

Sprawozdanie z działania generatora trajektorii o trapezoidalnym profilu prędkościowym

Karolina Borkowska

13 czerwca 2018

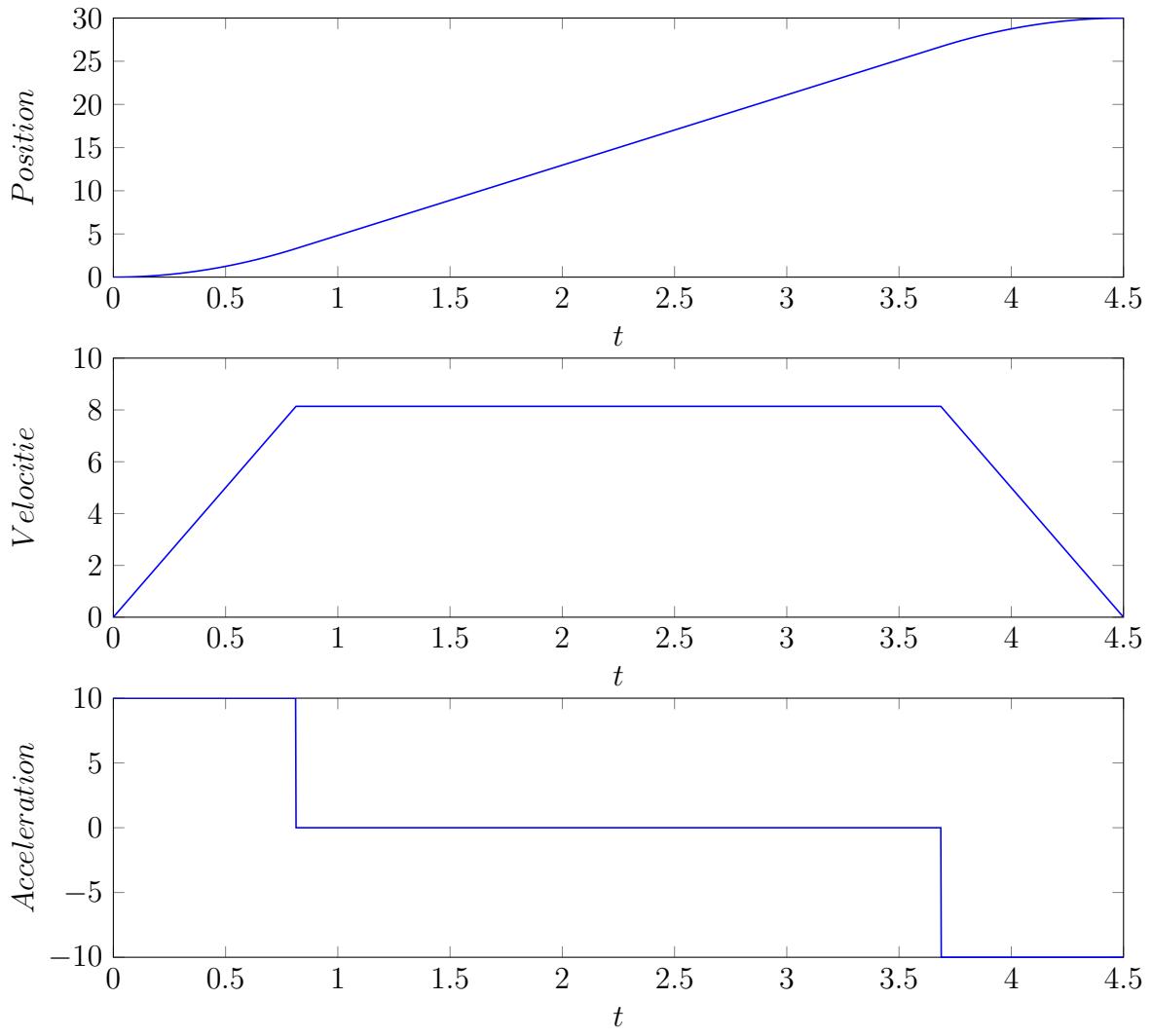
1. Wstęp

W celu zbadania właściwości kinematycznych robota IRp6 zaimplementowano generator trajektorii o profilu trapezoidalnym na podstawie równań podanych w książce *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots* napisanej przez Luigi Biagiotti'ego i Claudio Melchiorri'ego. Działa on w dwóch podstawowych trybach: czasowym i prędkościowym oraz posiada dodatkowy podtryb badawczy ograniczający dziedzinę pracy generatora.

Dwa nowe rodzaje komponentów połączono z istniejącą strukturą systemu IRPOS, zarówno poprzez pliki konfiguracyjne jak i dostęp przez api systemu. Do realizacji tego projektu nanieśiono zmiany w trzech katalogach systemu: `irp6_robot`, `irp6_ui`, `orocos_controllers`. Dodatkowo za pomocą programu Matlab napisano symulacje generatora oraz komponentu przekształcającego nastawy stawów na położenia silników. Dzięki nim można było dopracować warunki przyjęcia żądania ruchu jako poprawnego, tak by jak zmaksymalizować możliwości systemu. Ponad to skrypty Matlab'a przydatne były w ramach testowania generatora, dzięki nim można było najpierw sprawdzić jak w pełni powinna wyglądać wygenerowana trajektoria przy zadanych wartościach.

2. Trajektorie o trapezoidalnym profilu prędkościowym

By zidentyfikować właściwości kinematyczne robota IRp6 postanowiono zaimplementować generator trajektorii trapezoidalnej. Pozwala on na w prosty sposób zapewnić w określonych fazach ruchu stałą prędkość, czy przyspieszenie. Rysunek 1 przedstawia przykładową trajektorię trapezoidalną, wygenerowaną za pomocą wzorów wykorzystanych do implementacji nowych funkcjonalności w systemie IRPOS. Współczynniki na podstawie których obliczana jest w danym momencie pozycja i/lub jej pochodne, wyprowadzone zostały na podstawie wzorów podanych w książce *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots* napisanej przez Luigi Biagiotti'ego i Claudio Melchiorri'ego.



Rysunek 1: Wykresy przedstawiające przykładową trajektorię trapezoidalną oraz jej pochodne.

Na rysunku 1 fazy można jasno rozróżnić patrząc na wykresy prędkości i przyśpieszenia, które mają mocno wyodrębnione momenty zmiany przyśpieszenia. Kolejno są one opisane współczynnikami:

1. **Faza przyśpieszania** (acceleration phase):

$$ap_1 = q_i - v_i t_i + \frac{(v_{max} - v_i)t_i^2}{(2T_a)} \quad (1)$$

$$ap_2 = v_i - \frac{(v_{max} - v_i)t_i}{T_a} \quad (2)$$

$$ap_3 = \frac{v_{max} - v_i}{(2T_a)} \quad (3)$$

2. **Faza stałej prędkości** (constant velocity phase):

$$cvp_1 = q_i + \frac{(v_i - v_{max})t_i}{2} - v_{max}t_i \quad (4)$$

$$cvp_2 = v_{max} \quad (5)$$

$$cvp_3 = 0 \quad (6)$$

3. **Faza zwalniania** (deceleration phase):

$$dp_1 = q_f - v_f(t_i + T) - \frac{(v_{max} - v_f)(t_i + T)^2}{2T_d} \quad (7)$$

$$dp_2 = v_f + \frac{(v_{max} - v_f)(t_i + T)}{T_d} \quad (8)$$

$$dp_3 = \frac{(v_f - v_{max})}{2T_d}. \quad (9)$$

Gdzie q_i -położenie początkowe, q_f -położenie końcowe, v_i -prędkość początkowa, v_f -prędkość końcowa, v_{max} -prędkość maksymalna (ew. osiągana w fazie zerowego przyśpieszenia), t_i -chwila początkowa, T -czas trwania trajektorii, T_a -czas trwania fazy przyśpieszania, T_d -czas trwania fazy zwalniania.

A priori generator ma zawsze określone momenty, prędkości i położenia graniczne. Czasy trwania faz są obliczane dla każdej trajektorii w następujący sposób:

$$T_a = \frac{v_{max} - v_i}{a_{max}} \quad (10)$$

$$T_d = \frac{v_{max} - v_f}{a_{max}}. \quad (11)$$

Opcjonalnie do generatora podany może zostać czas trwania trajektorii lub prędkość maksymalna z przyśpieszeniem maksymalnym. W pierwszym przypadku prędkość fazy zerowego przyśpieszenia obliczana jest za pomocą:

$$v_{max} = \frac{1}{2}(v_i + v_f + a_{max}T - \sqrt{a_{max}^2 T^2 - 4a_{max}h + 2a_{max}(v_i + v_f)T - (v_i - v_f)^2}) \quad (12)$$

Gdzie h to dystans do przebycia.

Druga opcja wiąże się z potrzebą obliczenia czasu trwania trajektorii:

$$T = \frac{h}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{2a_{max}}(1 - \frac{v_i}{v_{max}})^2 + \frac{v_{max}}{2a_{max}}(1 - \frac{v_f}{v_{max}}) \quad (13)$$

Gdzie h to dystans do przebycia.

W tym przypadku istnieje możliwość, że nie można osiągnąć prędkości maksymalnej, stanie się tak gdy:

$$ha_{max} \leq \sqrt{v_{lim}^2 - \frac{v_i^2 + v_f^2}{2}}. \quad (14)$$

Jeśli pomimo tego wszystkie warunki poprawności zadania są spełnione, trajektoria składa się tylko z fazy przyśpieszania i zwalniania. Prędkość do jakiej generator będzie dążyć równa się:

$$v_{lim} = \sqrt{ha_{max} + \frac{v_i^2 + v_f^2}{2}}. \quad (15)$$

Należy wtedy ponownie obliczyć zmienne czasowe:

$$T_a = \frac{v_{lim} - v_i}{a_{max}} \quad (16)$$

$$T_d = \frac{v_{lim} - v_f}{a_{max}} \quad (17)$$

$$T = T_a + T_d. \quad (18)$$

Zmiany jakie następują przy “cofaniu” ($q_i > q_f$) to przemnożenie przyśpieszenia, prędkości oraz odległości przez -1 . Następuje to po obliczeniu prędkości w przypadku zadanego czasu trwania ruchu lub od razu w gdy zadawana jest prędkość maksymalna.

3. Krótki opis nowych modułów

W celu ułatwienia zapoznania się ze zmianami wprowadzonymi do IRPOS'a, przed opisem ich budowy i zmianami wprowadzonymi do ich akomodacji, najpierw pokróćce przedstawione zostaną najważniejsze nowe elementy.

Do systemu wprowadzono cztery nowe komponenty oraz dwa pakiety do obsługi komunikacji, kolejno:

- `Irp6pmTrapezoidTrajectoryGeneratorJoint`, generator trajektorii trapezoidalnej pracujący w przestrzeni stawów;
- `Irp6pmTrapezoidTrajectoryActionJoint`, komponent akcji, stanowiący interfejs pomiędzy generatorem `Irp6pmTrapezoidTrajectoryGeneratorJoint`, a IRPOS-api, (transformuje wiadomości do odpowiednich formatów i przesyła je między komponentami), sprawdza poprawność zadanych wartości, utrzymanie tolerancji błędu w trakcie ruchu oraz różnice między zadanym celem, a ostateczną konfiguracją robota;
- `Irp6pmTrapezoidTrajectoryGeneratorMotor`, generator trajektorii trapezoidalnej pracujący w przestrzeni silników, jako że stawy robota są sprzężone efekt działania tych dwóch generatorów nie jest równoważny, nawet jeśli weźmie się pod uwagę różnicę w rzędach wielkości zadanego;
- `Irp6pmTrapezoidTrajectoryActionMotor`, komponent akcji pracujący z generatorem przestrzeni silników;
- `trapezoidal_trajectory_msgs`, zbiór wiadomości stworzonych do pracy z IRPOS'em; składa się ze zgłoszenia typu “akcja” do komunikacji z IRPOS-api oraz “typowych” wiadomości ROS'owych, które przenoszą informację między komponentami, ewentualnie stanowią część wiadomości “akcji”;
- `rtt_trapezoidal_trajectory_msgs`, pakiet umożliwiający pracę `trapezoidal_trajectory_msgs` w czasie rzeczywistym.

Komponenty akcji i generatorów przestrzeni stawów i silników działają na podstawie tego samego kodu źródłowego.

4. Uruchamianie systemu w trybie nohardware

Poniżej przedstawiony jest uproszczony schemat uruchomienia systemu ze zwróceniem szczególnej uwagi na miejsca, w których naniesione zostały zmiany. Opisane zostaną najważniejsze zmiany zamieszczone w katalogu `irp6_ui`. Pominiete mogą zostać pliki pośrednie, konsolidujące kolejne skrypty lub tylko przekierowujące.

Uruchomienie systemu z perspektywy użytkownika sprowadza się do wywołania w terminalu trzech komend:

- `rosrun irp6_bringup run_common_simclock.sh`, czyli skryptu który ustawia jaki zegar ma być używany, agregatory diagnostyczne i publikatory stanu robotów.
- `roslaunch irp6_bringup irp6-*-nohardware.launch`, gdzie “*” zastąpiona zostaje przez określenie jaką częścią sprzętu użytkownik chce się zajmować. Skrypt ten uruchamia pliki odpowiedzialne za przygotowanie oprogramowania do pracy z robotami, przede wszystkim węzeł ROS’owy, pod który podczepiony jest OROSCOS’owy deployer zajmujący się uruchomieniem i organizacją komponentów.
- `rosrun rviz rviz`, opcjonalne oprogramowanie do wizualizacji robotów.

Nowo dodane komponenty uruchamiane są w kroku drugim. W jego ramach wpierw z pliku `irp6-p-inside.launch` podawane są wartości do serwera parametrów. Dopisano w nim atrybuty dla wszystkich nowych modułów. Generatory trajektorii trapezoidalnej, w przeciwieństwie do swoich odpowiedników spline’owych, otrzymują informację o maksymalnych wychyleniach stawów lub silników oraz przykładowe wartości maksymalne prędkości i przyśpieszeń. Na obecną chwilę są to bezpieczne wartości zapewniające możliwość testowania ruchu, w trakcie którego każdy z silników ma pokonać trasę w tym samym czasie. Po przeprowadzeniu identyfikacji właściwości fizycznych systemu wartości te zostaną zastąpione właściwymi.

Kolejnym etapem jest analiza skryptów OROCOS’owych. Plik `common-imports.ops` rozszerzono o nazwy katalogów, w których umieszczono żądania ich zimportowania. Do oryginalnego pliku dodano komendy dla katalogów kodów źródłowych generatora, komponentu akcji oraz wiadomości.

Ostatnią fazą uruchamiania jest analiza OROCOS’owego skryptu `irp6-p-inside.ops`. W nim komponenty są ładowane, nadaje im się parametry z serwera parametrów, oraz wywoływana jest funkcja konfiguracyjna. Ponadto, komponenty akcji mają określone priorytet i okres wywoływania. Dla nowych komponentów nadano te same wartości, które były ustalone w systemie dla ich spline’owych odpowiedników (komponenty action mają okres 0.01 sek, priorytet 2). W przypadku generatorów nie następuje bezpośrednie ustawienie częstotliwości, ani priorytetu. Są one łączone z komponentem `Irp6pScheme`, który jest instancją narzędzia `conman::Scheme`. Nakłada ono dodatkowe ograniczenia usprawniające pracę komponentów oraz zmniejsza prawdopodobieństwo wystąpienie błędu. Plik `irp6-p-inside.ops` zawiera też informacje o połączeniach portowych pomiędzy komponentami. Generatory łączy się z komponentami akcji oraz modułami odbierającymi zadane położenie i publikującymi obecne ustawienia robota. Przesyłanie wiadomości typu “akcja” pomiędzy komponentami akcji, a IRPOS-api zapewnia połączenie np. `Irp6pmTrapezoidTrajectoryActionJoint` poprzez serwis `actionlib`. Modułowi jest nadawana unikatowa nazwa w tym kontekście, znana programiście api tak by mógł on za jej pomocą skonfigurować ze swojej strony klienta. Na koniec komponenty akcji są

stratowane razem ze starymi elementami systemu, a generatory pozostają nieaktywne do momentu ich uruchomienia przez api. W ten sposób tylko jeden komponent nadaje regulatorom wartości zadane.

5. Nowe funkcje systemu IRPOS

Do IRPOS-api wprowadzono osiem nowych funkcji, które jawnie może wywoływać użytkownik:

- `move_to_motor_position_trapezoid_velocity`,
- `move_along_motor_trajectory_trapezoid_velocity`,
- `move_to_motor_position_trapezoid_duration`,
- `move_along_motor_trajectory_trapezoid_duration`,
- `move_to_joint_position_trapezoid_velocity`,
- `move_along_joint_trajectory_trapezoid_velocity`,
- `move_to_joint_position_trapezoid_duration`,
- `move_along_joint_trajectory_trapezoid_duration`,

które przyjmują kolejno:

- punkty do osiągnięcia,
- prędkości i przyśpieszenia maksymalne (tylko funkcje `velocity`),
- wartość flagi `save_data`,
- wartość flagi `research_mode`,

oraz funkcję pomocniczą do translacji kodów rezultatu ruchu:

- `trapezoid_error_code_to_string`.

Dla ułatwienia pracy z kodem wydzielono kolejną klasę `IRPOS_T`, która dziedziczy po klasie `IRPOS`, czyli oryginalnym IRPOS-api. Oprócz nowych metod do obsługi ruchu o profilu trapezoidalnym `IRPOS_T` rekonfiguruje managera `conmanSwitch` oraz dodaje nowe klienty do komunikacji z komponentami akcji.

5.1 Różnice pomiędzy metodami `motor` i `joint`

Metody `motor` i `joint` pozwalają na wykonanie zadań odpowiednio w przestrzeni silników lub stawów. Z perspektywy implementacji api różnią się one między sobą tylko wyboram innego klienta, przez co innych komponentów obliczających zadane, i wysłaniem wartości tolerancji pozycji właściwych danej przestrzeni pracy. Jakoże, pomimo możliwości osiągnięcia przez staw konkretnego położenia, może on konfliktować z ustawieniami silników, więc przed testowaniem funkcji `joint` wpierw sprawdzano czy pożądana konfiguracja robota nie powoduje naruszenia granic położenia silników. Dokonano tego za pomocą skryptów programu Matlab, które symulowały zachowanie generatorów i ułożenie silników. Warto też wspomnieć, że na poziomie komponentów OROCOS'owych nie ma różnic między kodem użyтыm do pracy w tych przestrzeniach.

5.2 Różnice pomiędzy metodami `move_to_*_position` i `move_along_*_trajectory`

IRPOS-api pozwala na zadanie zarówno pojedynczego punktu lub kilku kolejnych do osiągnięcia. Dla użytkownika najważniejszą różnicą jest sposób przekazywania celu. Funkcje `move_to_*_position` przyjmują jako pierwszy argument jednowymiarową tablicę, pojedynczy cel, a `move_along_*_trajectory` wektor wiadomości typu `JointTrajectoryPoint`, czyli cały ich zbiór.

Sprawdzanie poprawności zadanych jest normalnie podzielone na dwie części, obsługiwane w komponencie akcji i tą obliczaną przez generator. Wszystkie sprawdzane przypadki i ich kody błędów opisane są w tablicy 6.3. Tu należy jedynie wspomnieć, że przekroczenie limitów pozycji zawsze zostanie wykryte przed ruchem do kolejnego punktu, natomiast wystąpienie innych błędów sprawdzane jest przy obliczany profili prędkościowych. Efektywnie oznacza to, że przy użyciu funkcji typu `move_along_*_trajectory` może wystąpić sytuacja w której robot poruszy się do jednego z pierwszych punktów i dopiero wtedy wykryte zostanie naruszenie warunków generatora.

5.3 Metody `velocity` i `duration`

Wybór pomiędzy funkcjami `velocity`, a `duration` polega na określeniu celu ruchu. Metody `velocity` opierają obliczanie profili prędkościowych na podstawie zadanych: położenia oraz maksymalnych prędkości i przyśpieszenia. Można za ich pomocą identyfikować właściwości kinematyczne robota lub zachować większą kontrolę nad właściwościami ruchu. Nie pozwalają one jednak na zachowanie jednolitego czasu trwania ruchu na wszystkich silnikach. Wygodniejsze są metody `duration`. Zadaje się im tylko punkty do osiągnięcia, a generator sam oblicz jaki czas zajmie mu ruch na podstawie predefiniowanych parametrów. Docelowo będą to wartości zbadane podczas testów na robocie, zapewniając optymalny czas pracy. IRPOS-T, przy wysyłaniu zadanych do komponentów akcji, ustawia flagę `duration_mode`. Ustawiona na wartość "false" indywidualnie tryb prędkościowy. Dokładny sposób oraz konsekwencje działania tych dwóch trybów są opisane w sekcji 7.2.

5.4 Flagi

Każda z metod przyjmuje dwie flagi `save_data` i `research_mode`. Pierwsza z nich pozwala na zapisanie danych ruchu w pliku `IRPOS_results` w katalogu domowym. Należy jednak pamiętać, że ze względu na wymagania systemów czasu rzeczywistego, generator alokuje pamięć na wyniki w trakcie konfiguracji komponentu, a nie dynamicznie. Przez co może nastąpić niepełny zapis danych przy długim czasie wykonywania rozkazu. Działanie `research_mode` jest zależna od tego czy profil prędkościowy jest obliczany w trybie `duration`, czy `velocity`. W obu przypadkach blokuje on możliwość nadania prędkości początkowej i końcowej. Jest to wprowadzone by ułatwić pracę przy niepewnych wartościach zadanych. Komponent akcji nie sprawdza czy trasa nie wykroczyła za bardzo poza granice tolerancji w trybie badawczym. Dodatkowo w trybie `velocity` generator ma kolejny warunek: osiągnięcie maksymalnej prędkości. Oznacza to, że jeśli użytkownik chce pokonać pewną odległość, niewystarczającą do rozpoczęcia silnika przy zadanym przyśpieszeniu, generator odmówi wykonania zadania. Przemieszczenie silnika/stawu przy niższej prędkości jest możliwe, ale mijało by się z celem trybu badawczego. Tryb czasowy nie ma zaimplementowanego tego warunku, gdyż przemieszczenie wszystkich silników/stawów w tym samym czasie i osiągnięcie na każdym z nich prędkości maksymalnej jednocześnie, silnie utrudnia wykorzystanie funkcji. Poza tym tryb ten nie jest stworzony do zbadania właściwości kinematycznych robota.

5.5 Prędkości graniczne

Założenia generatora trajektorii trapezoidalnej oraz jego implementacja w systemie IRPOS pozwalały na zadanie prędkości początkowej i końcowej różnej od zera. Niemniej jednak nie zaimplementowano funkcji api, która pozwalała na ich zadanie. Nie jest to potrzebne do zbadania właściwości kinematycznych robota. W razie potrzeby można rozszerzyć funkcjonalność klasy `IRPOS_T` bez zmiany kodu komponentów OROCOS'owych.

5.6 Funkcje pomocnicze

Metoda `trapezoid_error_code_to_string` zamienia otrzymany kod wiadomości zwrotnej od komponentu akcji na jej słowny odpowiednik. Umożliwia to poinformowanie użytkownika w czytelny sposób o wyniku wywołanej funkcji. Translacja jest zgodna z kodem zapisanym w wiadomości `TrapezoidGeneratorResult`, opisanych w tablicy 6.3. Rysunek 2 przedstawia informacje jakie otrzymał użytkownik po wywołaniu dwa razy funkcji `move_along_joint_trajectory_trapezoid`. Za drugim razem zmieniono flagę `research_mode` na "True", co spowodowało przedwczesne zakończenie pracy i wystosowanie odpowiedniej wiadomości błędu.

```

kborkow@tola:~$ rosrun irp6 Bringup limits.py
the rosdep view is empty: call 'sudo rosdep init' and 'rosdep update'
[IRPOS] System ready
[IRPOS][TRAPEZOID_VELOCITY] Move along joint trajectory
[IRPOS][TRAPEZOID_VELOCITY] Result: SUCCESSFUL
kborkow@tola:~$ rosrun irp6 Bringup limits.py
the rosdep view is empty: call 'sudo rosdep init' and 'rosdep update'
[IRPOS] System ready
[IRPOS][TRAPEZOID_VELOCITY] Move along joint trajectory
[IRPOS][TRAPEZOID_VELOCITY] Result: MAX_VEL_UNREACHEABLE
[IRPOS][TRAPEZOID_VELOCITY] Max velocity unreachable. vel1=0.000000; vel2=0.0000
00; vel_max=-0.300000; acc_max=-0.200000; displacement=-0.100000; minimal acc ne
eded=-0.900000; in joint :1

```

Rysunek 2: Wiadomości zwrotne otrzymane przy pracy z nowymi funkcjami systemu IRPOS, w tym jedną z informacjami o błędzie i jego parametrach.

6. Wiadomości typu Trapezoid

Katalog `orocos_controllers` został wzbogacony o dwa nowe katalogi dotyczące przesyłania informacji pomiędzy modułami. Jeden z nich, `rtt_trapezoidal_trajectory_msgs`, to tylko nakładka pozwalająca używać nowe wiadomości w OROCOS'owym systemie czasu rzeczywistego. Drugi, `trapezoidal_trajectory_msgs`, zawiera definicje trzech typów wiadomości:

- `TrapezoidTrajectory.action`
- `TrapezoidGeneratorGoal.msg`
- `TrapezoidGeneratorResult.msg`

Pierwsza jest używana do komunikacji z IRPOS-api, pozostałe są stosowana w głębszych warstwach systemu.

6.1 TrapezoidTrajectory.action

Jak każda wiadomość opierająca się na tzw. “ROS action protocol”, stworzonym do działania z wywieszczanymi zadaniami[1], `TrapezoidTrajectory.action` dzieli się na trzy części, w pliku definiującym przedzielone trzema poziomami kreskami (“---”), które opisuje tabela 6.1. Natomiast wszystkie parametry i ich deskrypcje znajdują się w tabeli 6.1.

nazwa	ścieżka przesyłu w IRPOS'ie	opis
Goal	IRPOS-api → komponent akcji	kontener informacji o specyfikacji żądania od użytkownika i programisty IRPOS-api
Result	komponent akcji → IRPOS-api	wynik wykonanych operacji przesyłany po zakończeniu ruchu
Feedback	komponent akcji → IRPOS-api	cyklicznie przesyłane wiadomości o postępach ruchu

Tablica 1: Opis części wiadomości typu “action”

nazwa części	nazwa	typ danych	opis
Goal	trajectory	trajectory_msgs/ JointTrajectory	zadana trajektoria (punkty, prędkości i przyśpieszenia końcowe, itp.)
	path_tolerance	control_msgs/ JointTolerance[]	tolerancja błędu definiowana dla każdego silnika.
	research_mode	bool	flaga trybu badawczego, patrz 5.4
	duration_mode	bool	flaga trybu duration, patrz 5.3
	save_data	bool	flaga zapisu danych, patrz 5.4
	max_velocities	float64[]	prędkości maksymalne, działa tylko w trybie velocity, patrz 5.3
	max_accelerations	float64[]	przyśpieszenia maksymalne, działa tylko w trybie velocity, patrz 5.3
Result	result	TrapezoidGeneratorResult	wiadomość tożsama z tą którą zwraca komponentowi akcji generator, stąd postanowiono użyć jej bezpośrednio; pełna definicja: 6.3
Feedback	header	Header	nagłówek
	joint_names	string[]	używane nazwy silników/stawów
	desired	trajectory_msgs/ JointTrajectoryPoint	punkt zadany przez generator
	actual	trajectory_msgs/ JointTrajectoryPoint	punkt osiągnięty przez robota
	error	trajectory_msgs/ JointTrajectoryPoint	błąd regulacji

Tablica 2: Dokładny opis wszystkich zmiennych używanych w wiadomości `TrapezoidTrajectory.action`

6.2 TrapezoidGeneratorGoal.msg

`TrapezoidGeneratorGoal.msg` jest zwykłą wiadomością ROS'ową, która przesyłana jest od komponentu akcji do generatora. Jest ona tożsama z częścią Goal przedstawionej w tabeli [6.1](#). Rozdzielenie jest pozostałością po wersji, w której istniało dużo różnić między tymi elementami.

6.3 TrapezoidGeneratorResult.msg

Wynik ruchu jest sygnalizowany komponentowi akcji przez generator poprzez wysłanie wiadomości typu `TrapezoidGeneratorResult.msg`. Składa się ona z ciągu znaków, który jest wy-

pełniony jeśli nastąpił błąd w trakcie obliczania profilu prędkościowego oraz kodu zwrotnego, którego znaczenie jest zdefiniowane w tym samym pliku. Pisemna wiadomość została stworzona po to by łatwiej było dobrać nastawy, które będą znajdować się w przestrzeni możliwości generatora trapezoidalnego. Tabela 6.3 zawiera opis parametrów `TrapezoidGeneratorResult`, a tabela 6.3 opis możliwych kodów. Warto wspomnieć, że pierwsze sześć kodów pokrywa się z używanymi przy generowaniu trajektorii spline'owych. Część `error_string` nie występuje wiadomościach stosowanych przez stary generator.

nazwa	typ danych	opis
<code>error_string</code>	<code>string</code>	dane błędu
<code>error_code</code>	<code>int32</code>	kod błędu

Tablica 3: Parametry wiadomości `TrapezoidGeneratorResult`

kod	nazwa	znaczenie
0	SUCCESSFUL	robot osiągnął pożądany cel
-1	INVALID_GOAL	co najmniej jeden z zadanych punktów znajduje się poza przestrzenią osiągalną przez silnik/staw
-2	INVALID_JOINTS	nazwy silników/stawów lub ich liczba podane w wiadomości Goal nie pokrywają się z tymi, które otrzymano z serwera parametrów
-3	OLD_HEADER_TIMESTAMP	błędny czas w nagłówku
-4	PATH_TOLERANCE_VIOLATED	w trakcie ruchu błąd regulacji jest zbyt duży
-5	GOAL_TOLERANCE_VIOLATED	ostateczne położenie jest zbyt daleko od zadanego
-6	INVALID_LIMIT_ARRAY	w trybie prędkościowym podano mniej maksymalnych prędkości i/lub przyśpieszeń, niż jest zadeklarowanych silników/stawów
-7	TRAJECTORY_NOT_FEASIBLE	jeden z warunków trajektorii trapezoidalnej nie został spełniony
-8	CANT_CALCULATE_COEFFS	błąd wystąpił przy obliczaniu współczynników profilu prędkościowego
-9	MAX_VEL_UNREACHABLE	w przypadku zadanych warunków niemożliwe jest osiągnięcie maksymalnej prędkości, patrz 5.4
-10	BREACHED_POS_LIMIT	zadana trajektoria przechodzi (nie w miejscu początkowym lub końcowym) przez miejsce wykraczające poza limity silnika/stawu, możliwe tylko gdy prędkość początkowa/końcowa jest większa od tej jaką należy osiągnąć w fazie bez przyśpieszenia
-11	ACC_TOO_SMALL_FOR_DURATION	niemożna osiągnąć celu w zadanym czasie, przy danym przyśpieszeniu maksymalnym
-12	DURATION_TOO_LONG	trwanie ruchu zbyt długie, duży skok w fazie przyśpieszania, występuje przy niektórych prędkościach początkowych/końcowych o wartości bezwzględnej większej od tej z fazy zerowego przyśpieszenia
-13	DURATION_TOO_SHORT	trwanie ruchu zbyt krótkie, duży skok w fazie spowalniania, występuje przy niektórych prędkościach początkowych/końcowych o wartości bezwzględnej większej od tej z fazy zerowego przyśpieszenia
-14	IMPOSSIBLE_VELOCITY	prędkość obliczona w trybie <code>duration</code> , jest o wartości bezwzględnej większej niż prędkość maksymalna.

Tablica 4: Parametry wiadomości `TrapezoidGeneratorResult`

7. Nowe komponenty OROCOS

Zaimplementowano dwa nowe komponenty OROCOS'owe. Komponent akcji oraz generator trajektorii. Bazują one na ich odpowiednikach dla trajektorii spline'owych. Ich kody znajdują się w katalogu `orocos_controllers`. Drobne zmiany jakie wprowadzono względem oryginalnego kodu (typu deklarowanie, konfiguracja nowych wektorów itp.) zostaną pominięte.

7.1 Komponent akcji

Zaimplementowany w plikach `InternalSpaceTrapezoidTrajectoryAction.cpp` i `InternalSpaceTrapezoidTrajectoryAction.hpp`, komponent rozpoczyna swój cykl życia od zimportowania kolejnych parametrów z serwera ROS'owego:

- `joint_names`, nazwy silników/stawów w zależności od przestrzeni pracy;
- `lower_limits`, dolne położenia możliwe do osiągnięcia przez silniki/stawy;
- `upper_limits`, górne położenia możliwe do osiągnięcia przez silniki/stawy.

Zgodnie ze strukturą komponentów OROCOS'owych, działających cyklicznie, moduł ma funkcję `updateHook` wraz z dwiema metodami pomocniczymi `configureHook` oraz `stratHook`, ich implementacja jest wymagana[5]. Obie funkcje konfiguracyjne wywoływane są w skrypcie `irp6-p-inside.ops`. Metoda `configureHook` inicjuje wektory danych do odpowiednich rozmiarów, oraz sprawdza, czy otrzymano odpowiednią liczbę ograniczeń. Natomiast funkcja uruchamiająca pracę komponentu uruchamia serwer akcji, ale ustawia flagę aktywnego celu na `false`, skąd komponent wie, że w danym momencie nie jest przeprowadzane przetwarzanie celu. Jednakże, by w pełni móc przedstawić działanie metody `updateHook`, należy najpierw opisać funkcję `goalCB`. Jest ona asynchronicznie wywoływana, w razie odebrania z wyższej warstwy systemu (IRPOS-api) części `Goal` z wiadomości `TrapezoidTrajectory.action`. Jeśli w danym momencie jest przetwarzana już jakaś trajektoria nowy cel zostaje odrzucony. W przeciwnym przypadku komponent wykonuje kolejne czynności:

1. wypełnienie `remapTable` odpowiedzialnej za zmapowanie nazw podanych w wiadomości na kolejność nadaną w serwerze parametrów; w razie niepowodzenia, czyli niezgodnej liczby nazw silników/stawów, wysyłany jest kod błędu `INVALID_JOINTS`;
2. sprawdzenie czy wszystkie zadane punkty mieszczą się w ograniczeniach; w wypadku nie spełnienia tego warunku w którymkolwiek punkcie wysyłany jest błąd `INVALID_GOAL`;
3. jeśli użytkownik ustawił flagę `duration_mode` na `false`, sprawdzona zostaje liczba zadanych prędkości i przyśpieszeń maksymalnych; niezgodna z zadeklarowaną liczbą silników/stawów powoduje wysłanie wiadomości o błędzie `INVALID_LIMIT_ARRAY`;
4. na podstawie `remapTable` zmapowane zostają wszystkie zadane, łącznie z tablicami ograniczeń kinematycznych;
5. sprawdzona zostaje poprawność czasu podanego w nagłówku; błąd wywołuje odesłanie kodu `OLD_HEADER_TIMESTAMP`;
6. jeśli uda się połączyć ze wszystkimi komponentami rówieśniczymi wypełniona i wysłana do generatora zostaje wiadomość typu `TrapezoidGoal`.

Niespełnienie któregokolwiek z warunków generujących błąd lub problem przy uruchomieniu rówieśników przerywa przetwarzanie wiadomości i wywołuje odrzucenie zadanego celu. Nowością względem komponentu akcji trajektorii spline'owej jest przetwarzanie maksymalnych prędkości i przyśpieszeń oraz przepisywanie ich wraz z flagami. Dla wygody przebudowano stary kod i przeniesiono jego fragmenty do dedykowanych funkcji.

Metoda `updateHook` (zgodnie z ustawieniami z dnia pisania) wywoływana jest co 0.01 sekundy. Zadania jakie kolejno wykonuje to:

1. odczyt danych o realnym i zadanym położeniu silników/stawów;
2. sprawdzenie czy generator zasygnalizował zakończenie wykonywania trajektorii i reakcja zależnie od otrzymanego wyniku oraz ułożenia robota;
3. analiza możliwość przekroczenia tolerancji ścieżki (pomijane w trybie `research_mode`);
4. wysyłanie części Feedback z wiadomość typu “action”.

Naturalnie punkt drugi wykonywany będzie najrzadziej oraz zablokuje wykonywanie kolejnych czynności. Ponad to punkt trzeci i czwarty zostaną aktywowane tylko jeśli aktywny jest cel oraz otrzymano nowe dane o konfiguracji robota. Wykrycie przekroczenia ograniczeń ścieżki lub celu skutkuje odesłaniem do użytkownika odpowiedniej wiadomości błędu (6.3) oraz odrzuceniem celu. Wygenerowane informacje o błędach przy obliczaniu profili prędkościowych powodują tą samą reakcję. Ponownie wprowadzoną zmianą jest przebudowanie kodu, w tym oddelegowanie części zadań do odpowiedni nazwanych funkcji oraz sposób ustalania zakończenia pracy nad celem (zamiast sprawdzania, czy minął zadany czas ruchu, komponent oczekuje na wiadomość od generatora).

7.2 Generator trajektorii

Kod źródłowy generatora rozłożony jest na dwa pliki: `InternalSpaceTrapezoidTrajectoryGenerator.cpp` i `velocityprofile_trapezoid.cpp` oraz ich pliki nagłówkowe. Jest to zgodne z konwencją przyjętą dla generatora spline'owego. Komponent `InternalSpaceTrapezoidTrajectoryGenerator` w trakcie konfiguracji zwiększa wektor `vel_profile` zgodnie z podaną w parametrach liczbą silników/stawów, co równoważne jest wywołaniu tej samej liczby konstruktorów domyślnych klasy `velocityprofile_trapezoid`. Stąd komunikacja między komponentem, a jego obiektami profili prędkościowych opiera się na wywoływaniu zadanych funkcji i zwracania wartości, które odpowiadają wiadomościom podanym w tabeli 6.3. Wpierw opisane zostanie działanie komponentu, a następnie jego klasy pomocniczej.

7.2.1 InternalSpaceTrapezoidTrajectoryGenerator

Tak samo jak w przypadku komponentu akcji, konstruktor inicjuje pola klasy wartościami domyślnymi, konfiguruje porty komponentu oraz pobiera kolejne parametry z serwera ROS'owego:

- `number_of_joints`, liczba silników/stawów;
- `ns_interval`, parametr tolerancji opóźnień/przyśpieszeń wywołania funkcji `updateHook`;
- `lower_limits`, dolne położenia możliwe do osiągnięcia przez silniki/stawy;

- `upper_limits`, górne położenia możliwe do osiągnięcia przez silniki/stawy;
- `max_velocities`, prędkości maksymalne (obecnie bezpieczne wartości, które po badaniach zostaną zamienione na właściwe);
- `max_accelerations`, przyśpieszenia maksymalne (obecnie bezpieczne wartości, które po badaniach zostaną zamienione na właściwe).

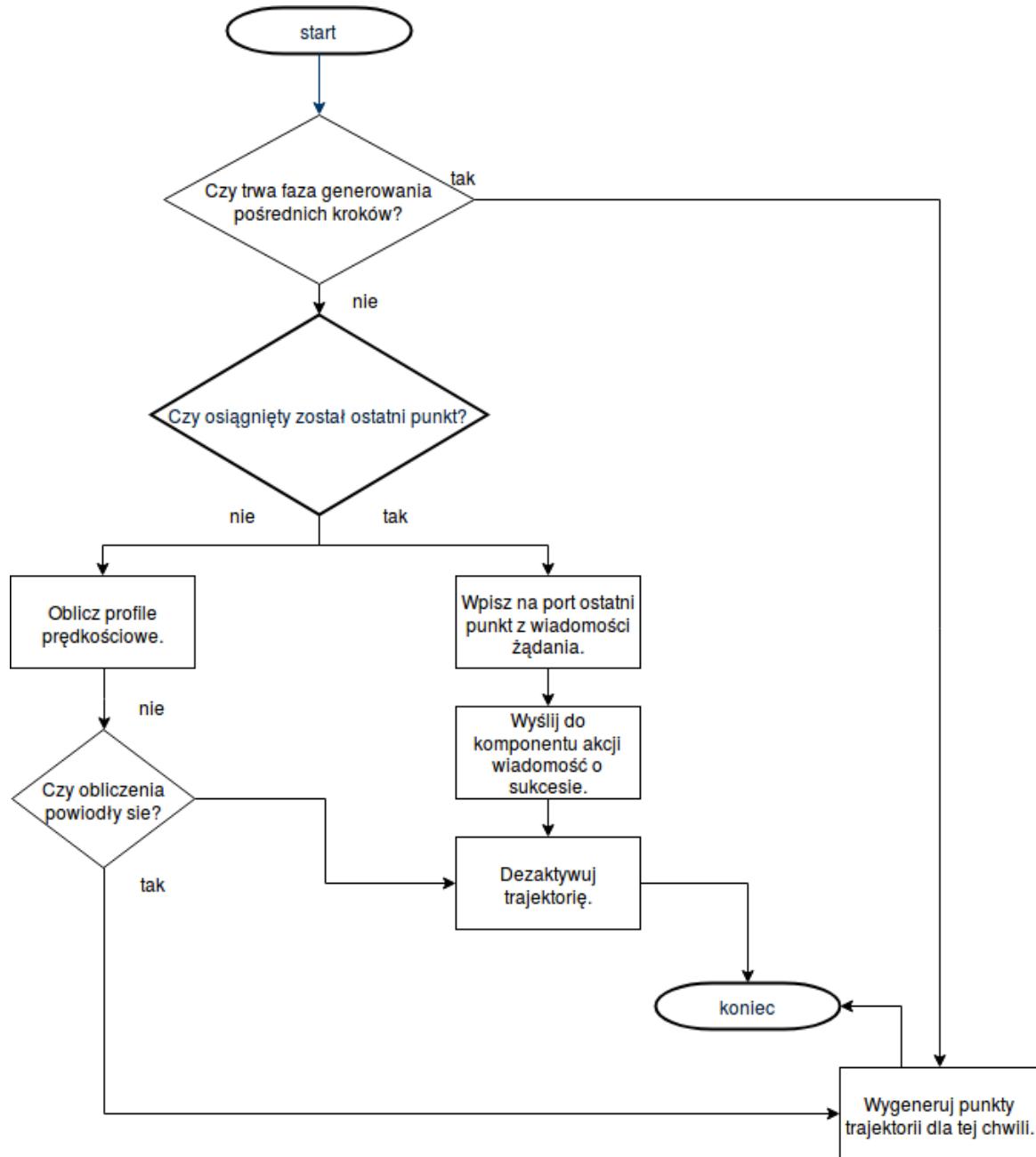
W przypadku generatora mamy do czynienia tylko z czterema funkcjami właściwymi komponentem OROCOS'owym. Są to metody `*Hook`. Funkcję konfiguracyjną `configureHook` można pokróćce opisać jako inicjalizującą porty (`setDataSample`) oraz zmienne zależne od parametrów pobranych z serwera. Wywoływana jest ona na etapie przetwarzania skryptu `ipr6-p-inside.opt`. Warto zauważyć, że w momencie uruchamiania skryptu użytkownika komponent wciąż nie jest gotowy do synchronicznej pracy, bo w przeciwieństwie do `InternalSpaceTrapezoidTrajectoryAction`, pliki wywoływanego przez `roslaunch ipr6_bringup ipr6-*-nohardware.launch` nie zawierają komendy start dla niego. Dopiero gdy wywołana zostanie jedna z metod opisanych na początku sekcji 5, poprzez `connmanSwitch` api aktywuje generator. Zapewnia to brak konfliktów między różnymi generatorami, korzystającymi z tych samych portów. Dopiero teraz metoda `startHook` sygnalizuje aktywność komponentu przez porty synchronizacji. Zmiany jakie wprowadzono do wyżej wymienionych funkcji są drobne i polegają na inicjalizacji dodanych pól.

Najważniejszą częścią komponentu jest metoda `updateHook`. Każde jej wywołanie pociąga za sobą zasygnalizowanie o aktywności komponentu oraz sprawdzenie czy nadesłany został nowy cel. Niezależnie od wyniku poprzedniego testu, czyli od tego czy w danym momencie wektor zadanych punktów trajektorii pochodzi z pierwszego odczytu położenia silników/stawów, czy z obliczeń klas profili prędkościowych, na port zadanych wpisywana jest zawartość zmiennej `setpoint_`. Co więcej przy fladze `save_data` ustawionej na `true` przed wysłaniem danych zostaną one zapisane do wektorów-kontenerów. Ze względu na naturę procesów czasu rzeczywistego predefiniowana jest wielkość wektorów, więc przy długim czasie pracy generatora może dojść do niepełnego zapisu. Nadejście nowej wiadomości od komponentu akcji skutkuje przepisaniem danych z niej do pól obiektu generatora oraz ustawieniem wartości zmiennej `trajectory_active_` na `true`. Ta flaga, obok poprawności nagłówka wiadomości, jest sprawdzana przed rozpoczęciem jakichkolwiek obliczeń. Zachowano z generatora spline'owego nadpisywanie w przypadku gdy w trakcie pracy nad jednym celem przyjdzie nowe żądanie.

Gdy aktywny jest cel, w zależności od trybu zdefiniowanego przez użytkownika, uruchamiana jest jedna z dwóch metod:

- `updateHookWithVelocityBasedProfiles`;
- `updateHookWithDurationBasedProfiles`.

Ich działanie niewiele różni się od siebie. Postanowiono zastosować oddzielne funkcje ze względu na ewentualne łatwiejsze wprowadzanie oddzielnich, bardziej prawdopodobnych zmian. Schemat działania (uogólniony dla obu trybów) pokazany jest na rysunku ???. Każdy z kroków przedstawiony na tym schemacie (poza start i koniec) to metoda komponentu. Obliczanie profili prędkościowych wiąże się z wywołaniem odpowiedniej dla trybu działania metody obiektu klasy `velocitiprofile_trapezoid`. Dodatkowo niepowodzenie przy obliczaniu profilu wywołuje wysłanie wiadomości o niepowodzeniu do komponentu akcji, a przy fladze `save_data` ustawionej na `true` dezaktywacja trajektorii powoduje zapis danych na dysk.



Rysunek 3: Schemat pracy uogólniony dla obu trybów pracy `updateHook`.

Różnice pomiędzy działaniem funkcji dla trybu prędkościowego i czasowego podsumowane są w tablicy 7.2.1.

etap	tryb czasowy	tryb prędkościowy
sprawdzenie czy trwa faza generowania kroków;	testowanie czy minął czas przeznaczony na daną fazę;	testowanie czy wszystkie flagi aktywności silników/stawów ustawione są na <i>false</i> ;
obliczanie profilu prędkościowego	poprzedzone poszukiwaniem, który z silników/stawów ma do przebycia najdłużej trwającą trasę i przypisanie tego czasu zadanemu okresowi ruchu dla wszystkich silników/stawów; wykorzystuje metodę <code>setProfileVelocity</code> klasy <code>velocityprofile_trapezoid</code>	wykorzystuje metodę <code>setProfileVelocity</code> klasy <code>velocityprofile_trapezoid</code>

Tablica 5: Różnice pomiędzy dzianiem funkcji `updateHook` w zależności od ustawionego trybu

Komponent, choć wzorowano się na odpowiedniku spline'owym, poza funkcjami konfiguracyjnymi został stworzony od nowa.

7.2.2 `velocityprofile_trapezoid`

Trzy zadania generatora zostały oddelegowane do klasy `velocityprofile_trapezoid`:

- sprawdzenie poprawności żądania;
- obliczenie współczynników profilu prędkościowego;
- obliczanie pozycji/prędkości/przyspieszenia dla danego momentu.

Tablica 7.2.2 przedstawia jakie warunki muszą zostać spełnione by żądanie zostało uznane za wykonywalne. Odpowiadają one błędom od -7 do -14 z tablicy 6.3.

warunek	tryb pracy	opis
$T \geq T_a + T_d$	czasowy	jeśli trajektoria określana jest na podstawie czasu trwania, przyśpieszenie maksymalne musi być wystarczająco duże by czas fazy przyśpieszenia i zwalniania łącznie nie przekroczyły czasu trwania ruchu;
$ v \leq v_{max}$	czasowy	obliczona prędkość nie może być większa od maksymalnej
$v_{max} \geq 0$	czasowy	ustalono konwencję, wg. której należy podawać prędkości maksymalne jako wartości bezwzględne
$v_{max} > 0$	prędkościowy	oprócz konwencji podawania wartości bezwzględnej, warunek ten chroni przed podaniem zera do obliczania czasu trwania ruchu, skutkowałoby to dzieleniem przez zero;
$v_i \wedge v_f = 0$	badawczy	ustalono konwencję, wg. której w trybie badawczym prędkości skrajne muszą być zerami
$a_{max}h < \frac{ v_0^2 - v_f^2 }{2}$	wszystkie	przy dany przyśpieszeniu maksymalnym, dystans może być za krótki by można było go przebyć przy zachowaniu podanych wartości granicznych prędkości;
$T > 0$	wszystkie	sprawdzanie przed obliczeniem współczynników, w tym momencie taki czas trwania sygnalizuje błąd obliczeń; zerowy czas trwania, czyli brak ruchu, powinien zostać wykryty wcześniej;
$T \neq 0$	czasowy	czas trwania ruchu musi być większy od zera, jeśli jest równy zeru od razu wysyłana zostaje wiadomość o dotarciu do celu;
$ s \geq \varepsilon$	prędkościowy	droga musi być większa niż ustalona granica błędu położenia, jeśli jest mniejsza od razu wysyłana zostaje wiadomość o dotarciu do celu;
brak skoków trajektorii w punktach T_a i T_d	wszystkie	istnieje możliwość, iż przy zadaniu prędkości granicznych większych niż prędkość fazy zerowego przyśpieszenia, nastąpi skok trajektorii w punktach zmiany fazy; jest to wykrywane po obliczeniu współczynników, dzięki czemu, kilka przypadków takiego określenia prędkości zostaje przyzwolonych;
brak przekroczeń położień granicznych	wszystkie	istnieje możliwość, że przy niezerowych prędkościach granicznych ich osiągnięcie wiąże się z przejściem przez punkty położone za celem;
$T > T_a + T_d$	prędkościowy-badawczy	jeśli czas trwania jest równy czasowi trwania faz przyśpieszenia i spowolnienia nie występuje faza zerowego przyśpieszenia, więc niemożliwe jest zbadanie prędkości maksymalnej;

Tablica 6: Warunki realizowalności żądania użytkownika

Współczynniki profilu prędkościowego obliczane są na podstawie wzorów z sekcji 2. Natomaiast obliczanie położenia dla danej chwili następuje przy wywołaniu publicznej funkcji przez klasę główną generatora. Przemnażają one współczynniki przez kolejne potęgi podanej chwili t .

8. Testowanie

Testowanie generatora rozpoczęto od sprawdzenia, czy działał on przy najprostszych przykładach. Następnie przetestowano wykrywanie nierealizowanych zadanych. Każda próba została poprzedzona oceną zadanych za pomocą skryptów Matlab'owych. Dla funkcji działających w przestrzeni stawów dodatkowo sprawdzano czy przeniesienie trajektorii do przestrzeni silników nie spowoduje problemów. Wyniki oceniano na podstawie zebranych danych o położeniach trajektorii wytworzonej przez generator, ostatecznego wyniku pobranego przez IRPOS-api oraz na podstawie obrazu wizualizacji. Każda z funkcji przedstawionych w sekcji 5 została przetestowana oddzielnie. Zgodnie z założeniami przedstawionymi w sekcji 5.5, nie testowano nadania prędkości granicznych.

8.1 move_to_motor_position_trapezoid_velocity

Testowanie funkcji działającej w przestrzeni silników w trybie prędkościowym.

8.1.1 Proste działanie w trybie niebadawczym

Początkowo zadano nastawy, które wymuszały ruch tylko jednego silnika. Podane są w tablicy 7, każdy wiersz reprezentuje oddzielną symulację. Następnie zastosowano te same nastawy, ale tym razem jednocześnie. W kolejnym kroku przeprowadzono symulację ruchu w drugą stronę.

Ze względu na liczbę symulacji wykresy z wynikami pierwszych dwóch testów przedstawiono tylko dla jednego silnika. Rysunek 6 jest zbiorem wykresów kolejnych stawów, gdy uruchomiono zmianę położień z tabeli 7 jednocześnie. Widać na nim, że zgodnie z założeniami trybu prędkościowego każdy staw kończy poruszanie się w innym momencie.

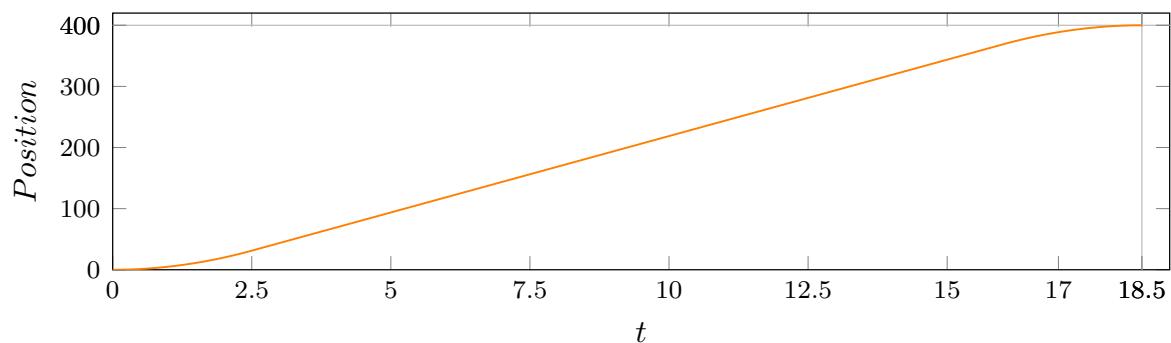
silnik	q_i	q_f	v_i	v_f	v_{max}	a_{max}	wynik symulacji
1	0.0	400.0	0.0	0.0	25.0	10	✓
2	0.0	100.0	0.0	0.0	35.0	20	✓
3	0.0	100.0	0.0	0.0	35.0	20	✓
4	0.0	350.0	0.0	0.0	35.0	20	✓
5	0.0	400.0	0.0	0.0	35.0	20	✓
6	0.0	2000.0	0.0	0.0	35.0	20	✓

Tablica 7: Wyniki symulacji najprostszego przypadku, badanie oddzielnych silników.

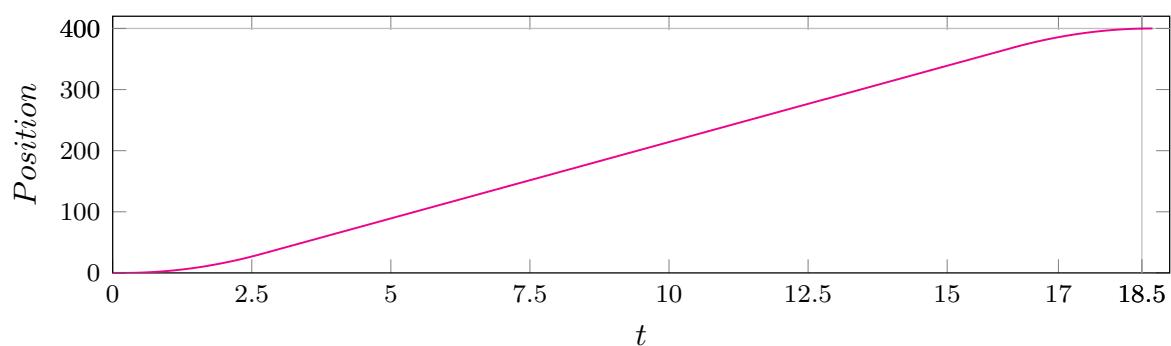
silnik	q_i	q_f	v_i	v_f	v_{max}	a_{max}	wynik symulacji
1	0.0	-400.0	0.0	0.0	25.0	10	✓
2	0.0	-100.0	0.0	0.0	35.0	20	✓
3	0.0	-70.0	0.0	0.0	35.0	20	✓
4	0.0	-60.0	0.0	0.0	35.0	20	✓
5	0.0	-70.0	0.0	0.0	35.0	20	✓
6	0.0	-900.0	0.0	0.0	35.0	20	✓

Tablica 8: Wyniki symulacji najprostszego przypadku, badanie oddzielnych silników.

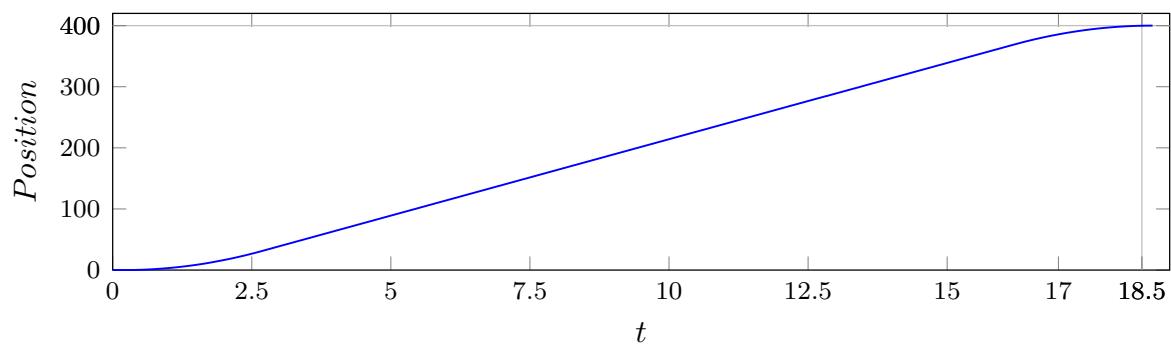
Symulacja generatora



Zadane generatora

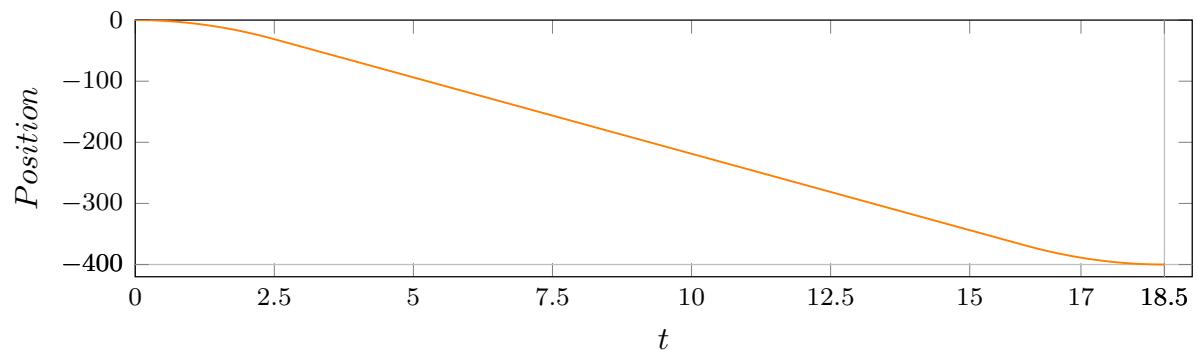


Wyniki symulacji

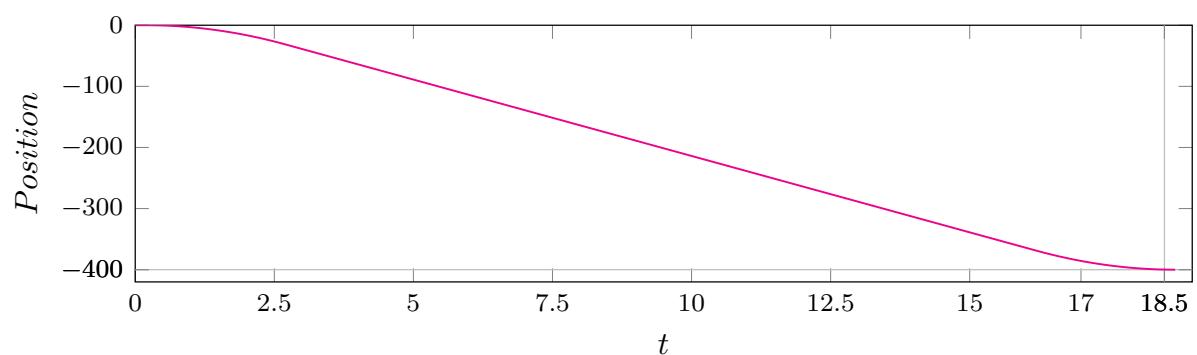


Rysunek 4: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_motor_position_trapezoid_velocity` przy nastawach z tabeli 7.

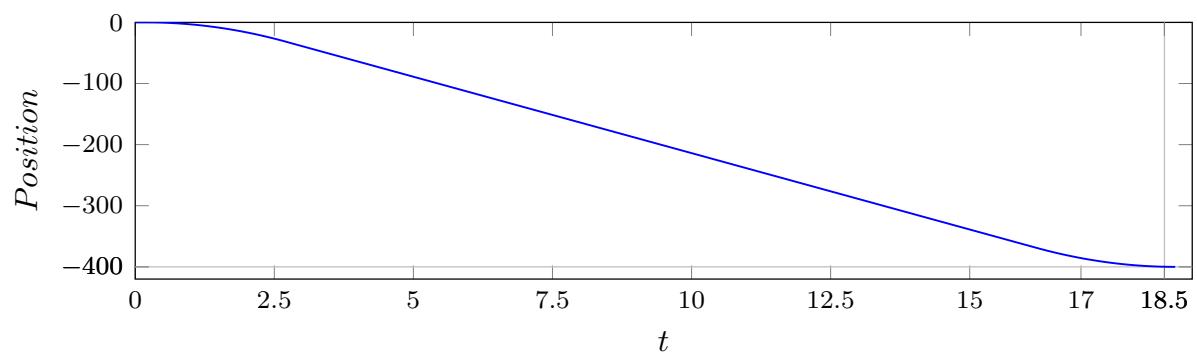
Symulacja generatora



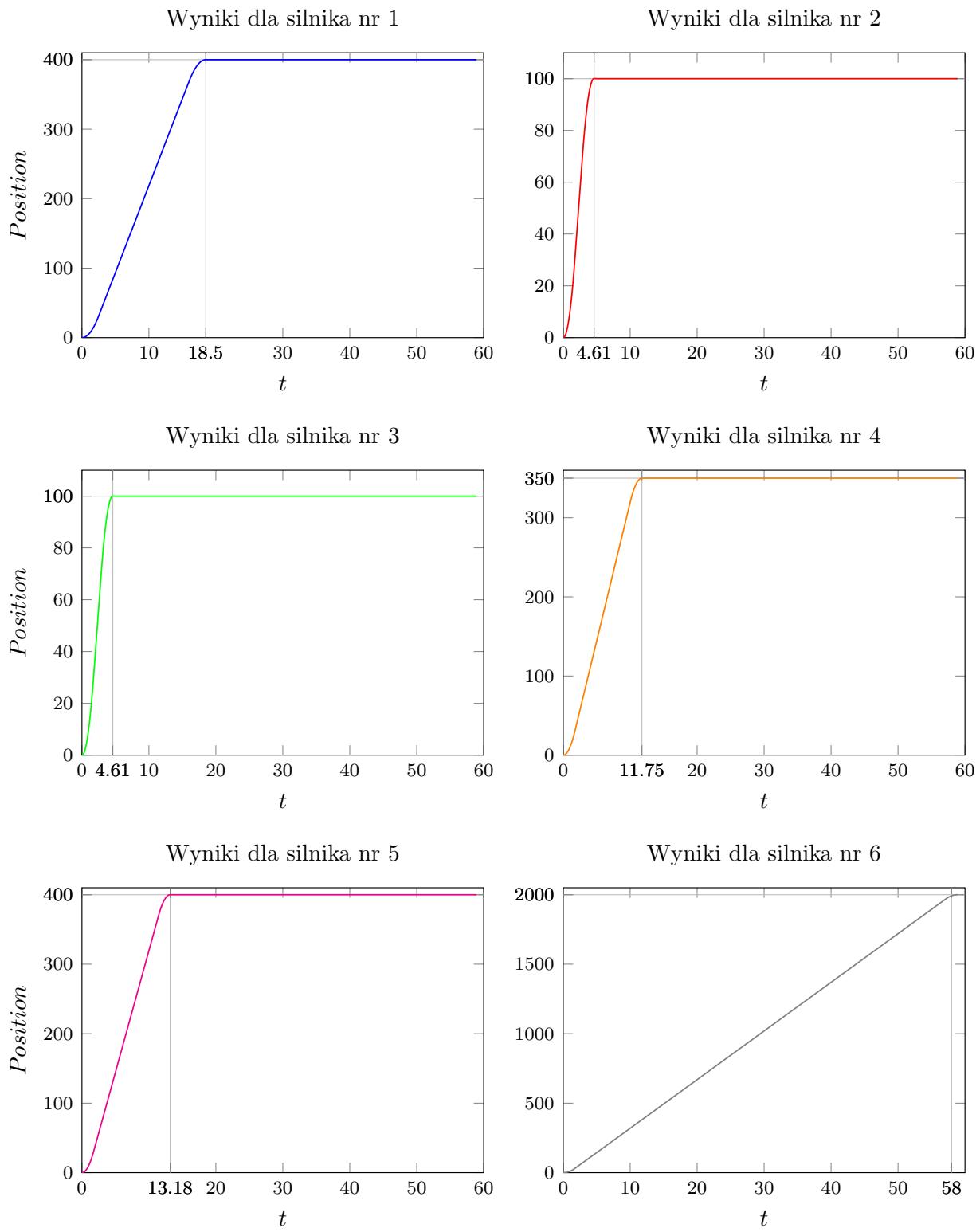
Zadane generatora



Wyniki symulacji



Rysunek 5: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_motor_position_trapezoid_velocity` przy nastawach z tabeli 7.



Rysunek 6: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_motor_position_trapezoid_velocity` przy nastawach z tabeli 7.

8.1.2 Proste działanie w trybie badawczym

Porównano wyniki dla z poprzedniej sekcji, tym razem uruchamiając tryb badawczy. Spodziewano się, że tylko w przypadku ruchu wstecznego na silniku 4, odległość do przebycia będzie zbyt krótka do osiągnięcia maksymalnej prędkości, ergo odesłana zostanie wiadomość **MAX_VEL_UNREACHEABLE**.

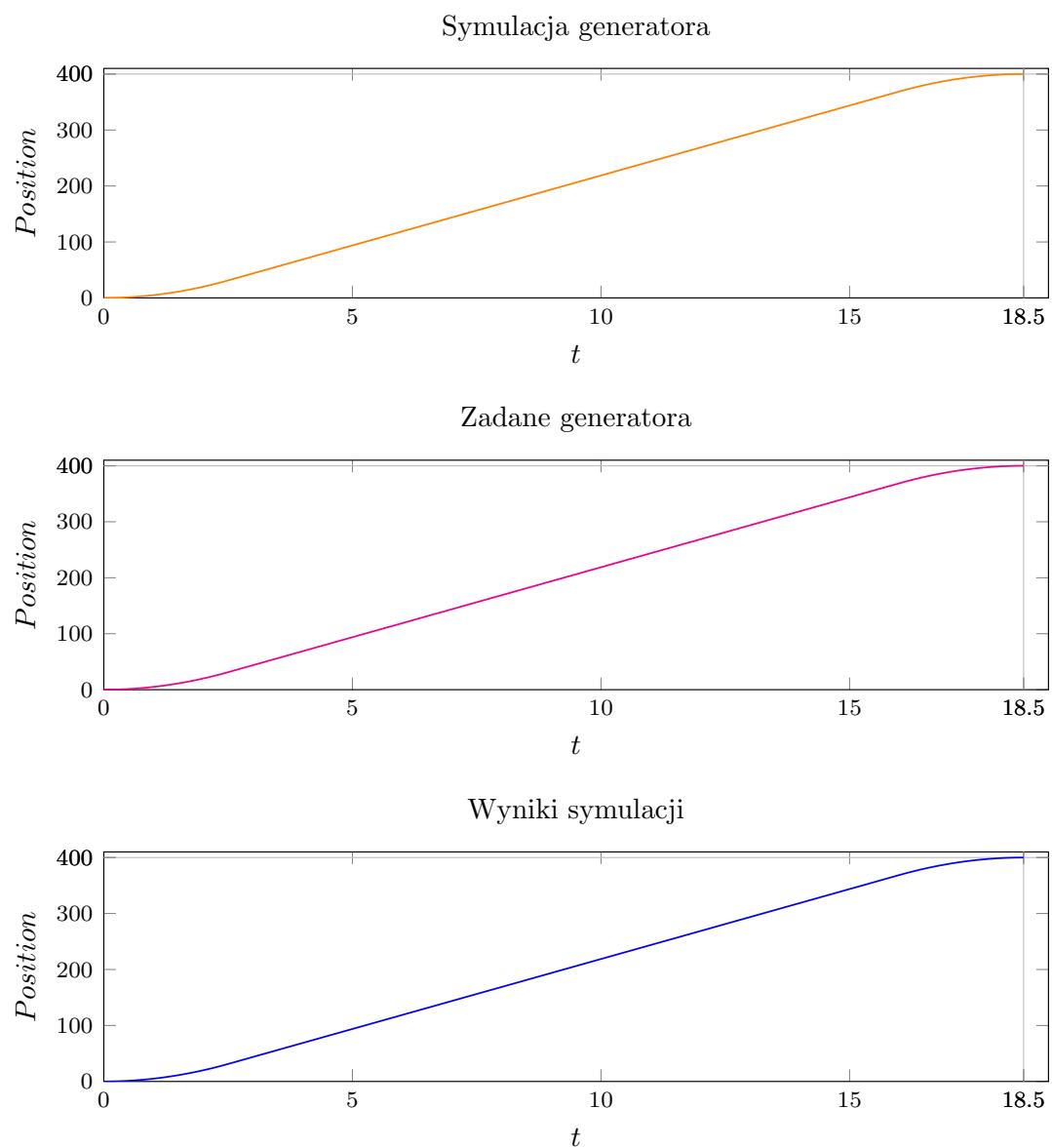
silnik	q_i	q_f	v_i	v_f	v_{max}	a_{max}	wynik symulacji
1	0.0	400.0	0.0	0.0	25.0	10	✓
2	0.0	100.0	0.0	0.0	35.0	20	✓
3	0.0	100.0	0.0	0.0	35.0	20	✓
4	0.0	350.0	0.0	0.0	35.0	20	✓
5	0.0	400.0	0.0	0.0	35.0	20	✓
6	0.0	2000.0	0.0	0.0	35.0	20	✓

Tablica 9: Wyniki symulacji najprostszego przypadku, badanie oddzielnych silników. Tryb badawczy.

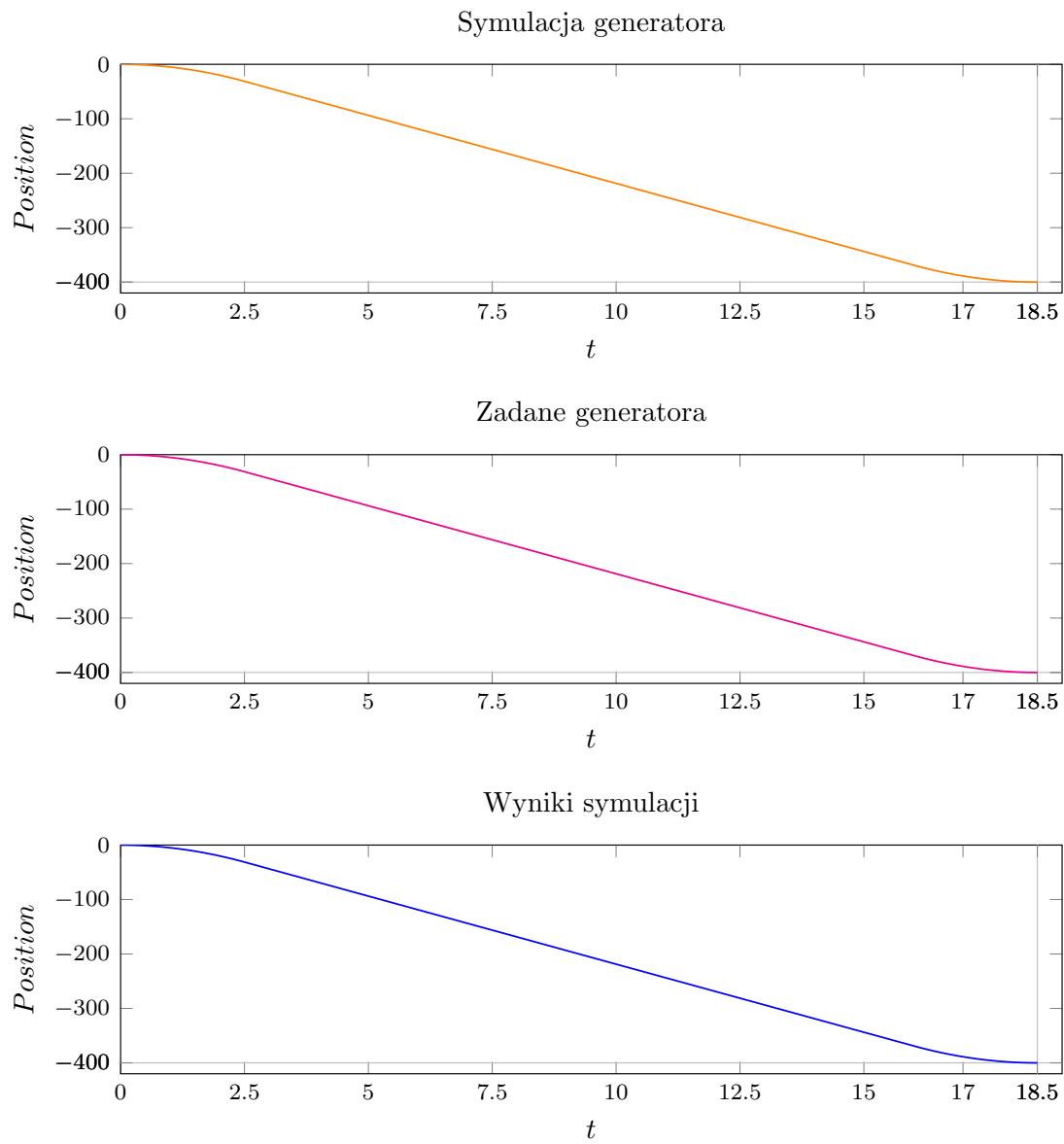
silnik	q_i	q_f	v_i	v_f	v_{max}	a_{max}	wynik symulacji
1	0.0	-400.0	0.0	0.0	25.0	10	✓
2	0.0	-100.0	0.0	0.0	35.0	20	✓
3	0.0	-70.0	0.0	0.0	35.0	20	✓
4	0.0	-60.0	0.0	0.0	35.0	20	X
5	0.0	-70.0	0.0	0.0	35.0	20	✓
6	0.0	-900.0	0.0	0.0	35.0	20	✓

Tablica 10: Wyniki symulacji najprostszego przypadku, badanie oddzielnych silników. Tryb badawczy.

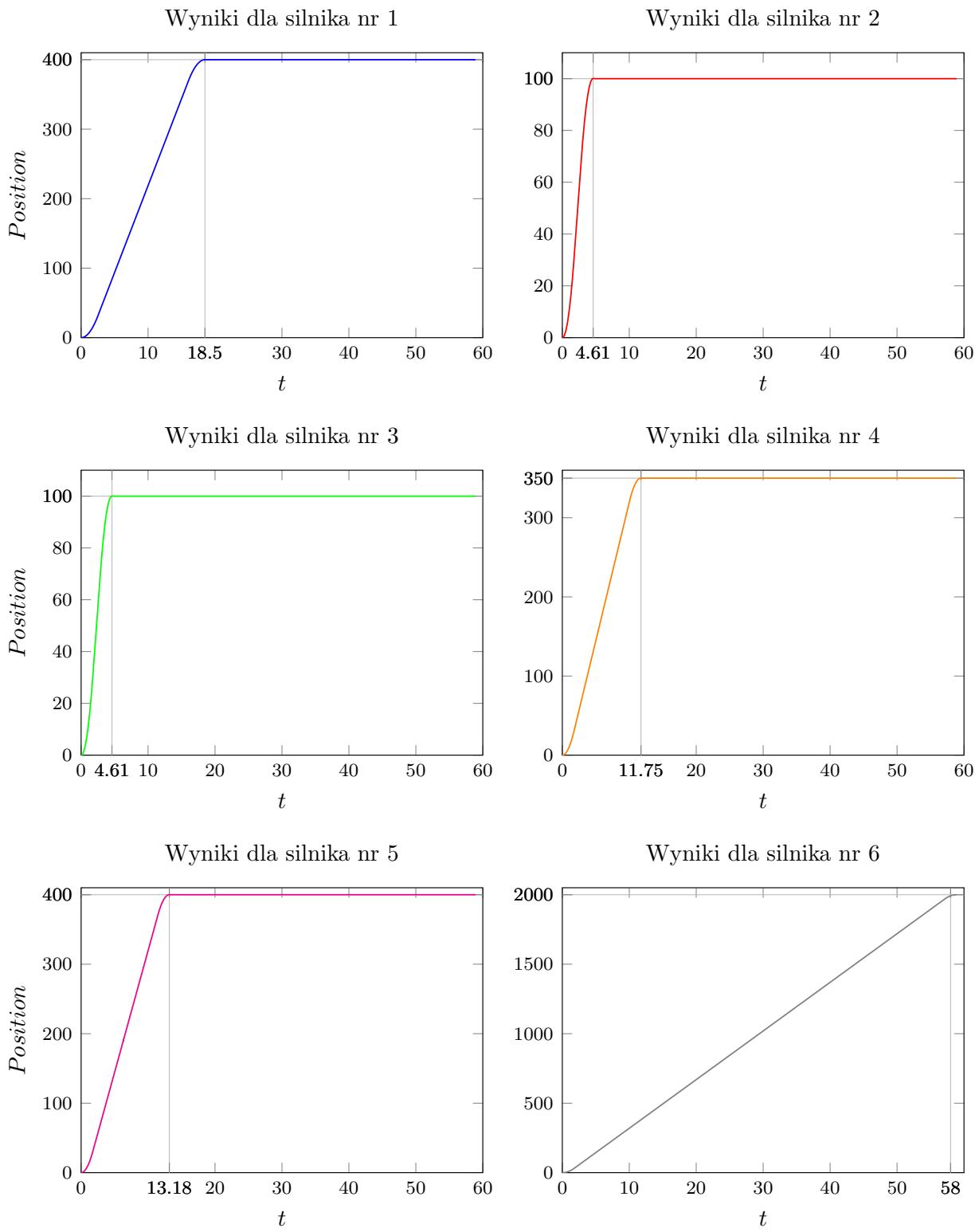
Wyniki uzyskane dla trybu badawczego w postaci wykresów (7,8,9), są tożsame z wynikami z sekcji 8.1.2.



Rysunek 7: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_motor_position_trapezoid_velocity` przy nastawach z tabeli 9. Tryb badawczy.



Rysunek 8: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_motor_position_trapezoid_velocity` przy nastawach z tabeli 10. Tryb badawczy.



Rysunek 9: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_motor_position_trapezoid_velocity` przy nastawach z tabeli 9. Tryb badawczy.

Jak wspomniano, spodziewano się błędu na silniku 4, przy ruchu $q_i > q_f$. Takowy otrzymano,

co potwierdza rysunek 10 udokumentowujący go. Warto zaznaczyć, że system numeruje silniki od zera, więc liczba porządkowa jest mniejsza o jeden.

```
[IRPOS][TRAPEZOID_VELOCITY] Move to motor position
[IRPOS][TRAPEZOID_VELOCITY] Result: MAX_VEL_UNREACHABLE
[IRPOS][TRAPEZOID_VELOCITY] Max velocity unreachable. vel1=0.000000; vel2=0.0000
00; vel_max=-35.000000; acc_max=-20.000000; displacement=60.000000; minimal acc
needed=20.416667; in joint :3
```

Rysunek 10: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_motor_position_trapezoid_velocity` przy nastawach dla silnika 4 z tabeli 10. Tryb badawczy.

Otrzymane wykresy są tożsame z wykresami otrzymanymi w sekcji 8.1.1, co łącząc z wynikami ruchu odwrotnego silnika 4, pozwala stwierdzić, że tryb badawczy działa zgodnie z założeniami.

8.2 move_along_motor_trajectory_trapezoid_velocity

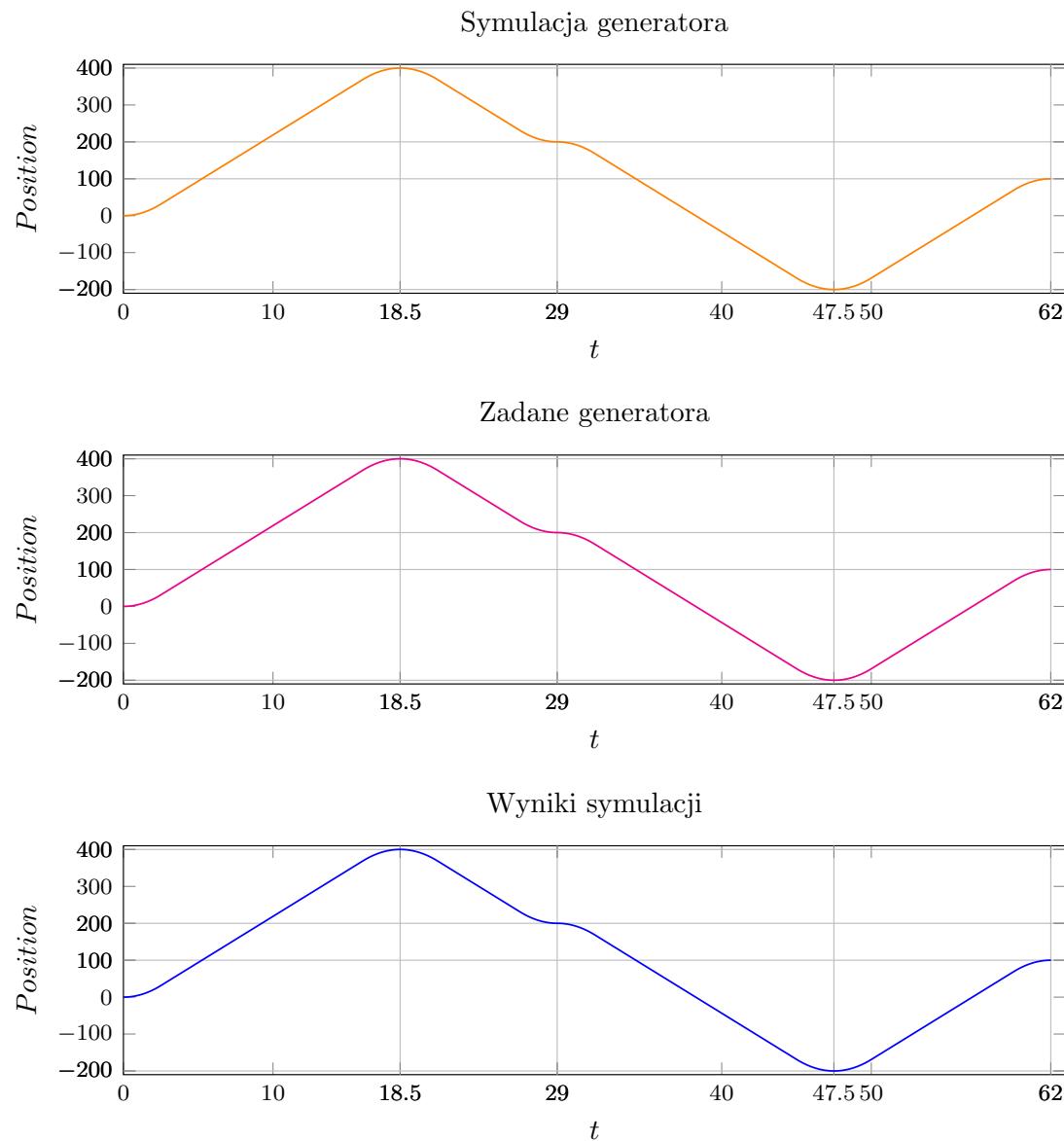
Testowanie funkcji działającej w przestrzeni silników w trybie prędkościowym, pozwalającej na osiągnięcie kilku kolejnych punktów przy jednym wywołaniu funkcji.

8.2.1 Proste działanie w trybie niebadawczym

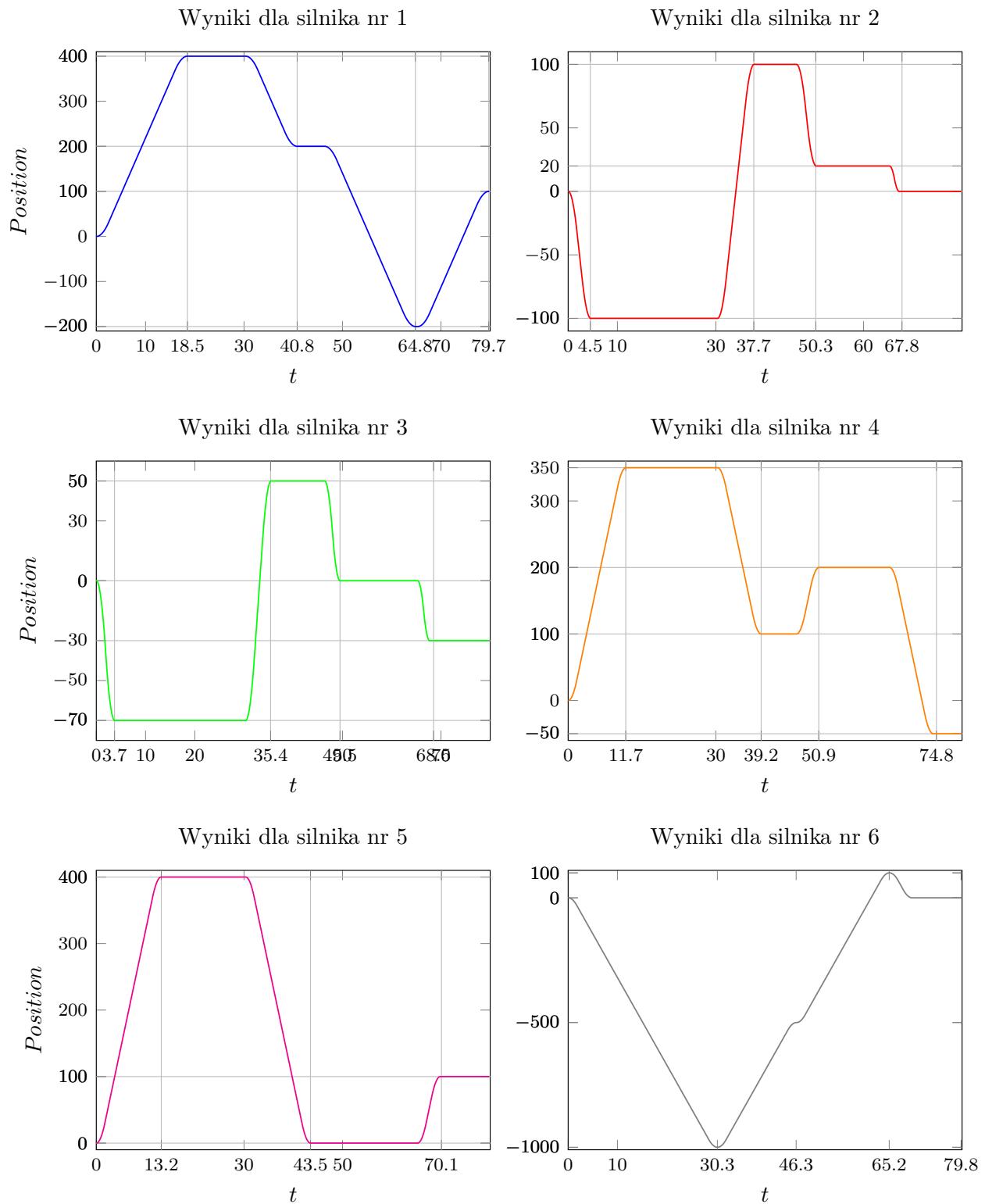
Ponownie przeprowadzono najpierw badania trajektorii oddzielnie dla każdego silnika, następnie dla wszystkich naraz. Nie przeprowadzano badań oddzielnie dla ruchu $q_i > q_f$ ze względu na zawarcie ich w trajektorii zadanej. Zadane przedstawiono w tabeli 11. Pominięto w niej prędkości początkowe i końcowe, które nie podgalają badaniu.

silnik	q_i	q_2	q_3	q_4	q_f	v_{max}	a_{max}	wynik symulacji
1	0.0	400.0	200.0	-200.0	100.0	25.0	10	✓
2	0.0	-100.0	100.0	20.0	0.0	35.0	20	✓
3	0.0	-70.0	50.0	0.0	-30.0	35.0	20	✓
4	0.0	350.0	100.0	200.0	-50.0	35.0	20	✓
5	0.0	400.0	0.0	0.0	100.0	35.0	20	✓
6	0.0	-1000.0	-500.0	100.0	0.0	35.0	20	✓

Tablica 11: Wyniki symulacji najprostszego przypadku, badanie oddzielnego silników.



Rysunek 11: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_along_motor_trajectory_trapezoid_velocity` przy nastawach z tabeli 11.

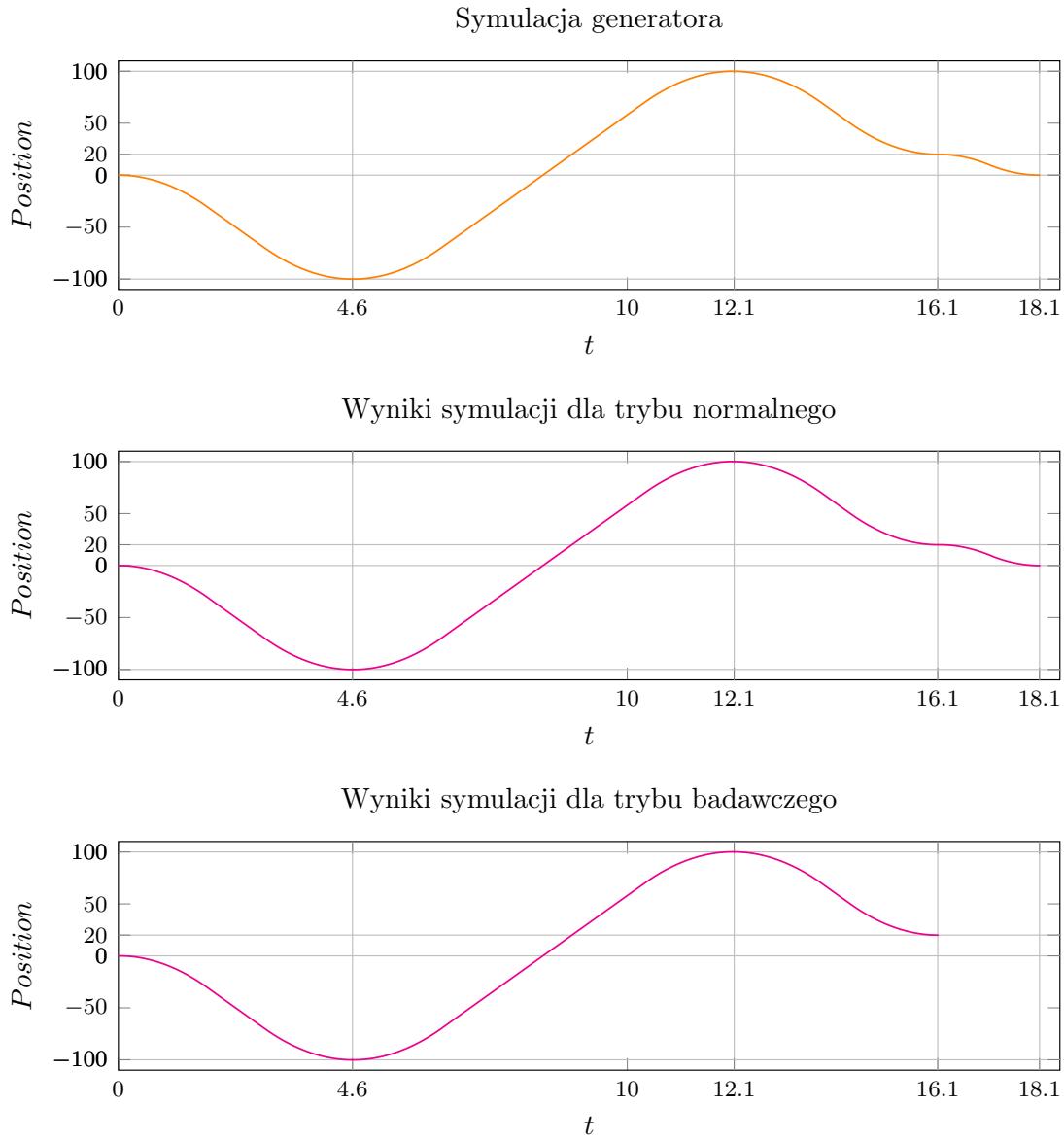


Rysunek 12: Wyniki testu trajektorii dla wszystkich silników funkcji `move_along_motor_trajectory_trapezoid_velocity` przy nastawach z tabeli 11.

Jak widać na rysunku 12, silniki czekają się siebie. Wizualizują to wypłaszczenia na wykresach. Jest to zgodne z założeniami generatora.

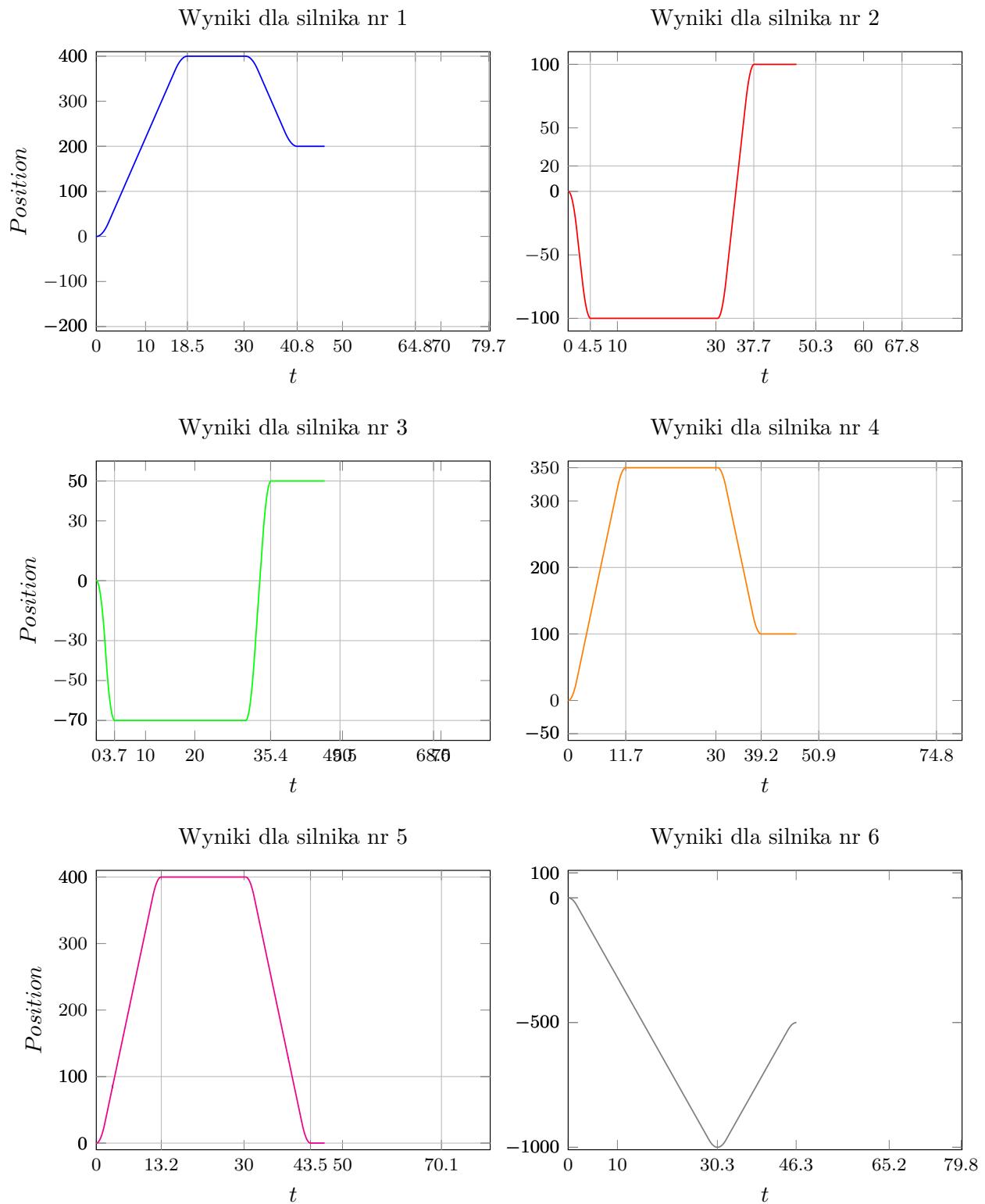
8.2.2 Proste działanie w trybie badawczym

Działanie w trybie badawczym powinno nie pozwolić na ruch silnika dla nastaw z tabeli 11, dla silników 2 i 3.



Rysunek 13: Wyniki testu trajektorii dla trzeciego silnika funkcji `move_along_motor_trajectory_trapezoid_velocity` przy nastawach z tabeli 11. Tryb badawczy.

Rysunek 13 pokazuje, różnice pomiędzy trajektorią wygenerowaną w Matlab’ie, trybem normalnym i badawczym. Jak się spodziewano tryb badawczy przerwał działanie gdy napotkał problem niemożliwości osiągnięcia maksymalnej prędkości. Jest to zgodne z założeniami trybu badawczego. Przerwanie pracy następuje nie przed rozpoczęciem całej trajektorii, gdyż zakłada się, że zebranie przynajmniej początkowych danych może być przydatne. Ze względu na alegoryczny wygląd wiadomości błędu do rysunku 10, pominięto ponowne jego przedstawienie.



Rysunek 14: Wyniki testu trajektorii dla wszystkich silników funkcji `move_along_motor_trajectory_trapezoid_velocity` przy nastawach z tablicy 11. Tryb badawczy.

Na wykresie 14, szczególnie w porównaniu z 12, widać moment w którym generator wykrył

błąd zadanych na silniku 2. Tabela 12 przedstawia wyniki dla oddzielnego badania trajektorii.

silnik	q_i	q_2	q_3	q_4	q_f	v_{max}	a_{max}	wynik symulacji
1	0.0	400.0	200.0	-200.0	100.0	25.0	10	✓
2	0.0	-100.0	100.0	20.0	0.0	35.0	20	✓
3	0.0	-70.0	50.0	0.0	-30.0	35.0	20	✓
4	0.0	350.0	100.0	200.0	-50.0	35.0	20	✓
5	0.0	400.0	0.0	0.0	100.0	35.0	20	✓
6	0.0	-1000.0	-500.0	100.0	0.0	35.0	20	✓

Tablica 12: Wyniki symulacji najprostszego przypadku, badanie oddzielnych silników. Tryb badawczy.

8.3 move_to_motor_position_trapezoid_duration

Testowanie funkcji działającej w przestrzeni silników w trybie czasowym.

8.3.1 Proste działanie w trybie niebadawczym

Wykonano testy analogiczne do tych z sekcji 8.1.1. Wyniki przedstawiono w tabelach 13 i 14 oraz na wykresach 15, 16 i 17. Warto zauważyć, że wywołanie funkcji, nie zawiera nadania prędkości i przyśpieszenia maksymalnego. Podane w tabelach wartości są wpisane do plików konfiguracyjnych.

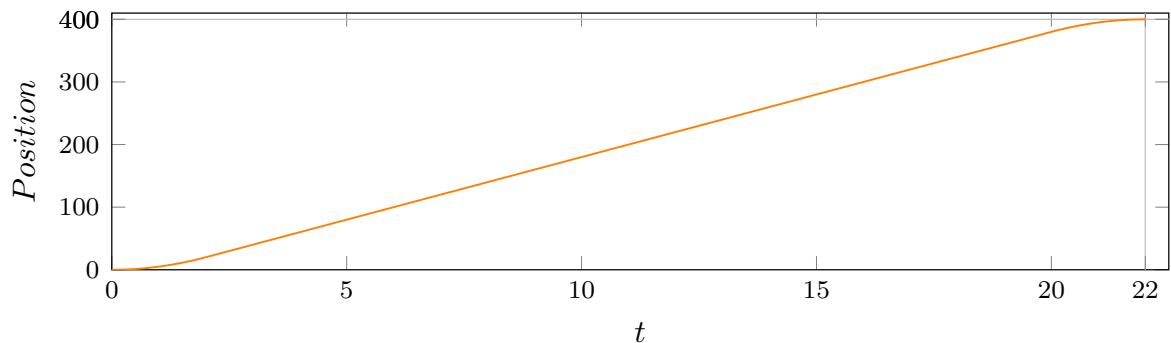
silnik	q_i	q_f	v_i	v_f	v_{max}	a_{max}	wynik symulacji
1	0.0	400.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
2	0.0	100.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
3	0.0	100.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
4	0.0	350.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
5	0.0	400.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
6	0.0	2000.0	0.0	0.0	20.0	10	✓

Tablica 13: Wyniki symulacji najprostszego przypadku, badanie oddzielnych silników.

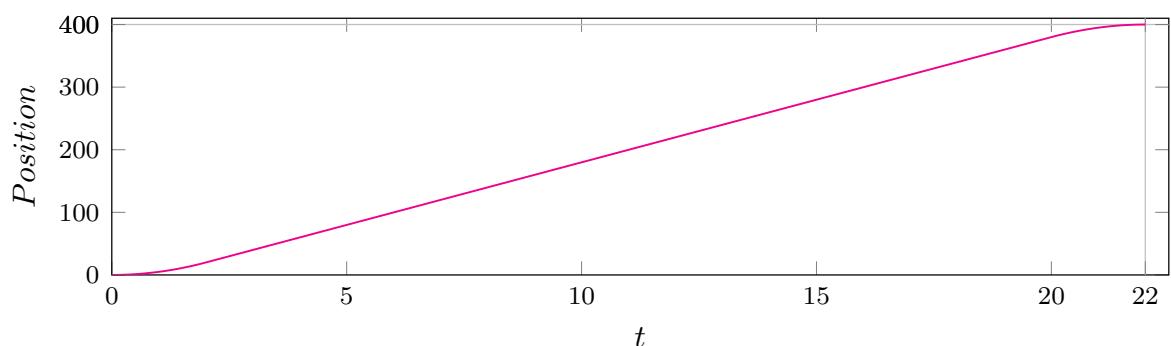
silnik	q_i	q_f	v_i	v_f	v_{max}	a_{max}	wynik symulacji
1	0.0	-400.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
2	0.0	-100.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
3	0.0	-70.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
4	0.0	-60.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
5	0.0	-70.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
6	0.0	-900.0	0.0	0.0	20.0	10	✓

Tablica 14: Wyniki symulacji najprostszego przypadku, badanie oddzielnych silników.

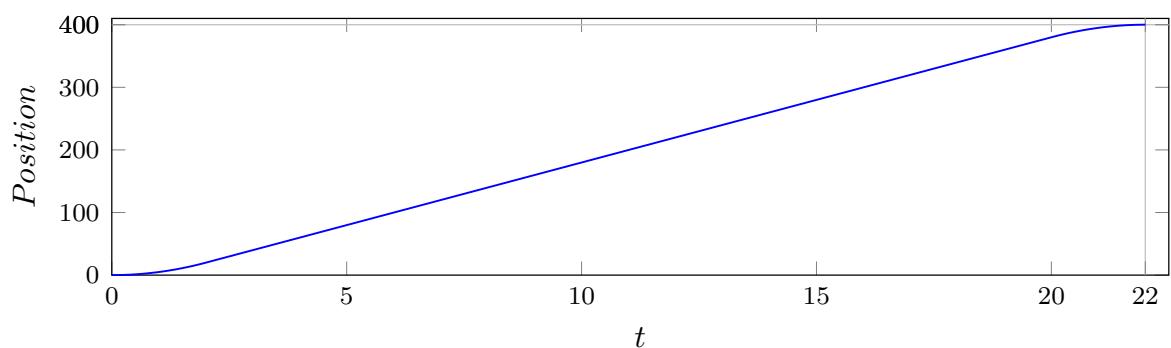
Symulacja generatora



Zadane generatora

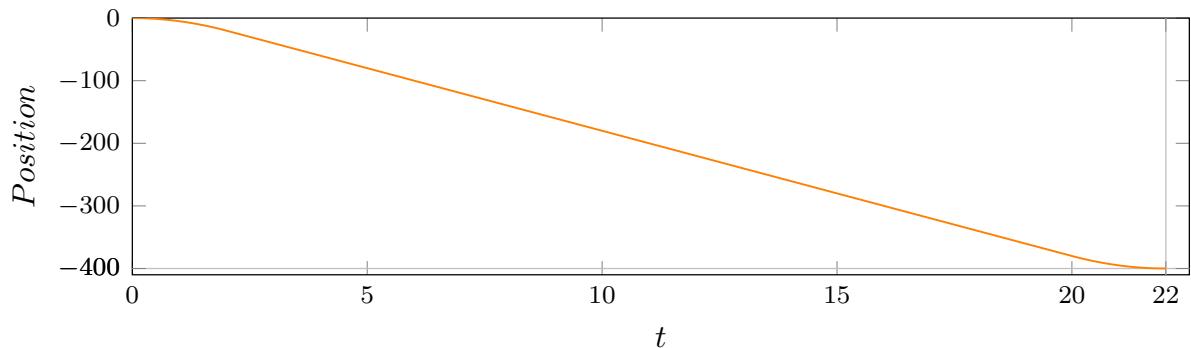


Wyniki symulacji

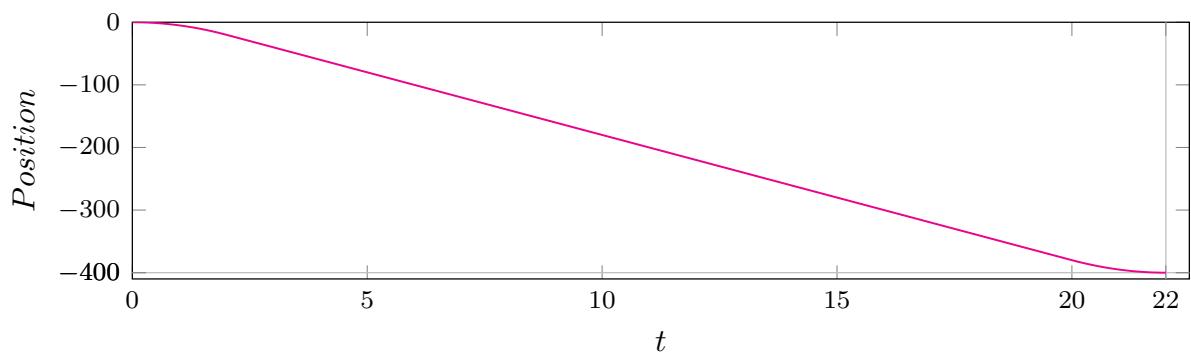


Rysunek 15: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_motor_position_trapezoid_duration` przy nastawach z tablicy 13.

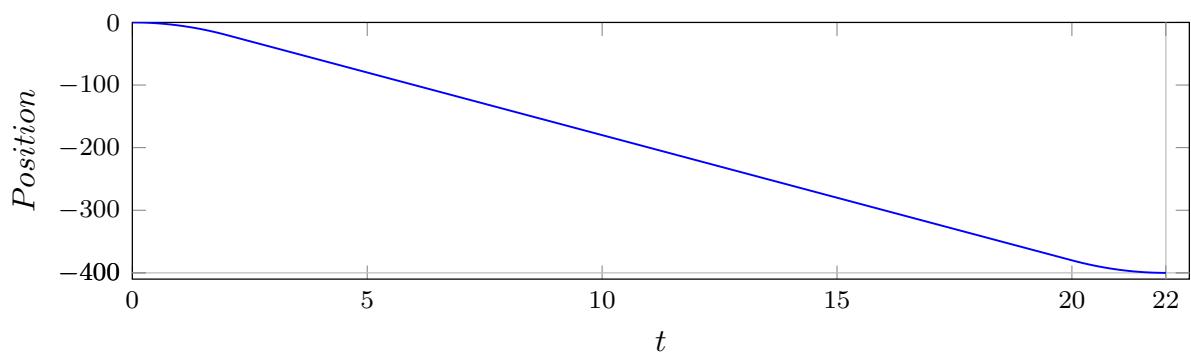
Symulacja generatora



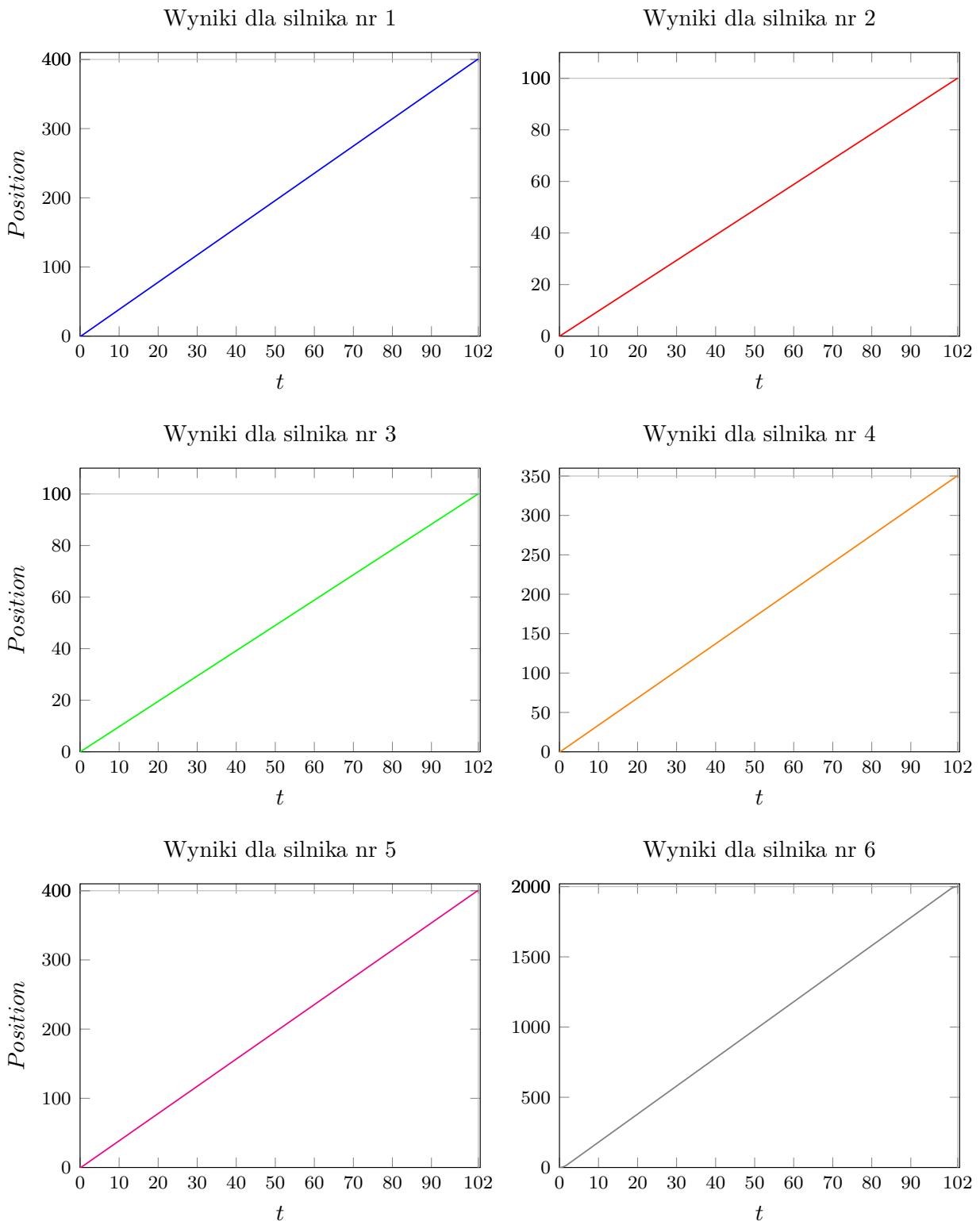
Zadane generatora



Wyniki symulacji



Rysunek 16: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_motor_position_trapezoid_duration` przy nastawach z tablicy 14.



Rysunek 17: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_motor_position_trapezoid_duration` przy nastawach z tablicy 13.

Ważnym jest by zwrócić uwagę na fakt, że w trybie czasowym wszystkie silniki pracują tak samo długo (patrz rysunek 17).

8.3.2 Proste działanie w trybie badawczym

Zgodnie z sekcją 5.4 nie spodziewana jest żadna różnica pomiędzy pracą funkcji w trybie normalnym i badawczym. Spowodowane jest to niebadaniem prędkości początkowych/końcowych, które były by zakazane oraz faktem, że tryb czasowy nie został stworzony do celu badania właściwości kinematycznych robota. Zadane dla ruchu są tożsame z podanymi w tabelach 13 oraz 14. Wyniki badania podane, przedstawione na wykresach 18,19 oraz 20, potwierdzają poprawne działanie funkcji.

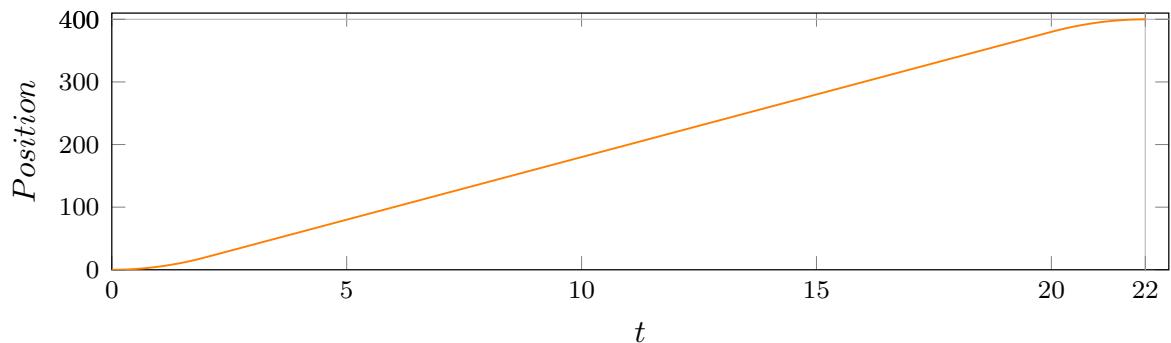
silnik	q_i	q_f	v_i	v_f	v_{max}	a_{max}	wynik symulacji
1	0.0	400.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
2	0.0	100.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
3	0.0	100.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
4	0.0	350.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
5	0.0	400.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
6	0.0	2000.0	0.0	0.0	20.0	10	✓

Tablica 15: Wyniki symulacji najprostszego przypadku, badanie oddzielnych silników.

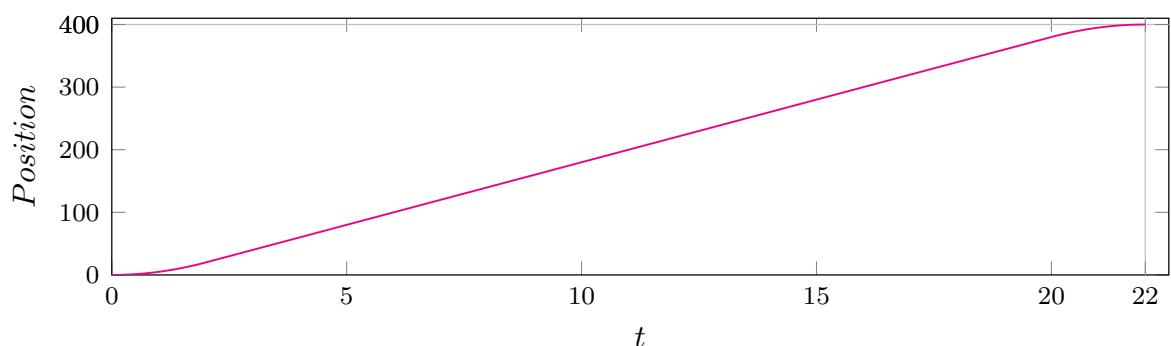
silnik	q_i	q_f	v_i	v_f	v_{max}	a_{max}	wynik symulacji
1	0.0	-400.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
2	0.0	-100.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
3	0.0	-70.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
4	0.0	-60.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
5	0.0	-70.0	0.0	0.0	20.0	10	✓
6	0.0	-900.0	0.0	0.0	20.0	10	✓

Tablica 16: Wyniki symulacji najprostszego przypadku, badanie oddzielnych silników.

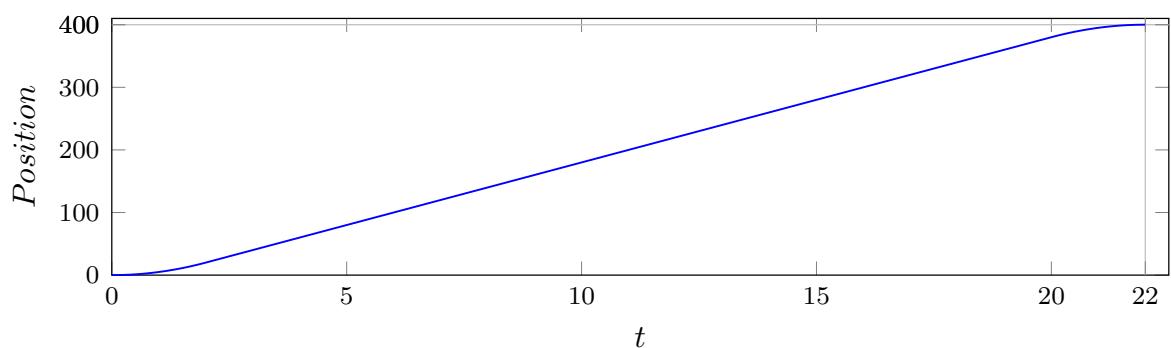
Symulacja generatora



Zadane generatora

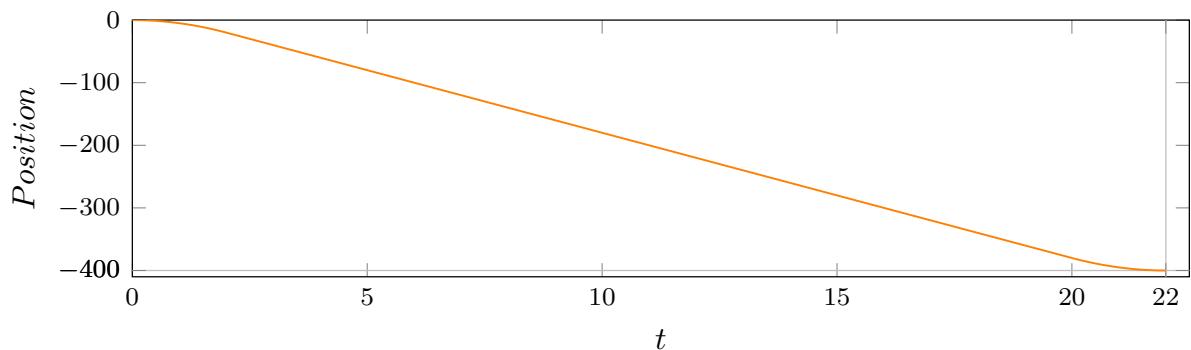


Wyniki symulacji

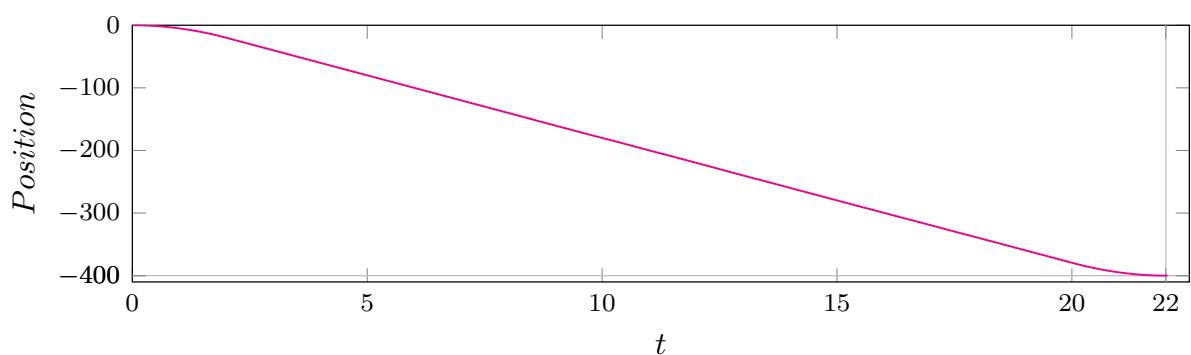


Rysunek 18: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_motor_position_trapezoid_duration` przy nastawach z tablicy 15. Tryb badawczy.

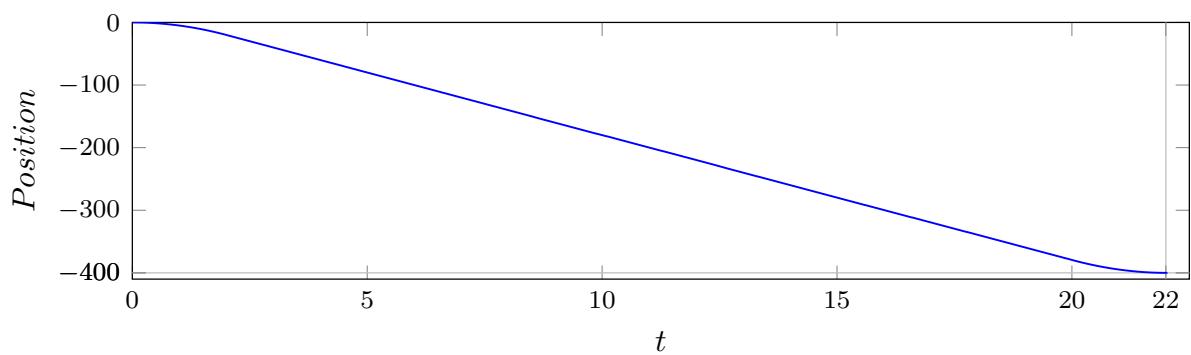
Symulacja generatora



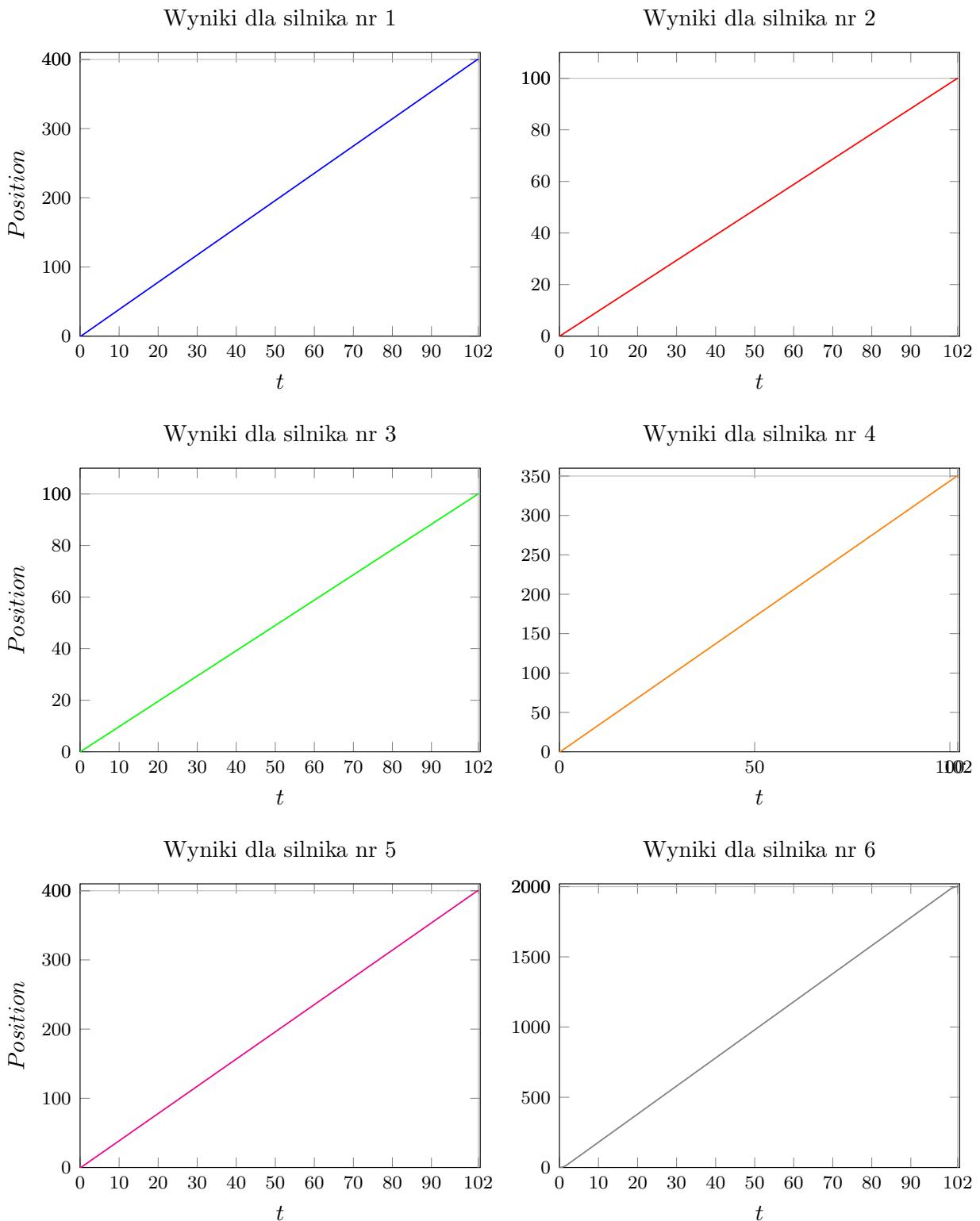
Zadane generatora



Wyniki symulacji



Rysunek 19: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_motor_position_trapezoid_duration` przy nastawach z tablicy 16. Tryb badawczy.



Rysunek 20: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_motor_position_trapezoid_duration` przy nastawach z tablicy 15. Tryb badawczy.

8.4 move_along_motor_trajectory_trapezoid_duration

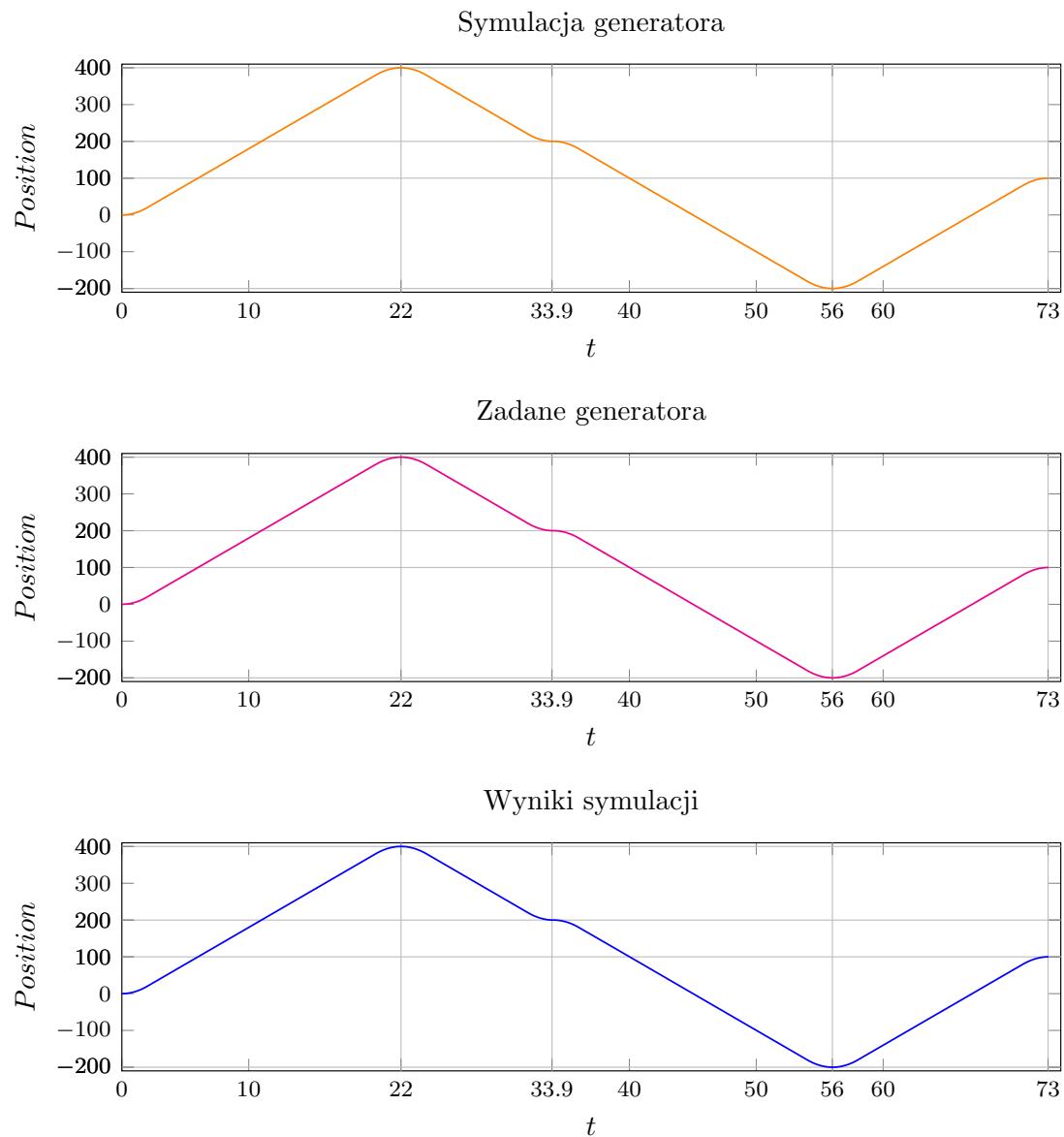
Testowanie funkcji działającej w przestrzeni silników w trybie czasowym, pozwalającej na osiągnięcie kilku kolejnych punktów przy jednym wywołaniu funkcji.

8.4.1 Proste działanie w trybie niebadawczym

Ponowniono badania funkcji zadającej całą trajektorię, nadając punkty do osiągnięcia podane w tablicy ??, zarówno dla każdego silnika oddzielnie, jak i dla wszystkich naraz.

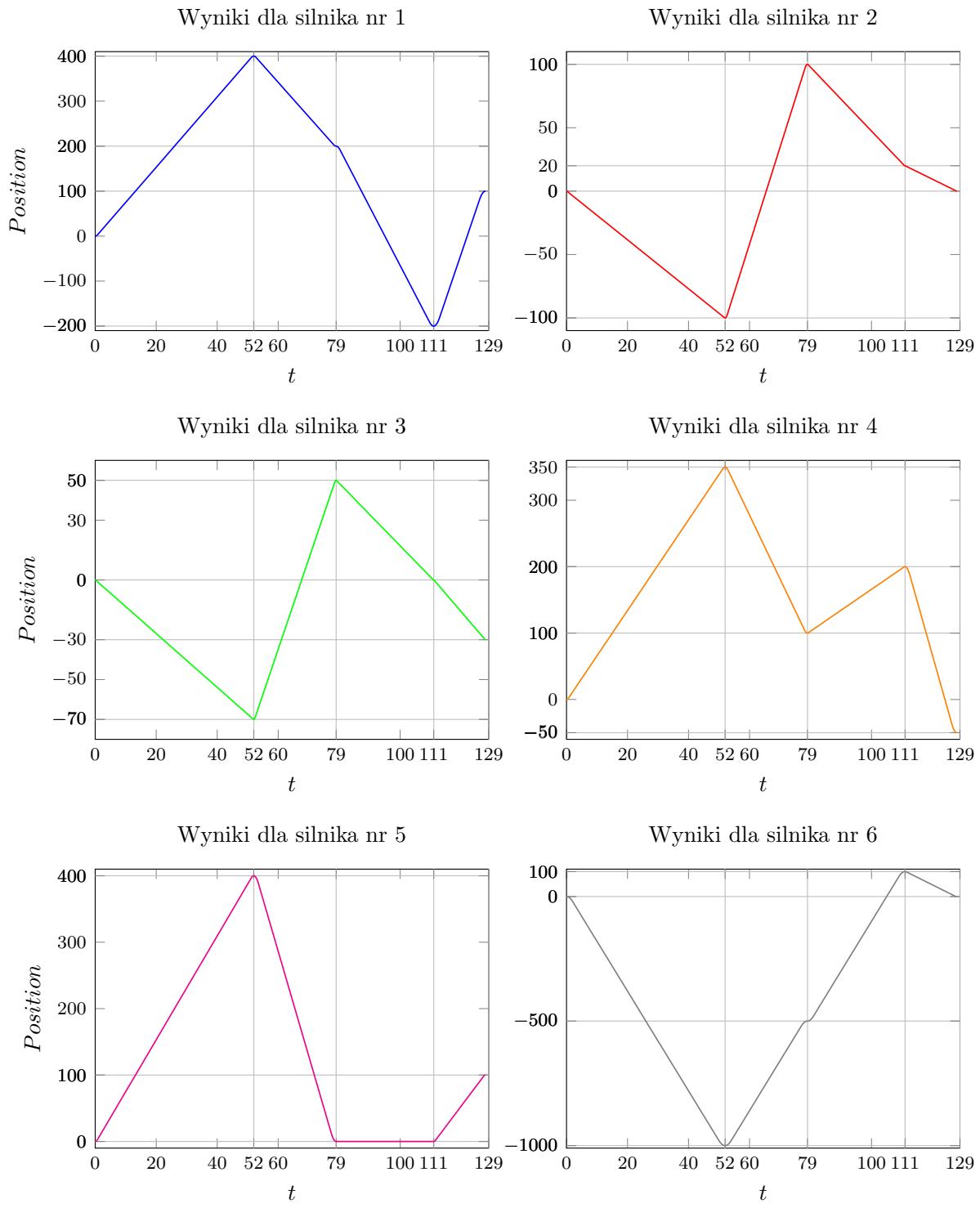
silnik	q_i	q_2	q_3	q_4	q_f	v_{max}	a_{max}	wynik symulacji
1	0.0	400.0	200.0	-200.0	100.0	20.0	10	✓
2	0.0	-100.0	100.0	20.0	0.0	20.0	10	✓
3	0.0	-70.0	50.0	0.0	-30.0	20.0	10	✓
4	0.0	350.0	100.0	200.0	-50.0	20.0	10	✓
5	0.0	400.0	0.0	0.0	100.0	20.0	10	✓
6	0.0	-1000.0	-500.0	100.0	0.0	20.0	10	✓

Tablica 17: Wyniki symulacji najprostszego przypadku, badanie oddzielnich silników.



Rysunek 21: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_along_motor_trajectory_trapezoid_duration` przy nastawach z tablicy 17.

Wykresy zgodnie z przewidywaniem nie różnią się od tych z rysunku 11, gdyż nie ma czasu oczekiwania na pozostałe silniki.



Rysunek 22: Wyniki testu trajektorii dla wszystkich silników funkcji `move_along_motor_trajectory_trapezoid_duration` przy nastawach z tablicy 17.

Porównanie wykresów 22 z 12, można z łatwością zauważyc wydłużenie trajektorii silników, które mogłyby szybciej osiągnąć zadane punkty, lecz zgodnie z założeniami ich ruch trwa tyle ile zajmuje najdłuższa trajektoria.

8.4.2 Proste działanie w trybie badawczym

Ponownie nie zauważono różnicy pomiędzy trybami normalnym i badawczym. Ze względu na udowodnienie działania przy flagie `research_mode` ustawionej na `True` w sekcji `??`, pominięto wykresy testów w tej sekcji.

silnik	q_i	q_2	q_3	q_4	q_f	v_{max}	a_{max}	wynik symulacji
1	0.0	400.0	200.0	-200.0	100.0	20.0	10	✓
2	0.0	-100.0	100.0	20.0	0.0	20.0	10	✓
3	0.0	-70.0	50.0	0.0	-30.0	20.0	10	✓
4	0.0	350.0	100.0	200.0	-50.0	20.0	10	✓
5	0.0	400.0	0.0	0.0	100.0	20.0	10	✓
6	0.0	-1000.0	-500.0	100.0	0.0	20.0	10	✓

Tablica 18: Wyniki symulacji najprostszego przypadku, badanie oddzielnych silników.

8.5 Działanie w przestrzeni stawów

Przedstawienie testowanie funkcji w przestrzeni stawów zostało ograniczone do wykresów dla funkcji `move_to_joint_position_trapezoid_velocity` oraz `move_to_joint_position_trapezoid_duration` w trybie niebadawczym. Jest to motywowane tym, że kod komponentów jest taki sam, więc wystarczy pokazać, że skutecznie podłączono komponent stawów do systemu oraz pobranie właściwych parametrów dla trybu czasowego.

8.5.1 `move_to_joint_position_trapezoid_velocity`

Wyniki testów funkcji przestrzeni stawów w trybie prędkościowym.

silnik	q_i	q_f	v_i	v_f	v_{max}	a_{max}	wynik symulacji
1	-0.1006	0.4	0.0	0.0	0.30	0.20	✓
2	-1.5419	-1.1	0.0	0.0	0.30	0.20	✓
3	0.0197	0.4	0.0	0.0	0.30	0.20	✓
4	1.1335	1.55	0.0	0.0	0.30	0.20	✓
5	3.6581	4.5	0.0	0.0	0.30	0.20	✓
6	-2.7381	0.0	0.0	0.0	0.30	0.20	✓

Tablica 19: Wyniki symulacji najprostszego przypadku, badanie oddzielnych stawów.

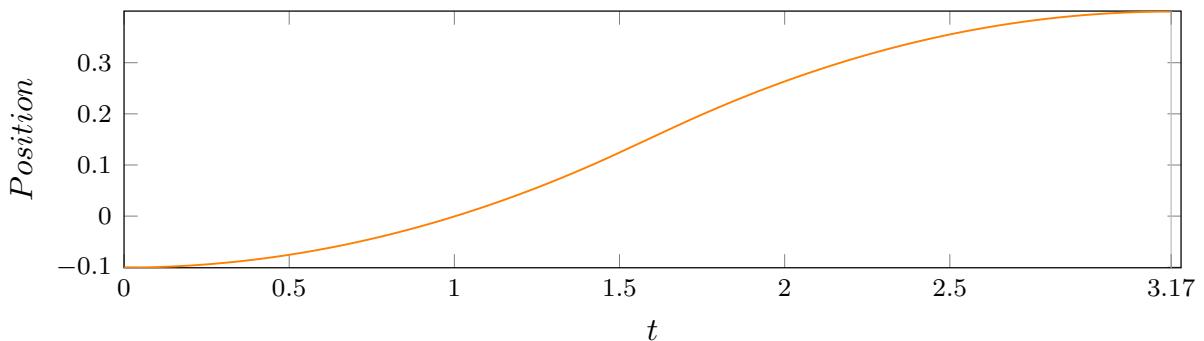
silnik	q_i	q_f	v_i	v_f	v_{max}	a_{max}	wynik symulacji
1	-0.1006	-0.4	0.0	0.0	0.30	0.20	✓
2	-1.5419	-2.1	0.0	0.0	0.30	0.20	✓
3	0.0197	-0.4	0.0	0.0	0.30	0.20	✓
4	1.1335	0.5	0.0	0.0	0.30	0.20	✓
5	3.6581	-2.0	0.0	0.0	0.30	0.20	✓
6	0.0	-2.0	0.0	0.0	0.30	0.20	✓

Tablica 20: Wyniki symulacji najprostszego przypadku, badanie oddzielnych stawów.

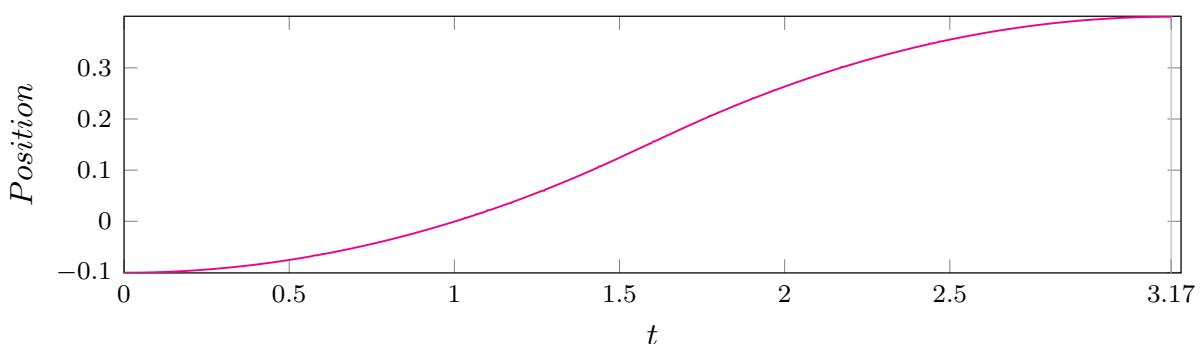
silnik	q_i	q_f	v_i	v_f	v_{max}	a_{max}	wynik symulacji
1	-0.1006	-0.3	0.0	0.0	0.30	0.20	✓
2	-1.5419	-1.3	0.0	0.0	0.30	0.20	✓
3	0.0197	0.3	0.0	0.0	0.30	0.20	✓
4	1.1335	-1.3	0.0	0.0	0.30	0.20	✓
5	3.6581	2.0	0.0	0.0	0.30	0.20	✓
6	-2.7381	0.0	0.0	0.0	0.30	0.20	✓

Tablica 21: Wyniki symulacji najprostszego przypadku, badanie wszystkich stawów.

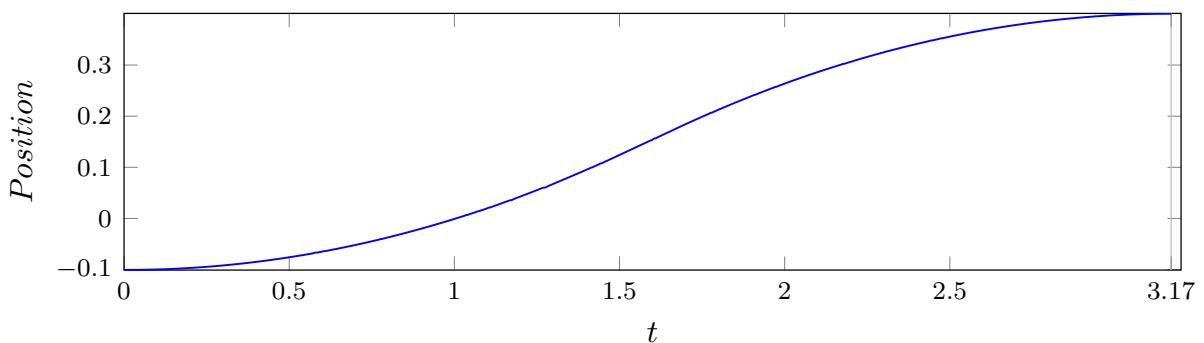
Symulacja generatora



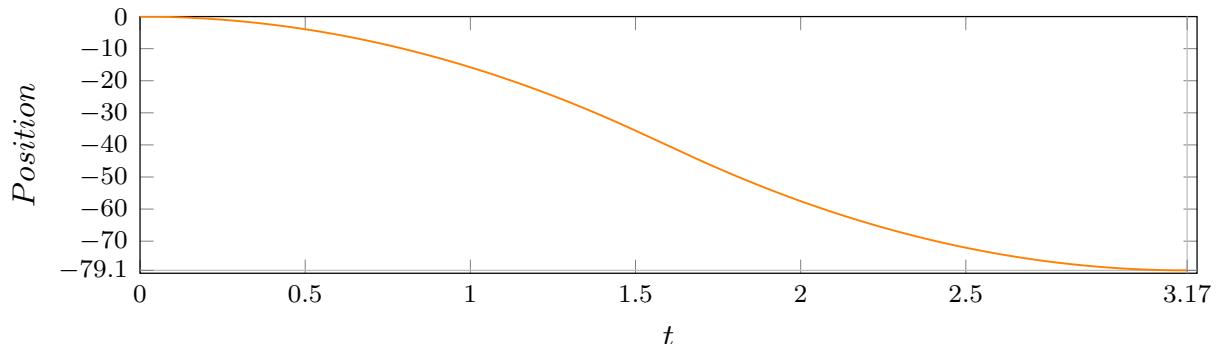
Zadane generatora



Wyniki symulacji

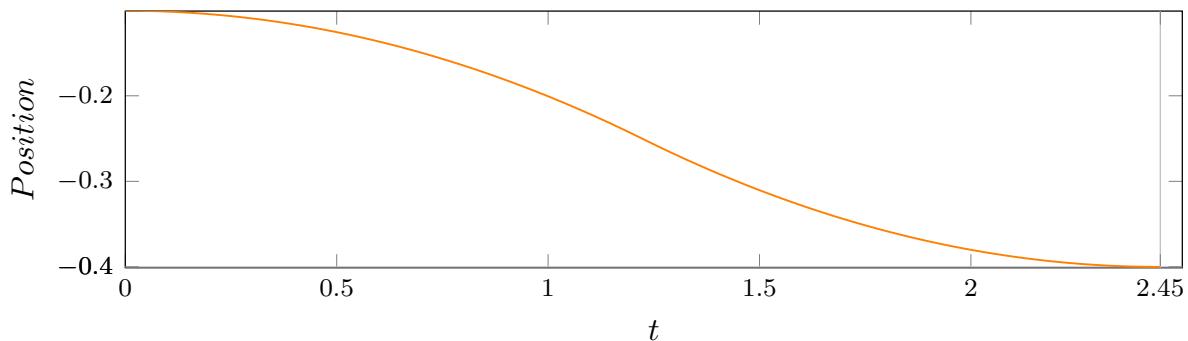


Symulacja ruchu silnika

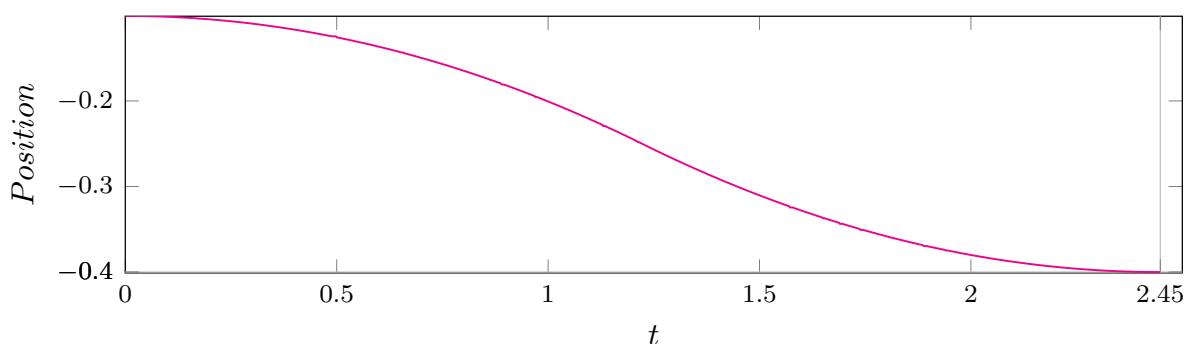


Rysunek 23: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_joint_position_trapezoid_velocity` przy nastawach z tablicy 19.

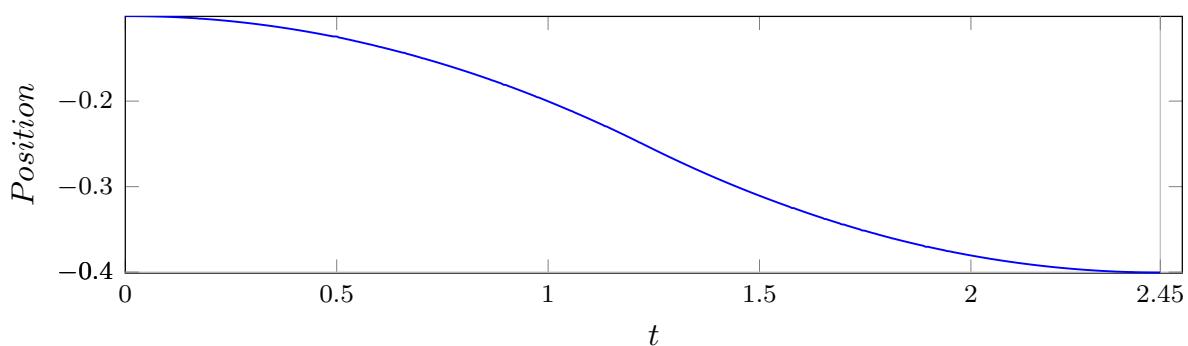
Symulacja generatora



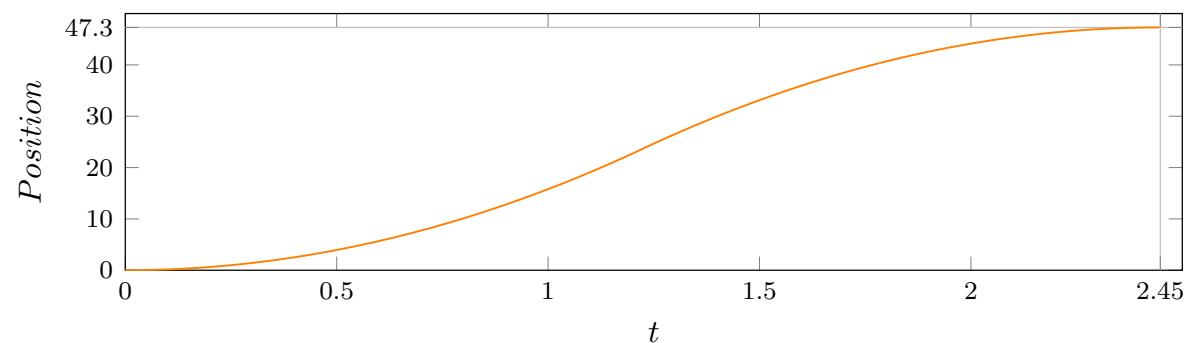
Zadane generatora



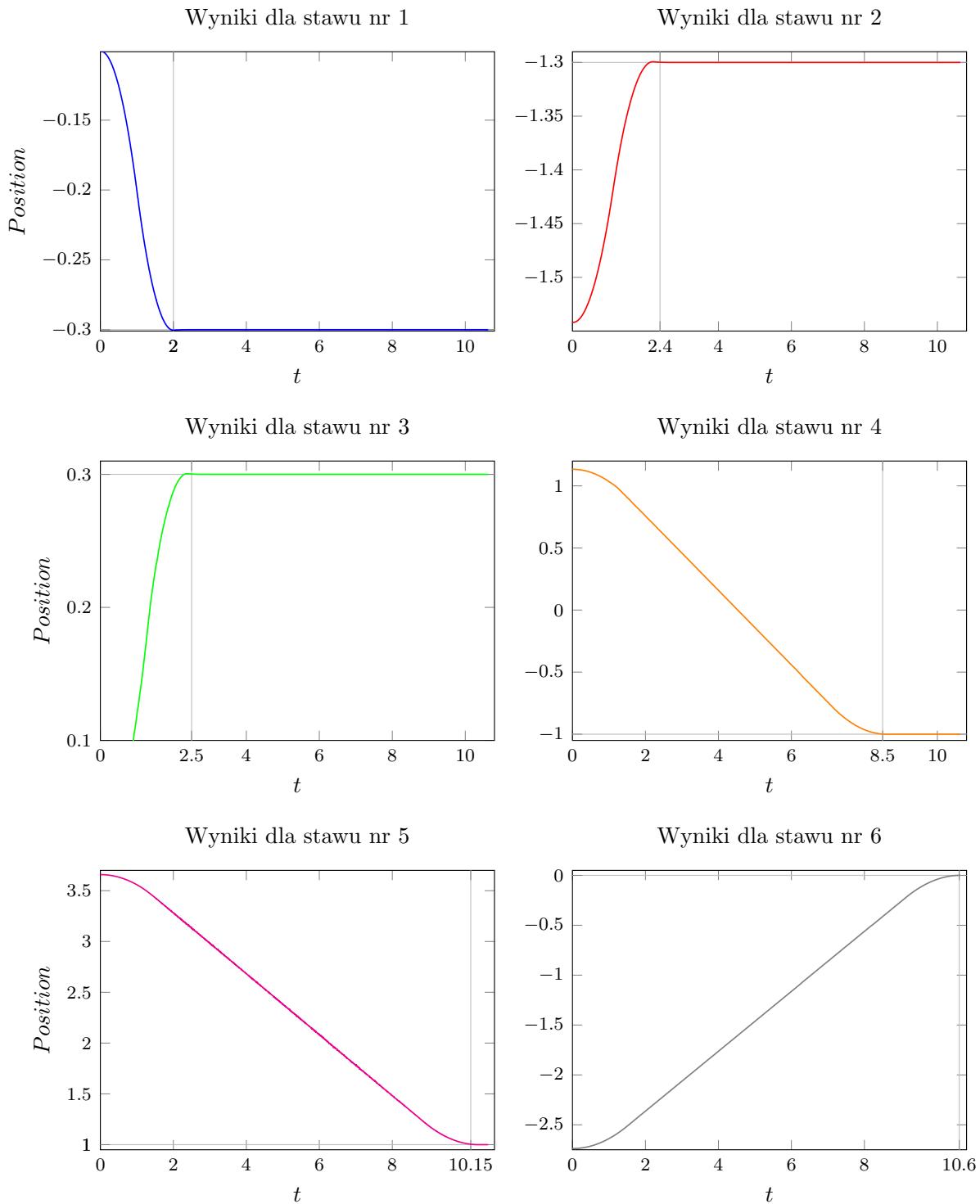
Wyniki symulacji



Symulacja ruchu silnika



Rysunek 24: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_joint_position_trapezoid_velocity` przy nastawach z tablicy 20.

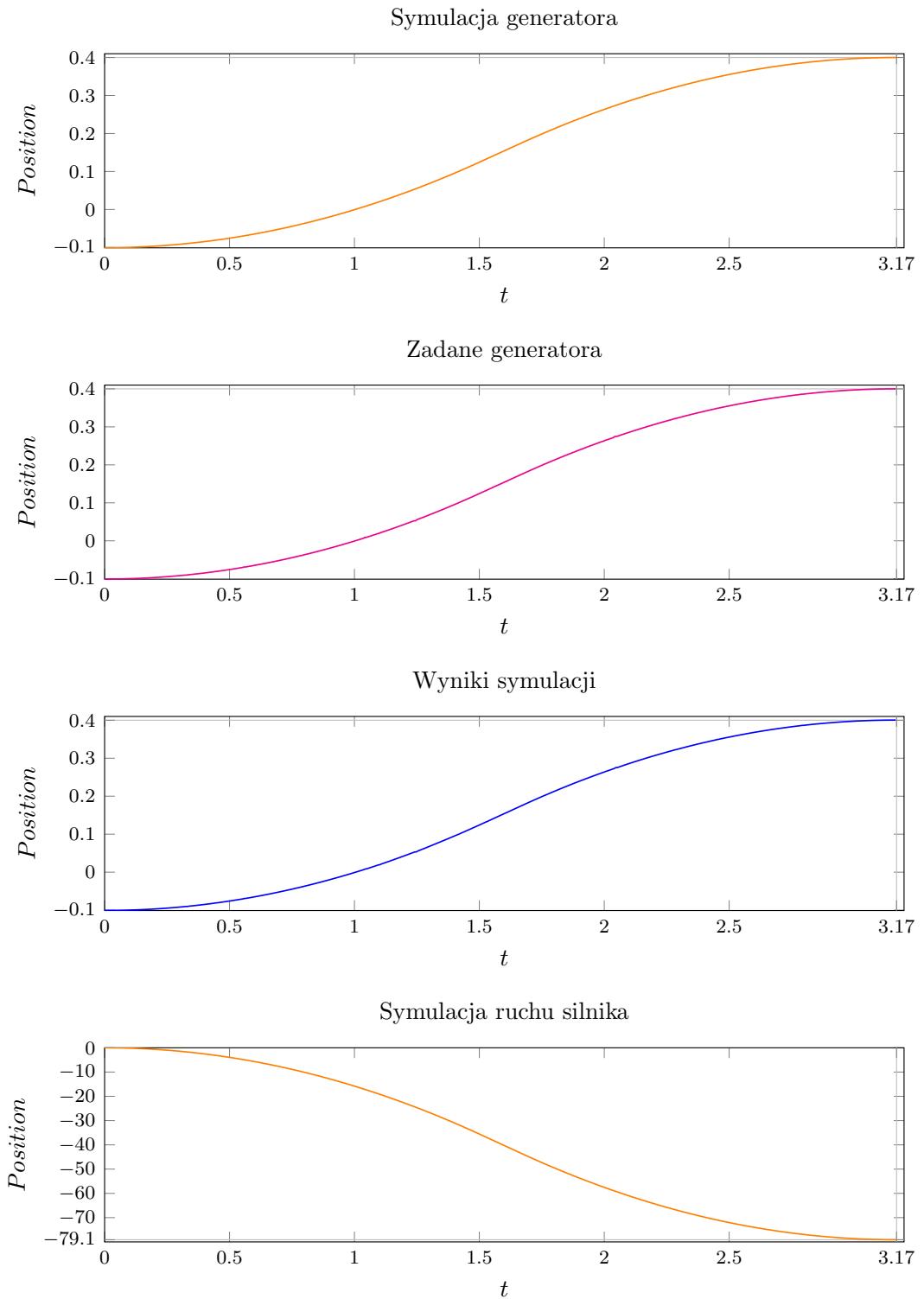


Rysunek 25: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_joint_position_trapezoid_velocity` przy nastawach z tablicy 21.

8.5.2 move_to_joint_position_trapezoid_duration

Wyniki testów funkcji przestrzeni stawów w trybie czasowym. W tej sekcji ograniczono się do wykresu ruchu pierwszego stawu, przy zadanych z tablicy 19. Identyczność wyników sygnalizuje

poprawność pobrania zmiennych z serwera parametrów.



Rysunek 26: Wyniki testu trajektorii dla silnika pierwszego funkcji `move_to_joint_position_trapezoid_duration` przy nastawach z tablicy 19.

Literatura

- [1] Dokumentacja pakietu actionlib
<http://wiki.ros.org/actionlib>, Open Source Robotics Fundation, kwiecień 2018.
- [2] The Orocov Component Builder's Manual
<http://www.orocos.org/stable/documentation/rtt/v2.x/doc-xml/orocos-components-manual.html>, Open RObot COntrol Software, 2012.