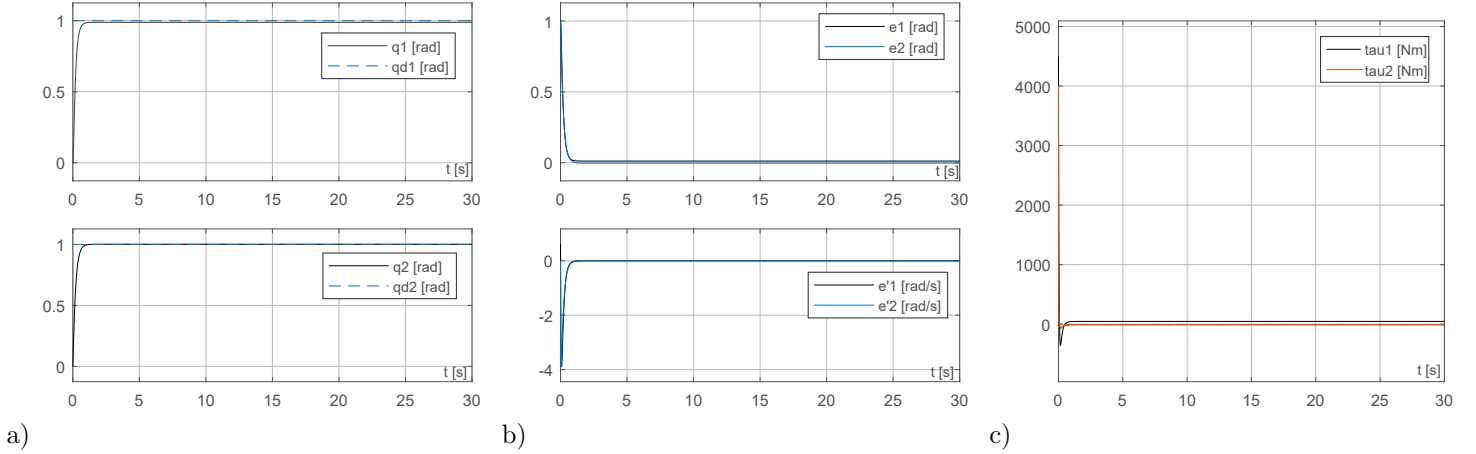
Jakość regulacji dla obu przypadków postaci macierzy  $K_V$  nie wykazuje istotnych różnic, poza możliwym wystąpieniem zjawiska *chatteringu* w przypadku dynamicznej wersji macierzy  $K_V$ .

Zwiększając macierz  $\Gamma$ , wektor parametrów estymowanych  $\hat{p}$  znacznie szybciej osiągał końcowe wartości, zmniejszeniu ulegały również ich oscylacje. Niezależnie jednak od rodzaju wymuszenia oraz warunków początkowych, estymaty parametrów  $\hat{p}$  znacząco różniły się od parametrów  $p$ .

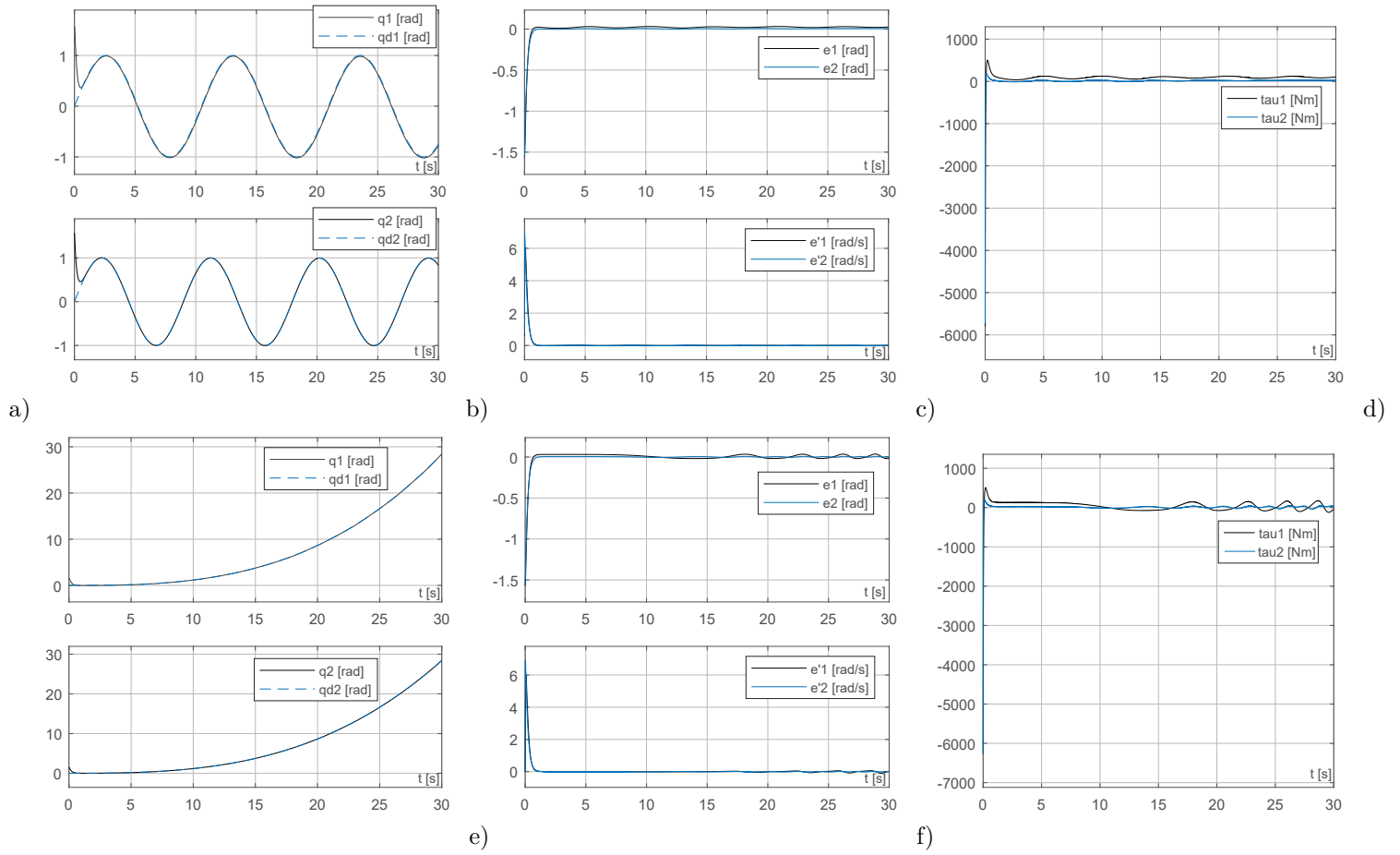
Wszelkie operacje zmniejszające uchyb znacząco wpływają na wartości szczytowe momentów napędowych, aż do wartości które przekraczają możliwości przekładni redukcyjnych - koniecznym może być zastosowanie stosownego ogranicznika mocy.

Podsumowując, mimo wprowadzonych niepewności parametrycznych regulator oddawał zadane trajektorie referencyjne.

### 3.2 Prezentacja wyników



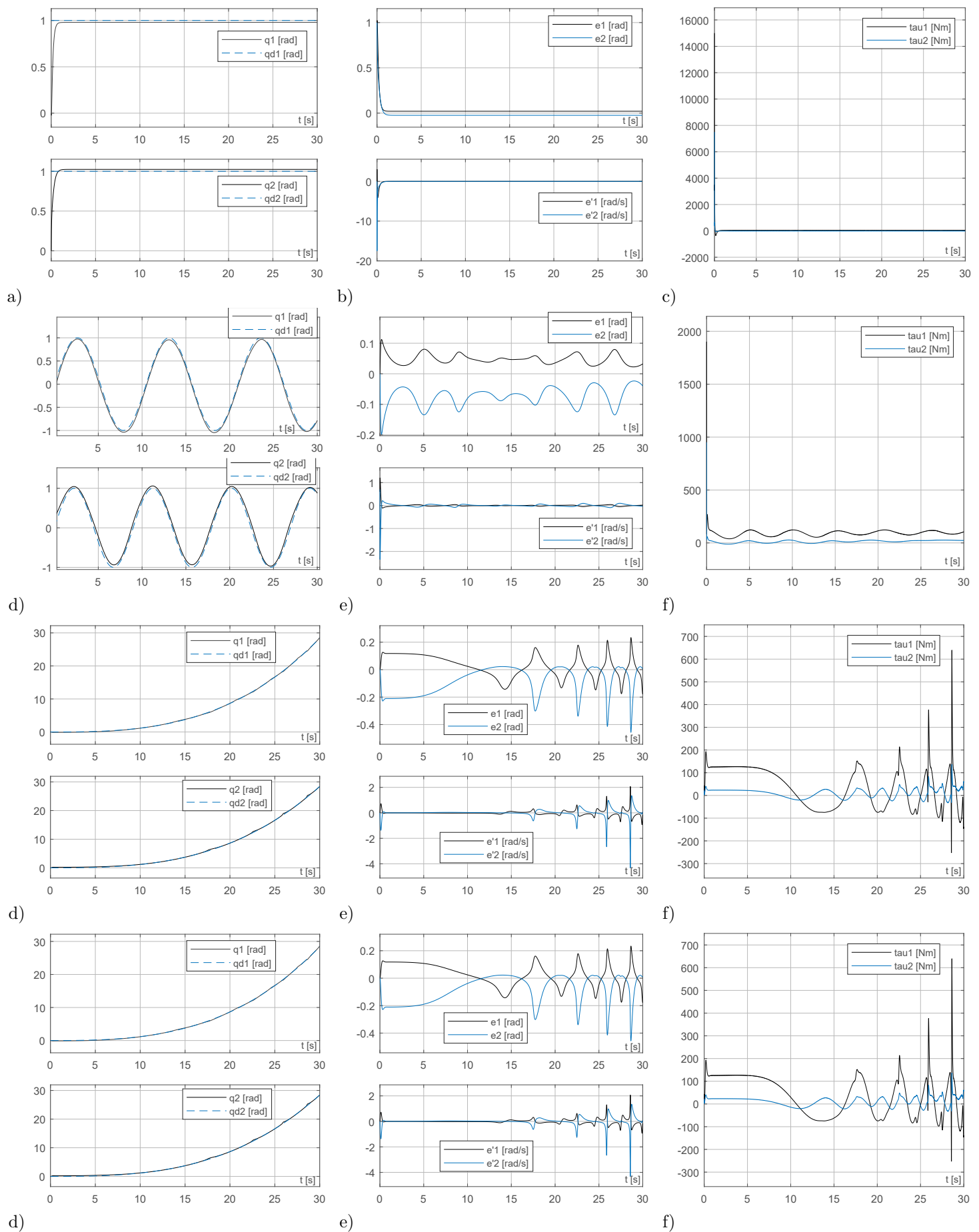
Rysunek 5: Wyniki symulacji dla wymuszenia  $Q_{d1} = [1 \quad 1]$  oraz  $e_0 = 0$ . Przebiegi a) pozycji ogniw wraz z zadanyym sygnałem referencyjnym, b) uchybów pozycji i prędkości, c) sygnałów sterujących.



Rysunek 6: Wyniki symulacji dla  $e_0 \neq 0$  oraz statycznej wersji  $K_V$ . Przebiegi a) pozycji ogniów wraz z zadanym sygnałem referencyjnym, b) uchybów pozycji i prędkości, c) sygnałów sterujących, dla wymuszeń:

**a-c:**  $Q_{d2} = [\sin(0,6t); \sin(0,7t)]$ ;

**d-f:**  $Q_{d3} = [0,0025t^3 + 0,0020t^2 + 0,0015t + 0,001]$ .

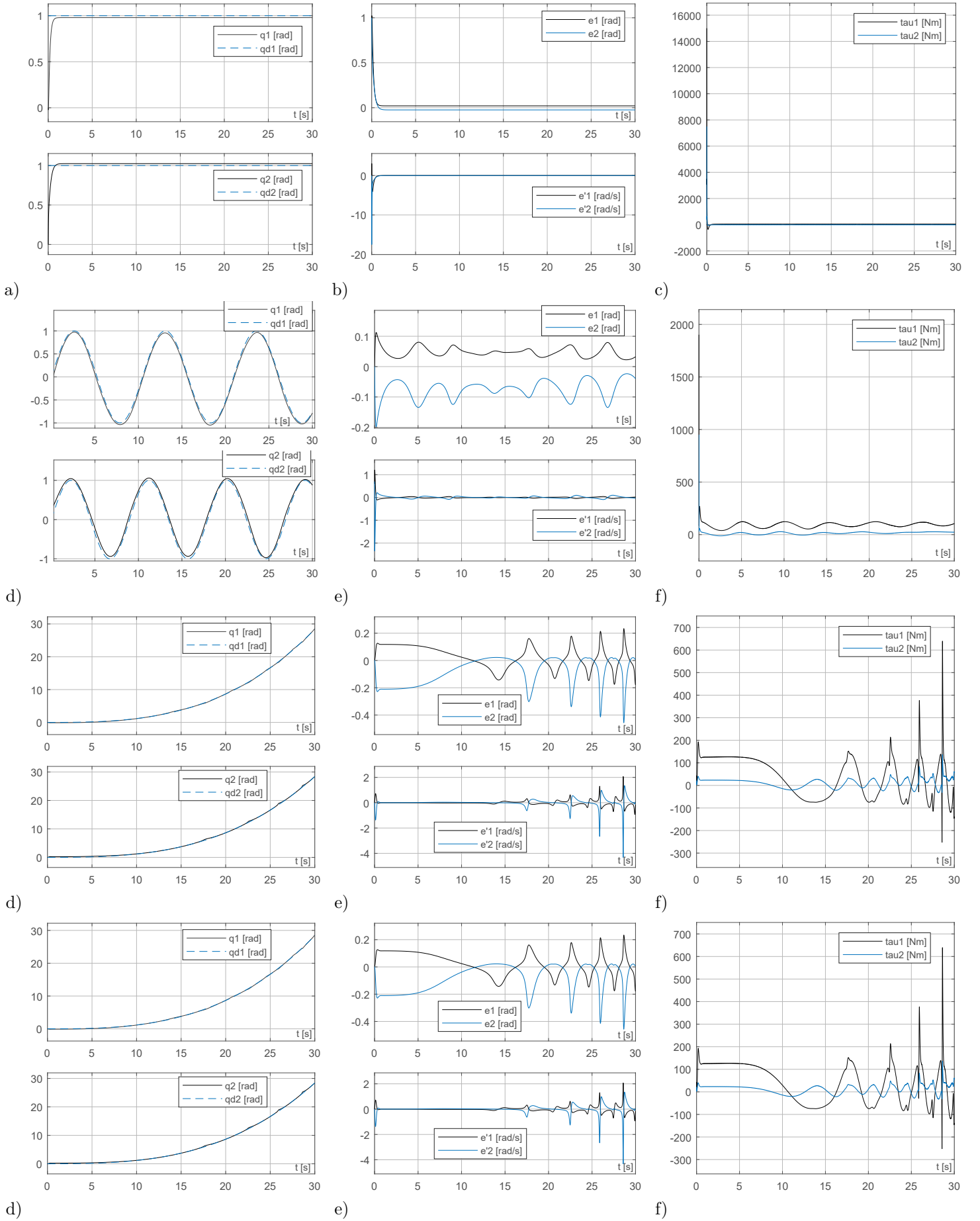


Rysunek 7: Wyniki symulacji dla  $K_V = \delta \hat{M}(q)$ ,  $e_0 = 0$ . Przebiegi (a, d, g) pozycji ogniw wraz z zadanym sygnałem referencyjnym, (b, e, h) uchybów pozycji i prędkości, (c, f, i) napięć sterujących oraz odpowiadające im momenty generowane na wałach silników, o wymuszeniu:

**a-c:**  $Q_{d1} = [1 \ 1]$ ;

**d-f:**  $Q_{d2} = [\sin(0, 6t); \sin(0, 7t)]$ ;

**g-i:**  $Q_{d3} = [0, 0025t^3 + 0, 0020t^2 + 0, 0015t + 0, 001]$ .



Rysunek 8: Wyniki symulacji dla  $K_V = \delta \hat{M}(q)$ ,  $e_0 = 0$ . Przebiegi (a, d, g) pozycji ogniw wraz z zadanym sygnałem referencyjnym, (b, e, h) uchybów pozycji i prędkości, (c, f, i) napięć sterujących oraz odpowiadające im momenty generowane na wałach silników, o wymuszeniu:

**a-c:**  $Q_{d1} = [1 \quad 1]$ ;

**d-f:**  $Q_{d2} = [\sin(0,6t); \sin(0,7t)]$ ;

**g-i:**  $Q_{d3} = [0,0025t^3 + 0,0020t^2 + 0,0015t + 0,001]$ .



Rysunek 9: Wyniki symulacji dla  $K_V = \delta \hat{M}(q)$ ,  $e_0 = 0$ . Przebiegi (a, d, g) pozycji ogniów wraz z zadaniem sygnałem referencyjnym, (b, e, h) uchybów pozycji i prędkości, (c, f, i) napięć sterujących oraz odpowiadające im momenty generowane na wałach silników, o wymuszeniu:

**a-c:**  $Q_{d1} = [1 \quad 1]$ ;

**d-f:**  $Q_{d2} = [\sin(0,6t); \sin(0,7t)]$ ;

**g-i:**  $Q_{d3} = [0,0025t^3 + 0,0020t^2 + 0,0015t + 0,001]$ .