

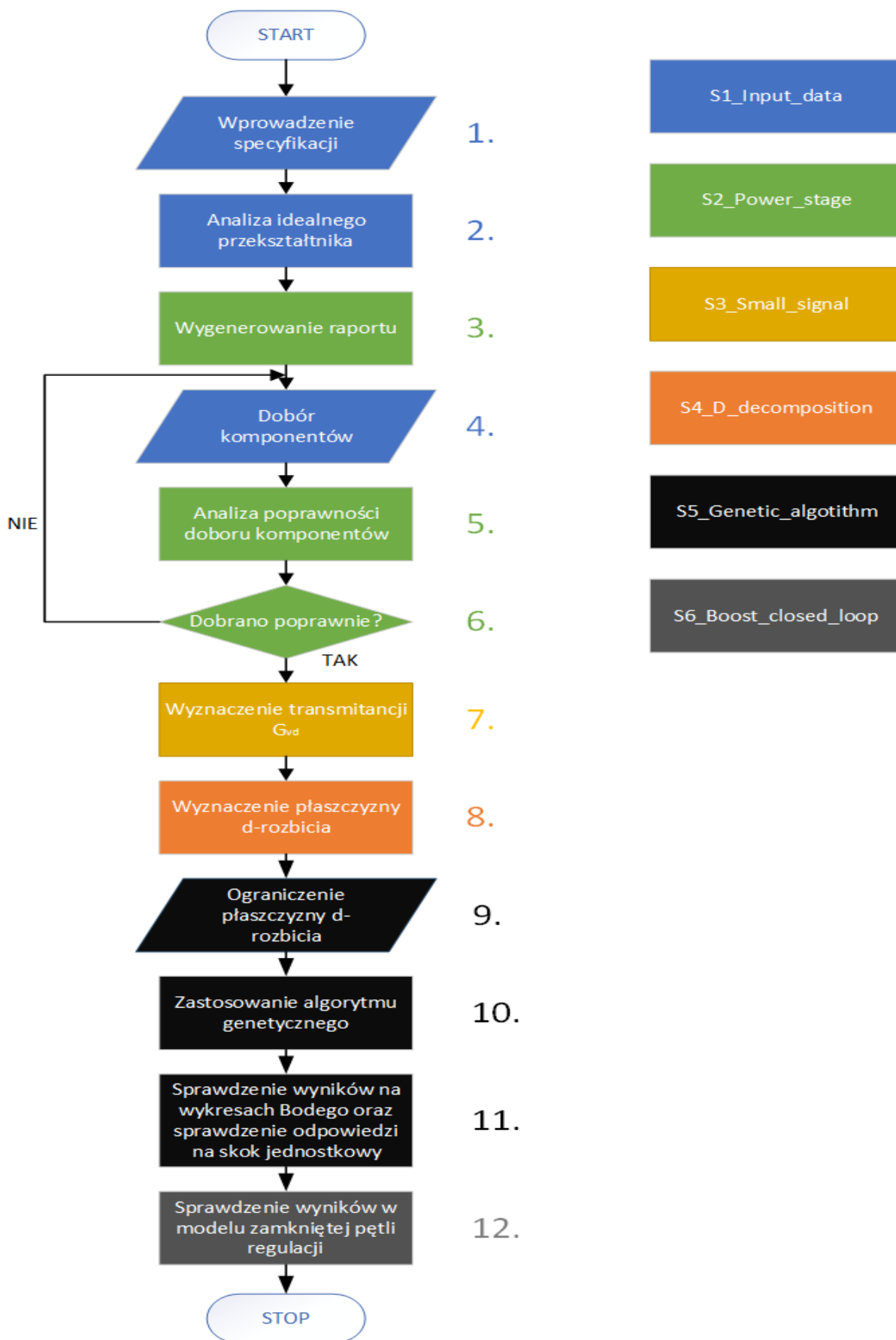
## 8. ŚRODOWISKO SYMULACYJNE BOOST PLATFORM SŁUŻĄCE DO PROJEKTOWANIA UKŁADU PRZETWORNICY DC-DC TYPU BO- OST

W ramach pracy dyplomowej, w oparciu o zagadnienia teoretyczne zaprezentowane w poprzednich rozdziałach, stworzono środowisko symulacyjne mające na celu poprawne zaprojektowanie przetwornicy DC-DC typu Boost wraz z doбором nastaw regulatora PI na podstawie algorytmu d-rozbiecia. Środowisko to jest zbudowane w postaci skryptów programu MATLAB i modeli symulacyjnych stworzonych w platformie Simulink. W tym rozdziale to środowisko zostanie opisane, a także zostanie przedstawiony tok postępowania mający na celu użycie tego środowiska w celu zaprojektowania przetwornicy.

### 8.1. Ogólna struktura i sposób działania środowiska

Środowisko jest złożone z sześciu sekcji znajdujących się w osobnych folderach. Są to

- *S1\_Input\_data* – zawiera dane wejściowe w postaci specyfikacji oraz parametrów komponentów układu.
- *S2\_S2\_Power\_stage* - służy do wyznaczenia parametrów komponentów przekształtnika. Jest podzielone na dwie części przeznaczone do obliczeń i symulacji w oparciu o podejście bez uwzględniania strat oraz z ich uwzględnieniem.
- *S3\_Small\_signal* - część przeznaczona do wyznaczenia transmitancji małosygnałowej  $G_{vd}$  w oparciu o symulację oraz podejście obliczeniowe. Wyznaczenie transmitancji przebiega w oparciu o realizację scenariusza przejścia z wartości napięcia wyjściowego określonego jako  $V_{out\_p}$  do napięcia  $V_{out}$ , przy czym  $V_{out} > V_{out\_p}$ .
- *S4\_D\_decomposition* - służy do wyznaczenia płaszczyzny d-rozbiecia wraz z granicą stabilności oraz z krzywymi odpowiadającymi wartościom minimalnym i maksymalnym zapasu fazy i wzmocnienia określonym w specyfikacji.
- *S5\_Genetic\_algorithm* - służy do znalezienia najlepszych nastaw regulatora PI wyszukując na podstawie fragmentu płaszczyzny d-rozbiecia odpowiadającego określonym w specyfikacji zapasom fazy i wzmocnienia. Algorytm genetyczny dąży do minimalizacji funkcji kryteriów IAE (całki modułu z uchybu), ITAE (całki modułu z uchybu i czasu) oraz ISTAE (całki z modułu uchybu i kwadratu czasu).
- *S6\_Boost\_closed\_loop* - służy do zasymulowania układu pracującego w zamkniętej pętli regulacji z wykorzystaniem przetwornika analogowo-cyfrowego oraz regulatora PI o parametrach wyznaczonych w poprzedniej części symulacji. Regulator PI posiada strukturę mającą naśladować tę zaimplementowaną w FPGA.



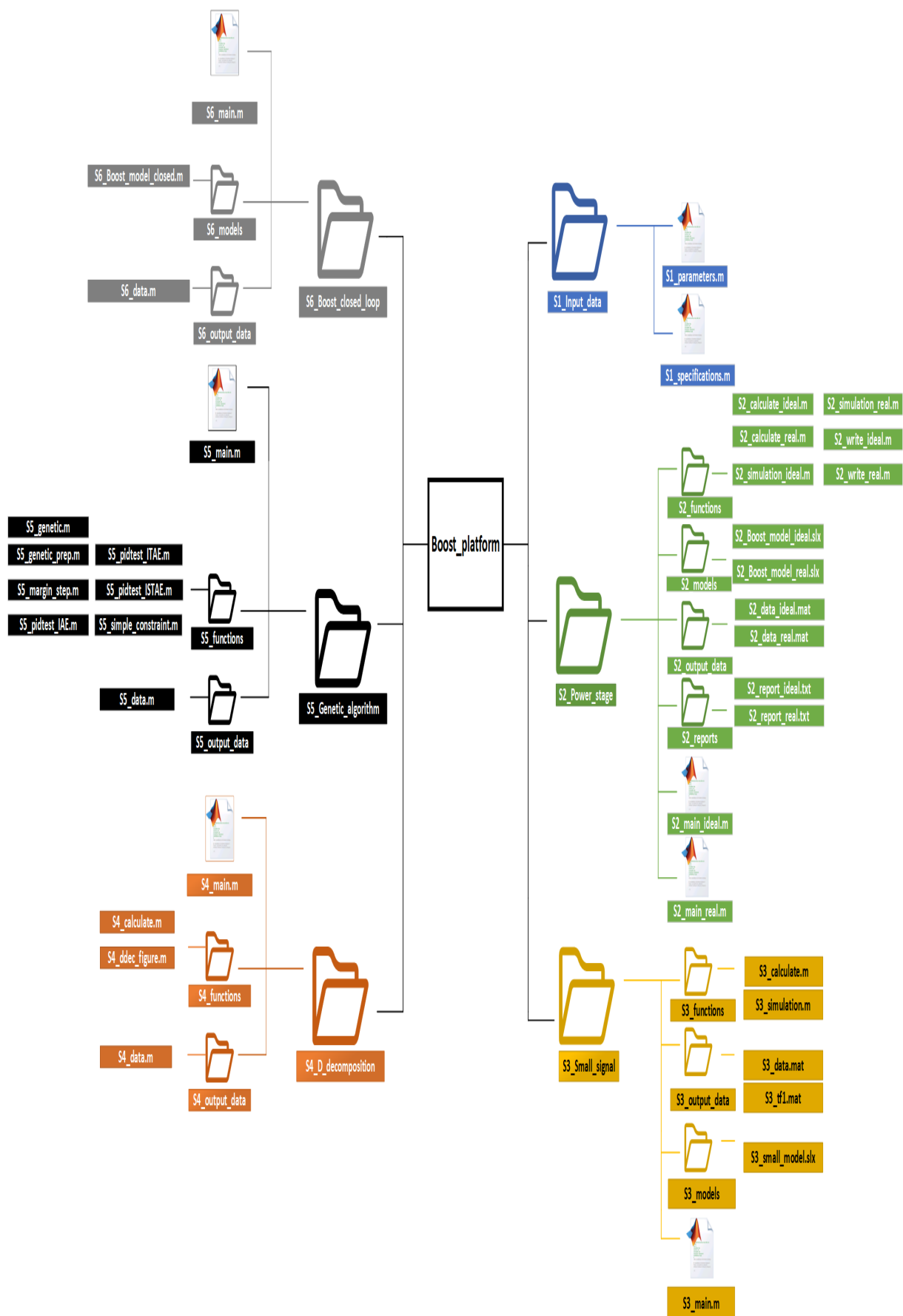
Rysunek 8.1: Schemat blokowy działania algorytmu wyznaczania parametrów układu przetwornicy DC-DC typu Boost oraz nastaw regulatora PI przy użyciu środowiska Boost Platform. Numery kolejnych kroków są wyjaśnione w opisie pod rysunkiem

Rysunek 8.1 przedstawia ogólną strukturę środowiska wraz ze strzałkami oznaczającymi kolejne kroki obliczeniowe i symulacyjne.

1. Użytkownik podaje specyfikację układu przetwornicy.
2. Za pomocą sekcji *S2\_Power\_stage*, a konkretnie jej części związanej z idealnym przekształtnikiem, następuje wyznaczenie podstawowych parametrów układu tj. wartość indukcyjności, pojemności oraz obciążenia prądowe i napięciowe komponentów.
3. Generowany jest raport z sugerowanymi wartościami podstawowych parametrów układu.
4. Użytkownik na podstawie wytycznych z poprzedniego punktu dobiera komponenty i wprowadza ich parametry do sekcji *S1\_Input\_data*.
5. Część sekcji *S2\_Power\_stage* związana z nieidealnym przekształtnikiem przeprowadza analizę doboru parametrów za pomocą obliczeń i symulacji, a następnie generuje raport z informacjami na temat poprawności doboru parametrów komponentów.
6. W przypadku stwierdzenia braku zgodności użytkownik powinien ponowić procedurę doboru.
7. Za pomocą sekcji *S3\_Small\_signal* następuje wyznaczenie transmitancji małosygnałowej  $G_{vd}$  za pomocą podejścia obliczeniowego oraz symulacyjnego. W dalszej części używana jest transmitancja wyznaczona symulacyjnie.
8. Następuje wyznaczenie płaszczyzny d-rozbiecia wraz z granicą stabilności oraz krzywymi odpowiadającymi wartościom minimalnym i maksymalnym zapasu fazy i wzmocnienia.
9. Użytkownik na podstawie wyznaczonej płaszczyzny d-rozbiecia ogranicza tę płaszczyznę nierównościami i równaniami tak, by algorytm genetyczny analizował tylko obszar spełniający wymagania dotyczące zapasu fazy i wzmocnienia oraz obszaru stabilności. Ograniczenie to odbywa się poprzez wybór punktów skrajnych rozpatrywanego fragmentu płaszczyzny d-rozbiecia.
10. Algorytm genetyczny dokonuje minimalizacji wskaźników IAE, ITAE, ISTAE na obszarze określonym w poprzednim punkcie i wybiera trzy pary nastaw regulatora, po jednej dla każdego wskaźnika.
11. Użytkownik dokonuje analizy wynikowych wykresów Bodego i wykresów odpowiedzi na skok jednostkowy.
12. Użytkownik dokonuje analizy symulacji układu pracującego w zamkniętej pętli regulacji, w której zaimplementowano regulator PI z wybranymi nastawami.

## 8.2. Szczegółowa struktura środowiska

W tej części rozdziału przedstawiono opis poszczególnych plików składających się na środowisko Boost Platform. Na rysunku 8.2 przedstawiono hierarchię folderów środowiska.



Rysunek 8.2: Przedstawienie szczegółowej struktury folderów i plików środowiska Boost Platform

### 8.2.1. *SI\_Input\_data*

Ta część środowiska zawiera:

- Skrypt *SI\_specification.m* - w którym znajdują się wielkości tworzące specyfikację projektowanego układu.
- Skrypt *SI\_parameters.m* – zawierającego dane na temat parametrów komponentów układu.

#### ***SI\_specification.m***

Ten skrypt zawiera wielkości tworzące specyfikację przekształtnika oraz układu sterowania. Użytkownik wprowadza wartości tych wielkości, a środowisko na ich podstawie przeprowadza obliczenia i symulacje.

Tabela 8.1: Wielkości stanowiące specyfikację w środowisku Boost Platform

Nazwa zmiennej	Opis	Jednostka
$V_{in}$	Napięcie wejściowe	V
$V_{out\_p}$	Napięcie wyjściowe dla pracy stabilnej przed punktem pracy	V
$V_{out}$	Napięcie wyjściowe dla pracy stabilnej w punkcie pracy	V
$\delta V_{out}$	Oscylacje napięcia wyjściowego	%
$\delta I_L$	Oscylacje prądu cewki	%
$I_{out}$	Prąd wyjściowy	A
$\eta$	Sprawność	%
$f_s$	Częstotliwość kluczowania	Hz

#### ***SI\_parameters.m***

Ten skrypt zawiera wartości parametrów komponentów przekształtnika typu Boost. Użytkownik wprowadza je podobnie jak wielkości specyfikacji.

Tabela 8.2: Wielkości stanowiące parametry komponentów w środowisku *Boost Platform*

Nazwa zmiennej	Opis	Jednostka
<b>Cewka</b>		
$L$	Indukcyjność cewki	H
$DCR$	Rezystancja cewki	$\Omega$
$I_{Lav}$	Średni prąd cewki	A
$I_{Lmax}$	Maksymalny prąd cewki	A
<b>Dioda</b>		
$V_f$	Napięcie przewodzenia diody	V
$I_{Dav}$	Średni prąd diody	A
$I_C$	Maksymalny prąd diody	A
$V_R$	Maksymalne napięcie wsteczne	V
<b>Kondensator wyjściowy</b>		
$C_{out}$	Pojemność kondensatora	F
$ESR_{Cout}$	Rezystancja kondensatora	$\Omega$
$V_{Cout}$	Napięcie polaryzacji	V
<b>MOSFET</b>		
$R_{DS}$	Rezystancja dren-źródło	$\Omega$
$t_R$	Czas włączenia	s
$t_F$	Czas wyłączenia	s
$V_{DS}$	Napięcie dren-źródło	V
$I_D$	Prąd drenu	A
$V_{th}$	Napięcie progowe bramka-źródło	V
$C_{iss}$	Pojemność wejściowa	F
$C_{oss}$	Pojemność wyjściowa	F
$C_{rss}$	Pojemność przejściowa sprzężenia zwrotnego	F
$R_G$	Rezystancja bramki	$\Omega$
<b>PWM</b>		
$T_{PWM}$	Stała czasowa PWM	s
<b>ADC</b>		
$T_{ADC}$	Stała czasowa przetwornika A/C	s
$bits$	Liczba bitów przetwornika A/C	-
$sat_v$	Wartość nasycenia	V
$f_s$	Częstotliwość próbkowania	Hz
$ofs_v$	Offset	V
$n_{lsbv}$	Szum wyrażony w LSB	LSB
$gmis_v$	Wzmocnienie	-

### 8.2.2. *S2\_Power\_stage*

Ta część środowiska służy do zaprojektowania przekształtnika DC-DC typu Boost w oparciu o specyfikację umieszczoną w folderze *S1\_Input\_data*. Składa się ona z:

- Skryptów *S2\_main\_ideal.m* oraz *S2\_main\_real.m* - dwóch głównych skryptów uruchamiających procedurę symulacyjno-obliczeniową.
- Folderu *S2\_functions* – zawierającego pozostałe skrypty programu MATLAB.
- Folderu *S2\_models* – zawierającego modele symulacyjne.
- Folderu *S2\_reports* – zawierającego raporty generowane po wykonaniu symulacji.

- Folderu *S2\_output\_data* – zawierającego dane z symulacji i obliczeń.

### ***S2\_main\_ideal.m :***

Skrypt ten jest jednym z głównych skryptów tej części środowiska symulacyjnego. Uruchamia on obliczenia i symulację dotyczące idealnego układu przetwornicy. Następuje w nim:

1. Wczytanie specyfikacji z pliku *S1\_specification.m*.
2. Wywołanie skryptu *S2\_calculate\_ideal.m* służącego do obliczenia parametrów idealnej przetwornicy.
3. Wywołanie skryptu *S2\_structures\_ideal.m* służącego do uporządkowania danych do struktur.
4. Uruchomienie symulacji *S2\_Boost\_model\_ideal.slx*.
5. Wywołanie skryptu *S2\_simulation\_ideal.m* służącego do dokonania obliczeń na danych otrzymanych z symulacji.
6. Wywołanie skryptu *S2\_write\_ideal.m* służącego do stworzenia raportu *S2\_report\_ideal.txt*.
7. Zapis danych użytych podczas wykonywania skryptu do pliku *S2\_data\_ideal.mat*.

Poszczególne elementy środowiska wywoływane przez ten skrypt zostaną omówione w dalszej części rozdziału.

### ***S2\_main\_real.m :***

Skrypt ten jest drugim z głównych skryptów tej części środowiska symulacyjnego. Uruchamia on obliczenia i symulację dotyczące nieidealnego układu przetwornicy. Następuje w nim:

1. Wczytanie specyfikacji z pliku *S1\_specification.m*.
2. Wczytanie parametrów komponentów z pliku *S1\_parameters.m*.
3. Wywołanie skryptu *S2\_calculate\_real.m* służącego do obliczenia parametrów nieidealnej przetwornicy.
4. Wywołanie skryptu *S2\_structures\_real.m* służącego do uporządkowania danych do struktur.
5. Uruchomienie symulacji *S2\_Boost\_model\_real.slx*.
6. Wywołanie skryptu *S2\_simulation\_real.m* służącego do dokonania obliczeń na danych otrzymanych z symulacji.
7. Wywołanie skryptu *S2\_write\_real.m* służącego do stworzenia raportu *S2\_report\_real.txt*.
8. Zapis danych użytych podczas wykonywania skryptu do pliku *S2\_data\_real.mat*.

Tak jak w przypadku poprzedniego omawianego skryptu, wszystkie poszczególne elementy środowiska wywoływane przez ten skrypt zostaną omówione w dalszej części rozdziału.

### ***S2\_calculate\_ideal.m:***

Skrypt ten służy do obliczenia podstawowych parametrów przekształtnika przy pominięciu strat. Za jego pomocą obliczane są podstawowe wartości tj. współczynnik wypełnienia, rezystancja obciążenia, minimalne wartości indukcyjności oraz pojemności potrzebne do spełnienia warunków odnośnie oscylacji prądu cewki i napięcia wyjściowego. Oprócz tego obliczane są wartości obciążalności prądowej i napięciowej poszczególnych komponentów.

### ***S2\_simulation\_ideal.m:***

Skrypt ten służy do pozyskania wartości maksymalnych, minimalnych, oscylacji oraz skutecznych sygnałów prądowych i napięciowych pochodzących z symulacji *S2\_Boost\_model\_ideal.slx*. Wartości średnie napięcia wyjściowego, prądu wyjściowego, prądu wejściowego, prądu cewki

i diody uzyskiwane są poprzez wybranie ostatniej wartości z sygnałów uśrednionych na okres przełączania. Wartości oscylacji prądu cewki i napięcia wyjściowego są otrzymywane poprzez wyszukiwanie minimów i maksimów lokalnych tych sygnałów i obliczenie różnicy między przedostatnią parą maksimum-minimum. Wartości skuteczne prądu cewki, diody i tranzystora MOSFET uzyskiwane są poprzez wybranie ostatniej wartości z sygnałów pochodzących z wyjść bloków symulacji obliczających wartość skuteczną sygnału. Maksymalne wartości prądu cewki i diody wybierane są spośród ostatnich 10 tysięcy próbek sygnałów za pomocą funkcji *max*.

### ***S2\_write\_ideal.m:***

Skrypt ten służy do wygenerowania raportu *S2\_report\_ideal*. Więcej informacji na temat raportu zamieszczono w części rozdziału poświęconej temu raportowi.

### ***S2\_simulation\_real.m:***

Skrypt ten służy do pozyskania wartości maksymalnych, minimalnych, oscylacji oraz skutecznych sygnałów prądowych i napięciowych pochodzących z symulacji *S2\_Boost\_model\_real.slx*. Sposób obliczania tych wartości jest analogiczny co w przypadku wcześniej przedstawianego skryptu *S2\_simulation\_ideal.m*, jedyną dodatkową zmienną jest wartość sprawności obliczana ze zmiennych przechowujących wartości napięć i prądów wejściowych i wyjściowych.

### ***S2\_write\_real.m:***

Skrypt ten służy do wygenerowania raportu *S2\_report\_real*. Więcej informacji na temat raportu zamieszczono w części rozdziału poświęconej temu raportowi.

### ***S2\_calculate\_real.m:***

Skrypt ten służy do obliczenia podstawowych parametrów przekształtnika z uwzględnieniem strat. Za jego pomocą obliczane są podstawowe parametry tj. współczynnik wypełnienia, rezystancja obciążenia, minimalne wartości indukcyjności oraz pojemności potrzebne do spełnienia warunków odnośnie oscylacji prądu cewki i napięcia wyjściowego. Oprócz tego obliczane są wartości obciążalności prądowej i napięciowej poszczególnych komponentów. Na podstawie parametrów komponentów obliczane są straty mocy, które rzutują na współczynnik wypełnienia, a w konsekwencji na pozostałe zmienne. W tym skrypcie obliczane są dwa współczynniki wypełnienia:  $D_p$ , który odpowiada stanowi pracy stabilnej przed osiągnięciem docelowego punktu pracy, oraz  $D$ , który odpowiada stanowi pracy stabilnej w docelowym punkcie pracy. Współczynnik  $D_p$  nie jest używany w tej części środowiska, lecz jest on wykorzystywany przez część związaną z wyznaczeniem transmitancji. Pozostałe parametry są obliczane dla stanu w docelowym punkcie pracy.

### ***S2\_report\_ideal.txt:***

Ten plik tekstowy jest generowany przez skrypt *S2\_write\_ideal.m* i zawiera informacje na temat obliczeń i wyników symulacji idealnego układu przekształtnika. Informacje te stanowią podstawowe wytyczne przy dobieraniu komponentów przekształtnika tj. wartość indukcyjności oraz pojemności wyjściowej, oraz minimalne wytrzymałości prądowe i napięciowe poszczególnych komponentów. W końcowej części raportu znajdują się na temat prądów i napięć w układzie pochodzące zarówno z obliczeń, jak i z symulacji co pozwala na zweryfikowanie poprawności przeprowadzenia symulacji. Jeżeli istnieją znaczące różnice między danymi z obliczeń oraz z symulacji to należy w pierwszej kolejności przeprowadzić symulację ponownie przy zwiększeniu jej czasu trwania, gdyż możliwe jest, że układ przekształtnika nie osiągnął stanu pracy



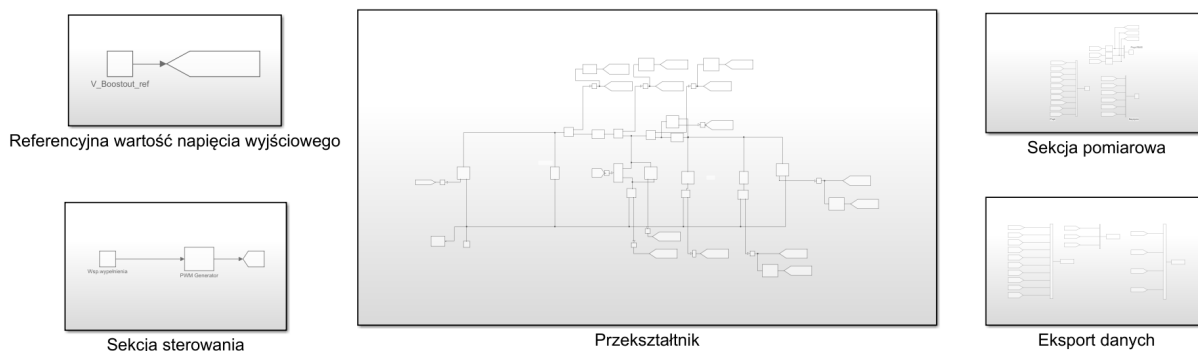
stabilnej.

### ***S2\_report\_real.txt:***

Ten plik tekstowy jest generowany przez skrypt *S2\_write\_real.m* i zawiera informacje na temat poprawności doboru parametrów komponentów przekształtnika. Wartości tj. oscylacje prądu cewki, napięcia wyjściowego czy sprawność przekształtnika jest porównywana z wymaganiami zawartymi w specyfikacji i określone jest, czy wymagania zostały spełnione.

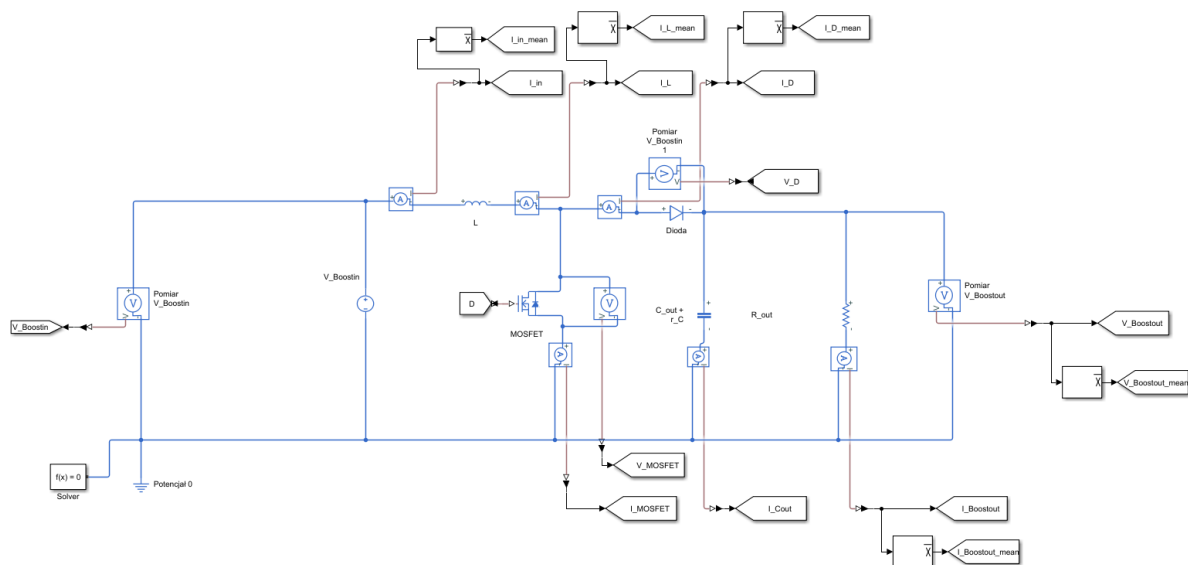
### ***S2\_Boost\_model\_ideal.slx***

Ten model służy do przeprowadzenia symulacji układu przekształtnika typu Boost w układzie otwartym bez uwzględnienia strat. Składa się on z pięciu sekcji:



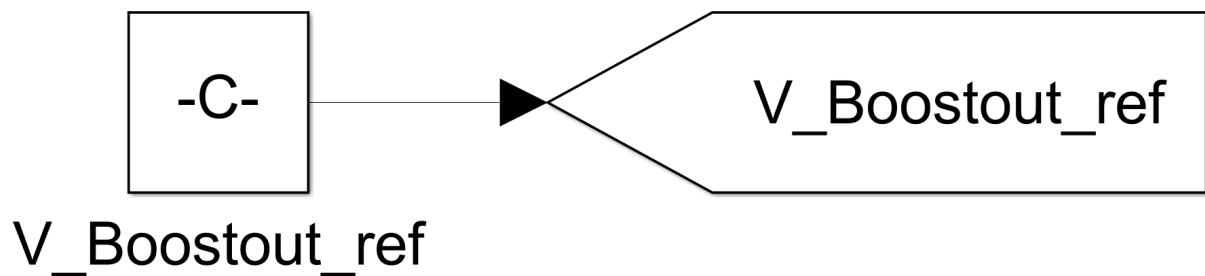
Rysunek 8.3: Sekcje modelu *S2\_Boost\_model\_ideal.slx*

- **Przekształtnik** – główna część modelu symulacyjnego zawierająca obwód przekształtnika typu Boost. Układ przekształtnika odpowiada podstawowemu schematowi z rysunku 3.3 i nie uwzględnia żadnych wielkości pasożytniczych. Dioda oraz tranzystor są elementami idealnymi. Do tej sekcji, na bramkę tranzystora MOSFET, doprowadzony jest sygnał PWM. Z układu mierzone są wartości prądów i napięć na poszczególnych komponentach wraz z wartościami uśrednionymi na okres przełączania oraz wartościami skutecznymi niektórych sygnałów.



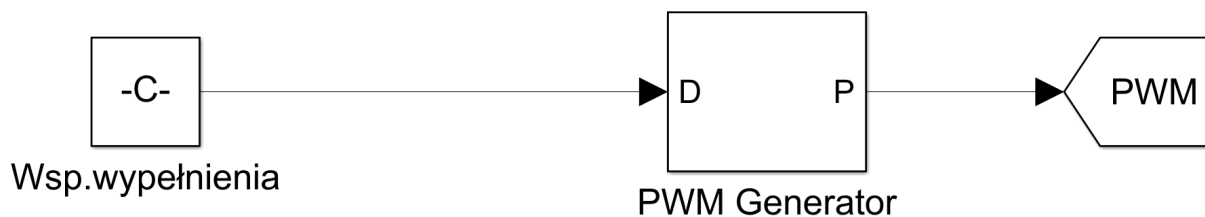
Rysunek 8.4: Sekcja przekształtnika modelu *S2\_Boost\_model\_ideal.slx*

- Referencyjna wartość napięcia wyjściowego – sekcja zawierająca blok generujący referencyjną wartość napięcia wyjściowego zawartą w specyfikacji.



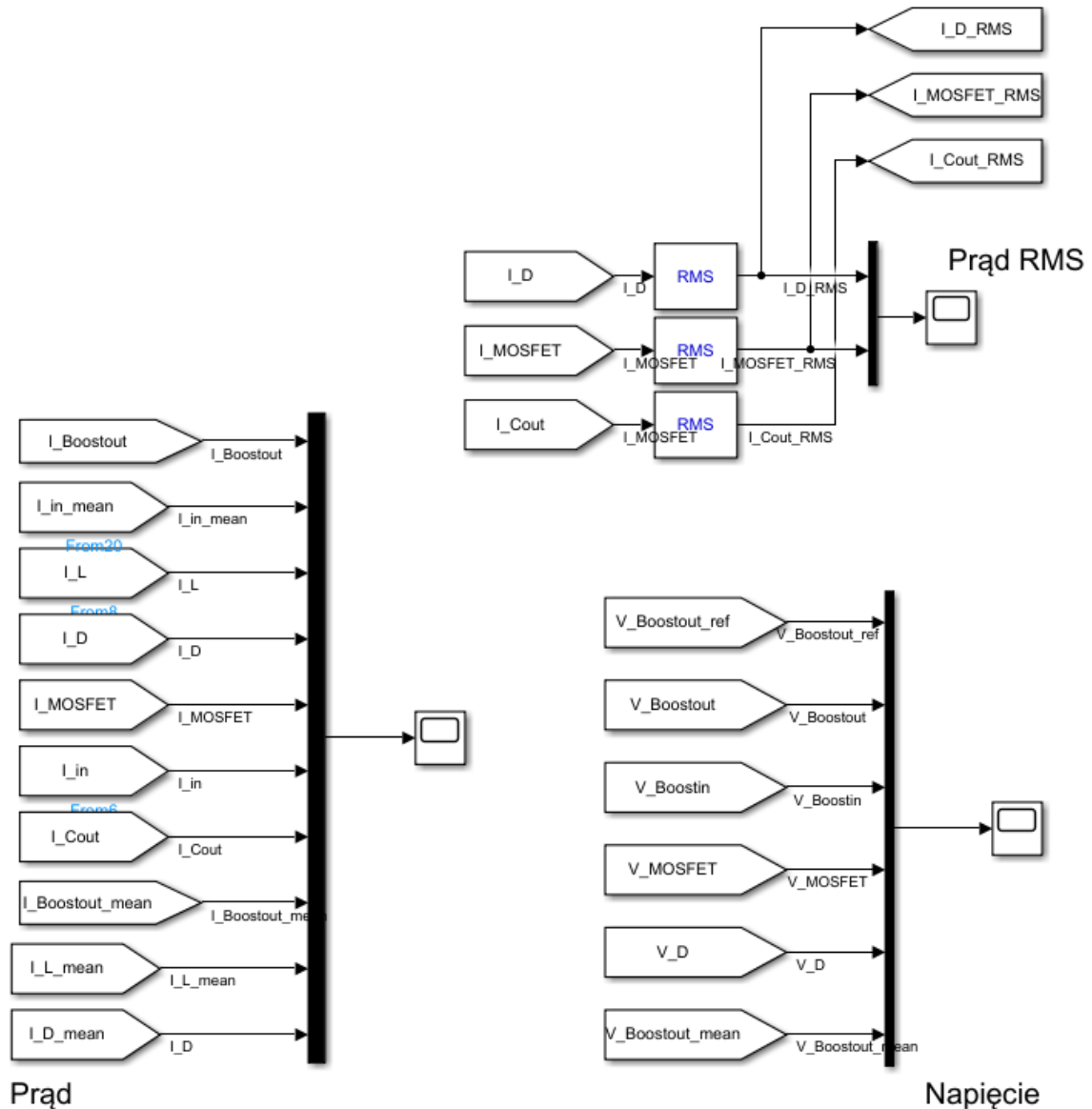
Rysunek 8.5: Sekcja referencyjnej wartości napięcia wyjściowego modelu *S\_Boost\_model\_ideal.slx*

- Sekcja sterowania – sekcja zawierająca blok generujący współczynnik wypełnienia obliczony w skrypcie *S2\_calculate\_ideal.m* oraz blok generatora sygnału PWM, który jest wysyłany do sekcji przekształtnika.



Rysunek 8.6: Sekcja sterowania modelu *S2\_Boost\_model\_ideal.slx*

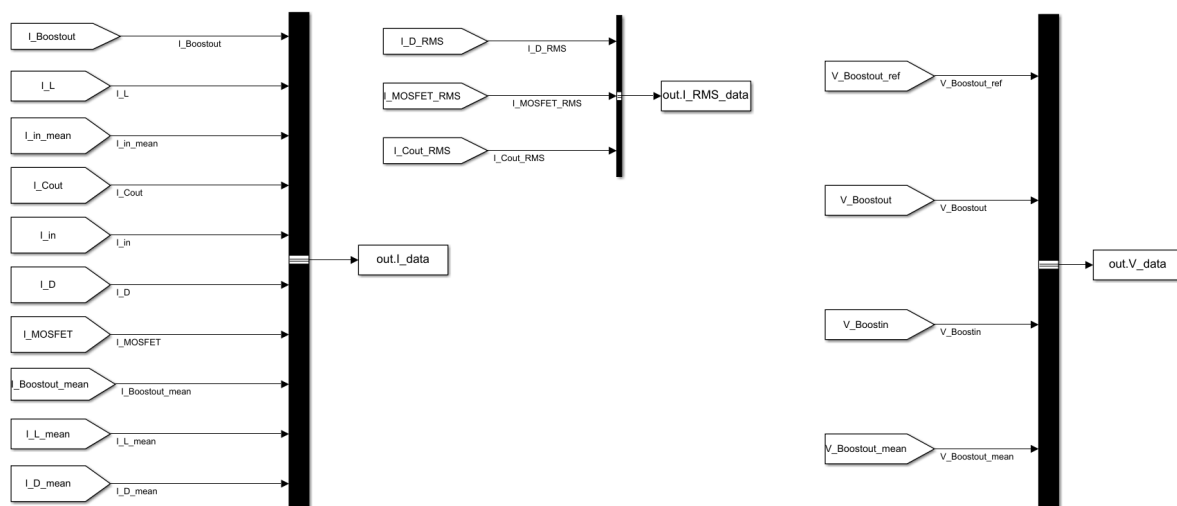
- Sekcja pomiarowa – sekcja służąca do podglądu sygnałów prądowych i napięciowych zbieranych z sekcji przekształtnika oraz wartości referencyjnej napięcia wyjściowego.



Rysunek 8.7: Sekcja pomiarowa modelu *S2\_Boost\_model\_ideal.slx*

- Eksport danych - sekcja łącząca sygnały prądowe i napięciowe w struktury i eksportująca te struktury do przestrzeni roboczej programu MATLAB. Eksportowane są trzy struktury: prądowa, napięciowa oraz zawierająca wartości skuteczne prądów.

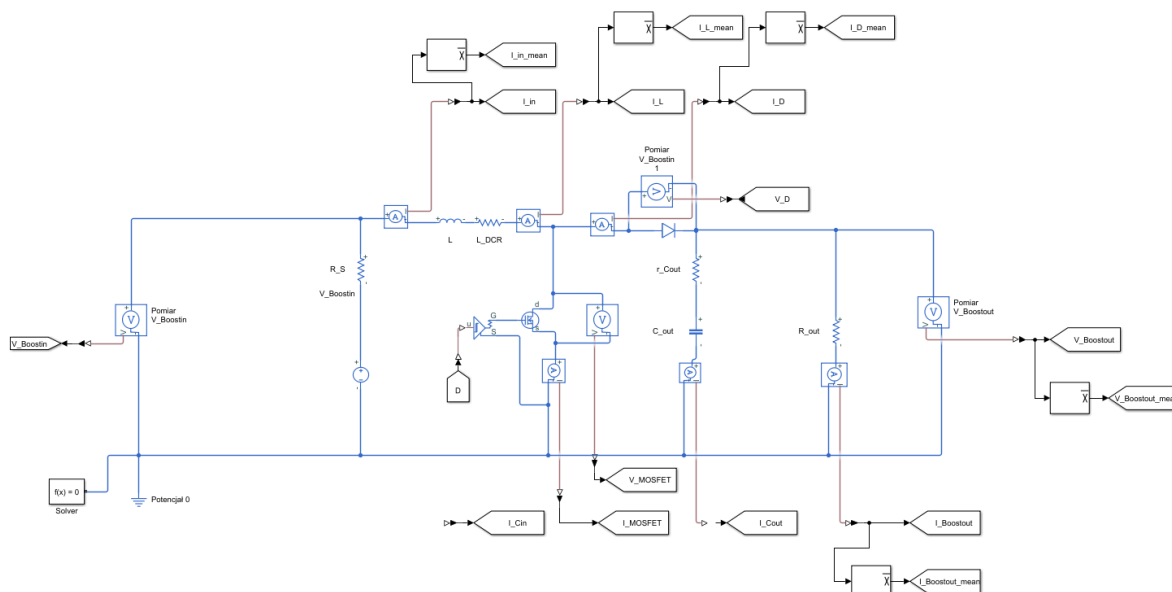
## 8 ŚRODOWISKO SYMULACYJNE BOOST PLATFORM SŁUŻĄCE DO PROJEKTOWANIA UKŁADU PRZETWORNICY DC-DC TYPU BOOST



Rysunek 8.8: Sekcja eksportu danych modelu *S2\_Boost\_model\_ideal.slx*

### *S2\_Boost\_model\_real.slx*

Ten model służy do przeprowadzenia symulacji układu przekształtnika typu Boost w układzie otwartym z uwzględnieniem strat. Składa się on z takich samych pięciu sekcji co model dotyczący idealnego przekształtnika, jedynymi zmianami są dodane elementy pasytywne tj. rezystancje kondensatora wyjściowego i cewki oraz zdeidealizowanie diody i tranzystora MOSFET.



Rysunek 8.9: Sekcja przekształtnika modelu *S2\_Boost\_model\_real.slx*

### 8.2.3. *S3\_Small\_signal*

Ta część środowiska służy do wyznaczenia transmitancji małosygnałowej  $G_{vd}$  przekształtnika zarówno na podstawie podejścia obliczeniowego prezentowanego w rozdziale 6. oraz na podstawie wyników z symulacji. Transmitancja jest wyznaczana przy przejściu ze stanu

stabilnego pracy przekształtnika odpowiadającemu napięciu określone w specyfikacji jako  $V_{out\_p}$  do punktu pracy określonego jako  $V_{out}$ . Na tę część środowiska składają się:

- Skrypt *S3\_main.m* - główny skrypt uruchamiający procedurę symulacyjno-obliczeniową.
- Folder *S3\_functions* – zawierający pozostałe skrypty programu MATLAB.
- Folder *S3\_models* – zawierający modele symulacyjny.
- Folder *S3\_output\_data* – zawierający dane z symulacji i obliczeń.

### ***S3\_main.m***

Skrypt ten jest głównym skryptem tej części środowiska symulacyjnego. Uruchamia on obliczenia i symulację dotyczące wyznaczania transmitancji małosygnałowej przekształtnika. Następuje w nim:

1. Wczytanie współczynników wypełnienia  $D_p$  i  $D$  z pliku *S2\_data\_real.mat*.
2. Wczytanie specyfikacji z pliku *S1\_specification.m*.
3. Wczytanie parametrów komponentów z pliku *S1\_parameters.m*.
4. Wywołanie skryptu *S3\_calculate.m* służącego do obliczenia transmitancji  $G_{vd}$  przekształtnika na podstawie wzoru 6.7.
5. Uruchomienie symulacji *S3\_small\_model.slx*.
6. Wywołanie skryptu *S3\_simulation.m* służącego do wyznaczenia transmitancji małosygnałowej  $G_{vd}$  na podstawie sygnałów z symulacji.
7. Wywołanie skryptu *S3\_structures.m* służącego do uporządkowania danych do struktur.
8. Zapis danych użytych podczas wykonywania skryptu do pliku *S3\_data.mat*. oraz zapis wyznaczonej symulacyjnie transmitancji do pliku *S3\_tf1.mat*.

Poszczególne elementy środowiska wywoływane przez ten skrypt zostaną omówione w dalszej części rozdziału.

### ***S3\_calculate.m***

Skrypt ten oblicza transmitancję małosygnałową  $G_{vd}$  na podstawie wzoru 6.7 używając do tego wartości parametrów komponentów oraz danych ze specyfikacji.

### ***S3\_simulation.m***

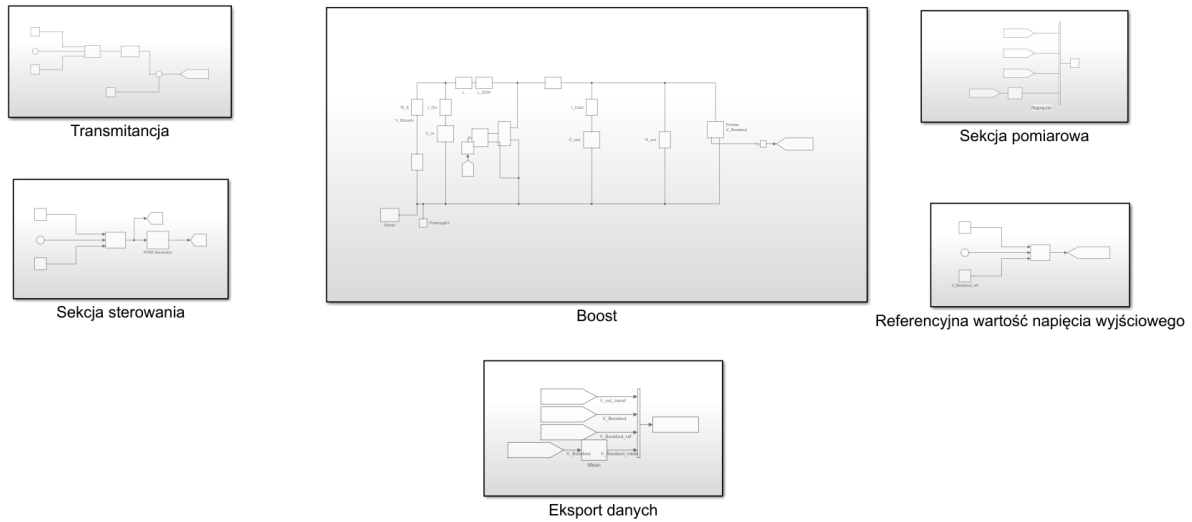
Ten skrypt wyznacza transmitancję małosygnałową  $G_{vd}$  na podstawie danych z symulacji przy użyciu funkcji *tfest* stanowiącej część środowiska MATLAB. Wyznaczenie transmitancji przeprowadzone jest metodą identyfikacji na podstawie pobudzenia skokiem jednostkowym. Sygnał wejściowy i wyjściowy, potrzebne do przeprowadzenia identyfikacji to odpowiednio wartość różnicy współczynnika wypełnienia przed osiągnięciem docelowego punktu pracy i współczynnika wypełnienia w docelowym punkcie pracy oraz sygnał napięcia wyjściowego przekształtnika.

### ***S3\_small\_model.slx***

Ten model posiada podobną strukturę do modeli prezentowanych przy okazji omawiania części środowiska związanego z doбором parametrów komponentów przekształtnika. Tak jak poprzednie modele jest to model przekształtnika typu Boost w układzie otwartym. Czas trwania tej symulacji jest ustawiony na dwukrotność czasu poprzednio prezentowanych symulacji. W pierwszej połowie trwania tej symulacji następuje osiągnięcie przez układ stanu pracy odpowiadającego napięciu określone w specyfikacji jako  $V_{out\_p}$ . W połowie czasu trwania symulacji następuje wzrost wartości współczynnika wypełnienia podawanego przez sekcję sterowania z

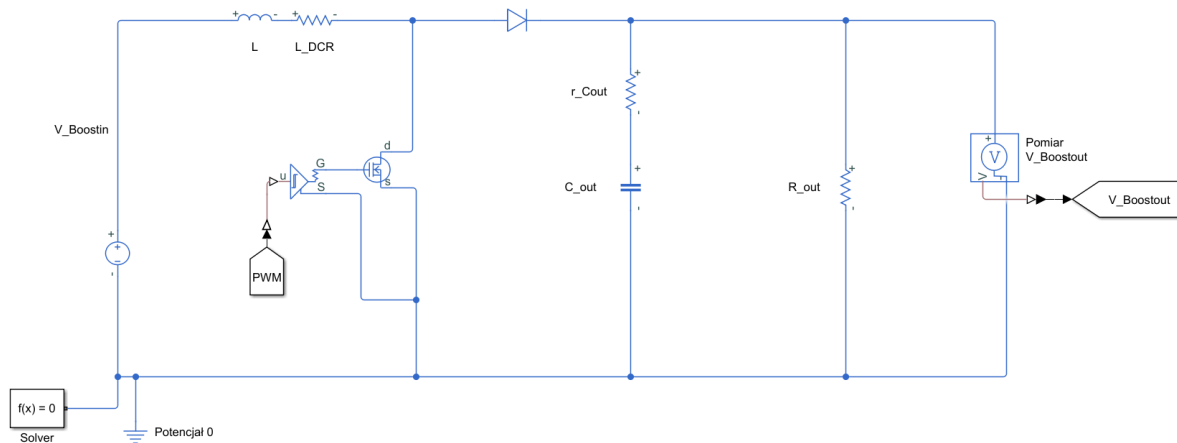
## 8 ŚRODOWISKO SYMULACYJNE BOOST PLATFORM SŁUŻĄCE DO PROJEKTOWANIA UKŁADU PRZETWORNICY DC-DC TYPU BOOST

wartości  $D_p$  do  $D$ , a układ przekształtnika przechodzi do docelowego punktu pracy. Model symulacyjny składa się z sześciu sekcji:



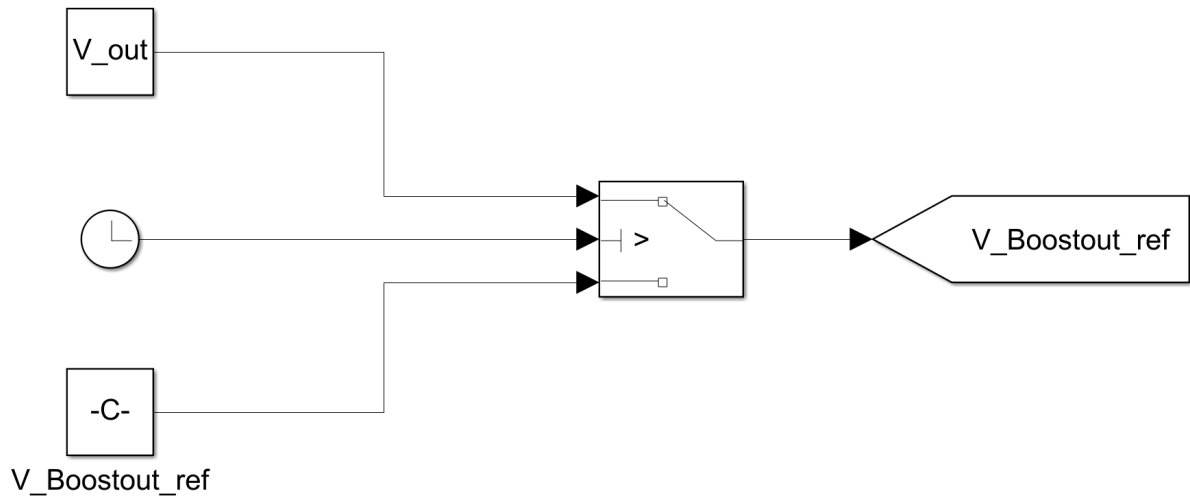
Rysunek 8.10: Sekcje modelu *S3\_small\_model.slx*

- **Przekształtnik** – ta sekcja jest tożsama z sekcją przekształtnika z modelu *S2\_Boost\_model\_real.slx* z tą różnicą, że jedynym sygnałem mierzonym w tej sekcji jest napięcie wyjściowe z przekształtnika.



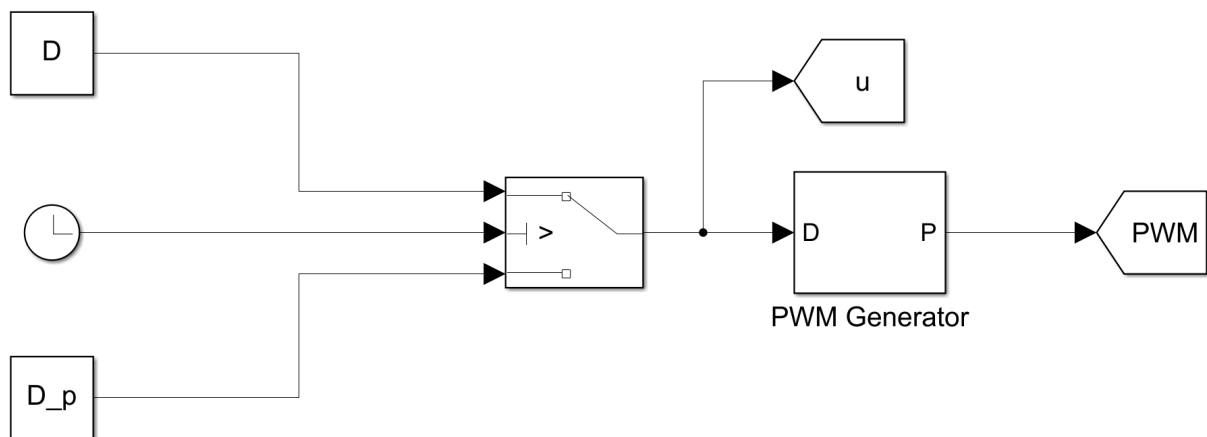
Rysunek 8.11: Sekcja przekształtnika modelu *S3\_small\_model.slx*

- **Referencyjna wartość napięcia wyjściowego** – generuje sygnał referencyjnej wartości napięcia wyjściowego, która w połowie czasu trwania symulacji wzrasta z wartości  $V_{out}$  do  $V_{out_p}$ .



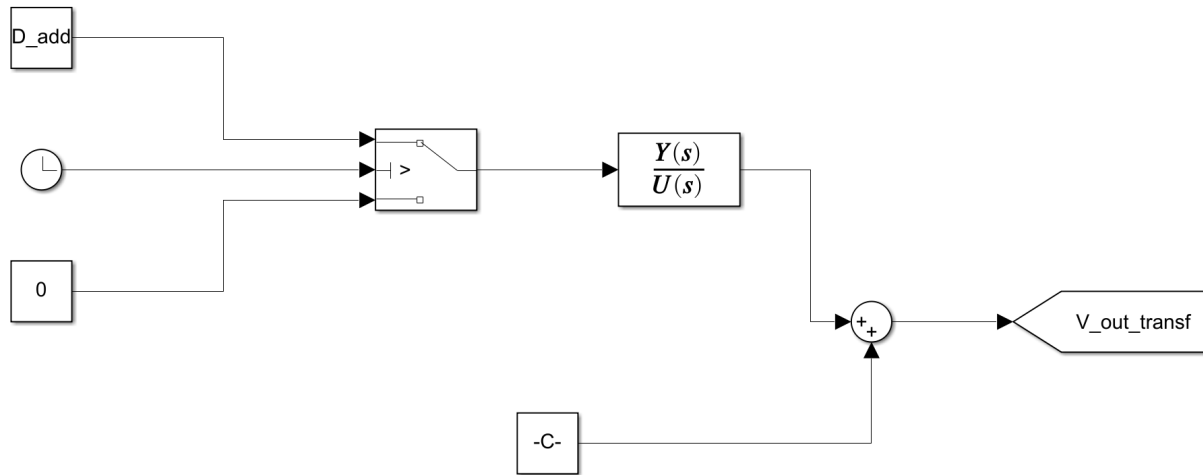
Rysunek 8.12: Sekcja referencyjnej wartości napięcia wyjściowego modelu *S3\_small\_model.slx*

- Sekcja sterowania – podobnie jak w modelach z części *S2\_Power\_stage* jest to sekcja zawierająca blok generujący współczynnik wypełnienia oraz blok generatora sygnału PWM, który jest wysyłany do sekcji przekształtnika. W połowie czasu trwania symulacji współczynnik wypełnienia rośnie z wartości  $D_p$  do  $D$ .



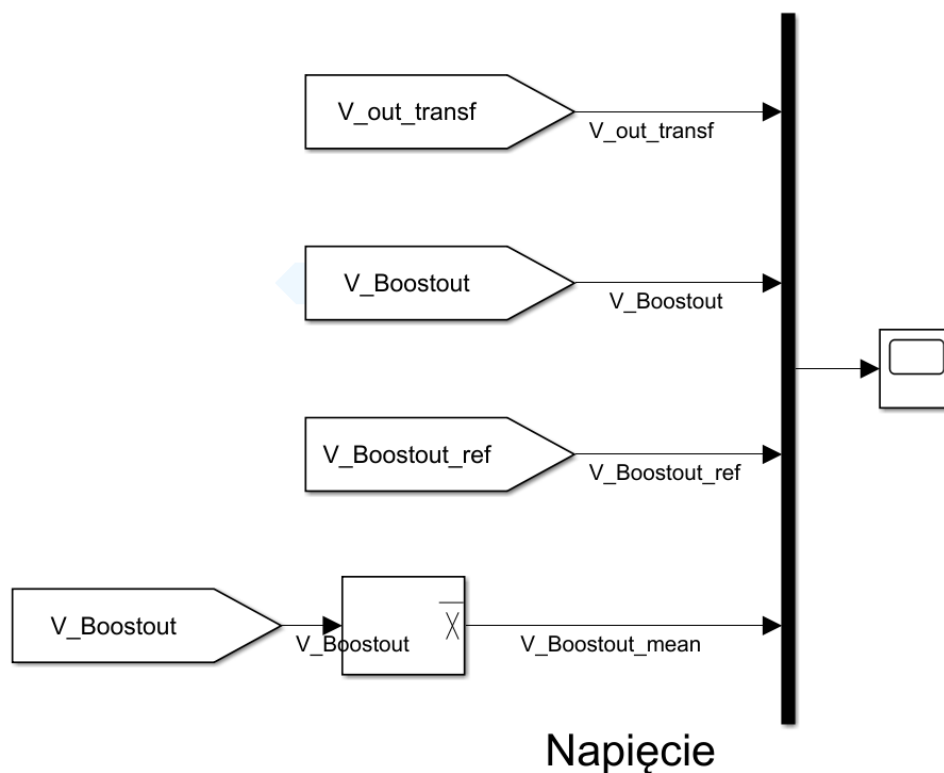
Rysunek 8.13: Sekcja sterowania modelu *S3\_small\_model.slx*

- Transmitancja – sekcja niewystępująca w modelach symulacyjnych z części *S2\_Power\_stage*. Symuluje ona zachowanie transmitancji małosygnałowej  $G_{vd}$  obliczonej przez skrypt *S3\_calculate.m* i eksportuje sygnał wyjściowy z bloku transmitancji celem oceny dokładności obliczeniowej metody wyznaczania transmitancji małosygnałowej.



Rysunek 8.14: Sekcja transmitancji modelu *S3\_small\_model.slx*

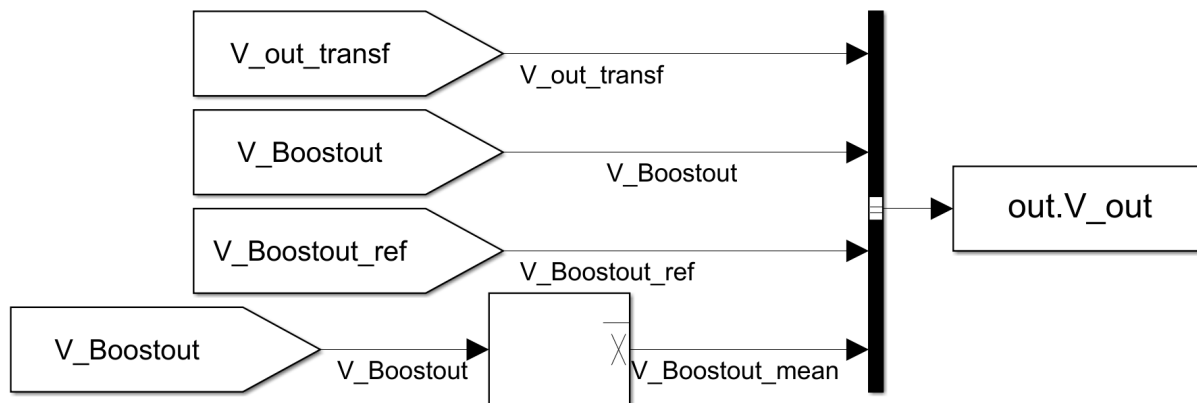
- Sekcja pomiarowa – sekcja służąca do podglądu sygnałów napięcia wyjściowego z przekształtnika, wartości referencyjnej napięcia wyjściowego, odpowiedzi z bloku transmitancji małosygnałowej oraz napięcia wyjściowego z przekształtnika uśrednionego na okres przełączania.



Rysunek 8.15: Sekcja pomiarowa modelu *S3\_small\_model.slx*

- Eksport danych – sekcja łącząca sygnały mierzone w modelu w strukturę i eksportującą tą strukturę do przestrzeni roboczej programu MATLAB.





Rysunek 8.16: Sekcja eksportu danych modelu *S3\_small\_model.slx*

#### 8.2.4. *S4\_D\_decomposition*

Ta część środowiska służy do wyznaczenia parametrów  $K_p$  i  $K_i$  regulatora PI za pomocą metody d-rozbiecia. Na tę część środowiska składają się:

- Skrypt *S4\_main.m* - główny skrypt uruchamiający procedurę symulacyjno-obliczeniową.
- Folder *S4\_functions* – zawierający pozostałe skrypty programu MATLAB.
- Folder *S4\_output\_data* – zawierający dane z symulacji i obliczeń.

##### ***S4\_main.m***

Skrypt ten jest głównym skryptem tej części środowiska symulacyjnego. Uruchamia on obliczenia dotyczące wyznaczania płaszczyzny d-rozbiecia. Następuje w nim:

1. Wczytanie transmitancji małosygnałowej  $G_{vd}$  wyznaczonej z symulacji z pliku *S3\_tf1.mat*.
2. Wczytanie specyfikacji z pliku *S1\_specification.m*.
3. Wczytanie parametrów z pliku *S1\_parameters.m*.
4. Wywołanie skryptu *S4\_calculate.m* służącego do obliczenia granicy stabilności na płaszczyźnie d-rozbiecia oraz krzywych odpowiadających wartościom minimalnym i maksymalnym zapasu fazy i wzmocnienia.
5. Wywołanie skryptu *S4\_ddec\_figure.m* służącego do stworzenia wykresu przedstawiającego krzywe wyznaczone w podpunkcie 6. na płaszczyźnie d-rozbiecia.
6. Zapis danych użytych podczas wykonywania skryptu do pliku *S4\_data.mat*.

Poszczególne elementy środowiska wywoływane przez ten skrypt zostaną omówione w dalszej części rozdziału.

##### ***S4\_calculate.m***

Ten skrypt służy do wyznaczenia współrzędnych  $K_p$ ,  $K_i$  granicy stabilności oraz krzywych odpowiadających wartościom minimalnym i maksymalnym zapasu fazy i wzmocnienia na podstawie podejścia prezentowanego w rozdziale 7.

##### ***S4\_ddec\_figure.m***

Ten skrypt służy do wygenerowania wykresu przedstawiającego płaszczyznę d-rozbiecia z parametrami  $K_p$  i  $K_i$  regulatora PI odpowiednio na osi odciętych i rzędnych wraz z krzywymi

odpowiadającymi granicy stabilności układu przetwornicy oraz wartościom minimalnym i maksymalnym zapasu fazy i wzmocnienia.

#### 8.2.5. *S5\_Genetic\_algorithm*

Ta część środowiska służy do wyznaczenia optymalnych nastaw regulatora PI za pomocą wykorzystania algorytmu genetycznego w celu minimalizacji kryteriów automatyki: całki modułu z uchybu (IAE), całki modułu z uchybu i czasu (ITAE) oraz całki z modułu uchybu i kwadratu czasu (ISTAE).

Na tę część środowiska składają się:

- Skrypt *S5\_main.m* - główny skrypt uruchamiający procedurę symulacyjno-obliczeniową.
- Folder *S5\_functions* – zawierający pozostałe skrypty programu MATLAB.
- Folder *S5\_output\_data* – zawierający dane z symulacji i obliczeń.

##### ***S5\_main.m***

Skrypt ten jest głównym skryptem tej części środowiska symulacyjnego. Uruchamia on obliczenia dotyczące wykorzystania algorytmu genetycznego w wyznaczeniu nastaw regulatora PI. Następuje w nim:

1. Wprowadzenie przez użytkownika skrajnych punktów tworzących obszar płaszczyzny d-rozbiecia będący analizowany przez algorytm genetyczny. Obszar jest ograniczony przez krzywe określające granicę stabilności oraz zapasy fazy i wzmocnienia.
2. Wczytanie parametrów z pliku *S1\_parameters.m*.
3. Wczytanie danych z pliku *S3\_data.m*.
4. Wczytanie danych z pliku *S4\_tf1.m*.
5. Wywołanie skryptu *S5\_genetic\_prep.m* służącego do określenia równań i nierówności ograniczających płaszczyznę d-rozbiecia na podstawie wprowadzonych przez użytkownika punktów skrajnych.
6. Wywołanie skryptu *S5\_genetic.m* uruchamiającego algorytm genetyczny.
7. Wywołanie skryptu *S5\_margin\_step.m*, który wyświetla wykresy Bodego oraz odpowiedzi skokowej dla układu z nastawami regulatora dobranymi według algorytmu genetycznego.
8. Zapis nastaw regulatora do pliku *S5\_data.m*.

##### ***S5\_genetic\_prep.m***

Skrypt ten służy do ograniczenia płaszczyzny d-rozbiecia do obszaru związanego z granicą stabilności oraz krzywymi oznaczającymi wartości zapasu fazy i wzmocnienia ujętymi w specyfikacji. Na podstawie ograniczeń wprowadzonych przez użytkownika w skrypcie *S5\_main.m* zostaje dokonana aproksymacja funkcjami kwadratowymi oraz czterema liniami prostymi tworzącymi prostokąt. Skrypt po uruchomieniu wyświetla ograniczony obszar wraz z krzywymi uzyskanymi z aproksymacji.

##### ***S5\_genetic.m***

Ten skrypt służy do uruchomienia funkcji obliczających optymalne nastawy regulatora PI za pomocą algorytmu genetycznego czyli funkcji: *S5\_pidtest\_IAE.m*, *S5\_pidtest\_ITAE.m* oraz *S5\_pidtest\_ISTAE.m*. Uruchomienie tych funkcji wiąże się z przekazaniem do nich współczynników równań kwadratowych ograniczających płaszczyznę d-rozbiecia.

##### ***S5\_simple\_constraint.m***

Ten skrypt służy do zebrania współczynników równań kwadratowych ograniczających płaszczyznę d-rozbiecia w jeden wektor, który skrypt *S5\_genetic.m* przekazuje do funkcji stosujących algorytm genetyczny.

#### ***S5\_pidtest\_IAE.m***

Ta funkcja służy do wyznaczenia optymalnych nastaw regulatora PI w oparciu o minimalizację kryterium całki z modułu uchybu (ang. Integral of Time Absolute Error – IAE).

#### ***S5\_pidtest\_ITAE.m***

Ta funkcja służy do wyznaczenia optymalnych nastaw regulatora PI w oparciu o minimalizację kryterium całki z modułu uchybu i czasu (ang. Integral of Time multiply Absolute Error – ITAE).

#### ***S5\_pidtest\_ISTAE.m***

Ta funkcja służy do wyznaczenia optymalnych nastaw regulatora PI w oparciu o minimalizację kryterium całki z modułu uchybu i kwadratu czasu (ang. Integral Square of Time multiply Absolute Error – ISAE).

#### ***S5\_margin\_step.m***

Skrypt ten służy do sprawdzenia poprawności wyboru nastaw regulatora PI z wykresu płaszczyzny d-rozbiecia. Po uruchomieniu skrypt tworzy wykresy Bodego układu przetwornicy wraz z oznaczeniem zapasu fazy i wzmocnienia oraz generuje wykres odpowiedzi na skok jednostkowy dla trzech par nastaw regulatora.

### ***8.2.6. S6\_Boost\_closed\_loop***

Ta część środowiska służy do weryfikacji całej procedury wyznaczania komponentów przekształtnika oraz nastaw regulatora PI poprzez symulację układu w pętli zamkniętej. W symulacji porównywane są sygnały napięcia wyjściowego z układu pracującego w pętli zamkniętej oraz otwartej, a także dokonywane jest porównanie z układem w pętli zamkniętej zbudowanego w postaci bloków transmitancji poszczególnych części układu.

Na tę część środowiska składają się:

- Skrypt *S6\_main.m* - główny skrypt uruchamiający procedurę symulacyjną.
- Folder *S6\_models* – zawierający model służący do weryfikacji pracy układu w zamkniętej pętli regulacji.
- Folder *S6\_output\_data* – zawierający dane z symulacji.

#### ***S6\_main.m***

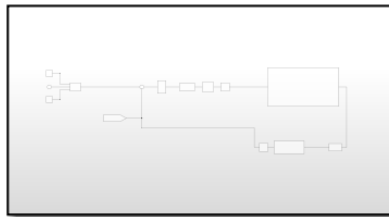
Skrypt ten jest głównym skryptem tej części środowiska symulacyjnego. Następuje w nim:

1. Wczytanie specyfikacji z pliku *S1\_specification.m*.
2. Wczytanie parametrów z pliku *S1\_parameters.m*.
3. Wczytanie danych z pliku *S4\_tfl.m*.
4. Wczytanie danych z pliku *S5\_data.m*.
5. Wybór przez użytkownika z której pary nastaw regulatora PI chce skorzystać, spośród trzech dostępnych.
6. Uruchomienie symulacji *S6\_Boost\_model\_closed.slx*.

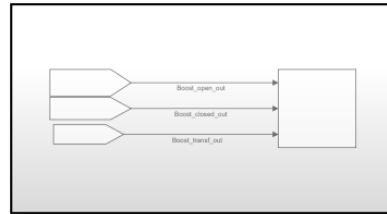
7. Zapis danych z symulacji do pliku *S6\_data.m*.

***S6\_Boost\_model\_closed.slx***

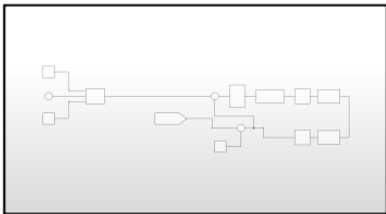
W tym modelu symulacyjnym następuje realizacja scenariusza podniesienia napięcia wyjściowego z przekształtnika typu Boost znana z modelu *S3\_small\_model.slx* za pomocą trzech układów: pracującego w zamkniętej pętli regulacji, w układzie otwartym oraz w układzie zamkniętym, przy czym układ ten jest zbudowany z bloków transmitancji. W tym modelu zastosowano strukturę regulatora PI odpowiadającą strukturze regulatora zaimplementowanego w układzie FPGA. Ten model symulacyjny składa się z pięciu sekcji:



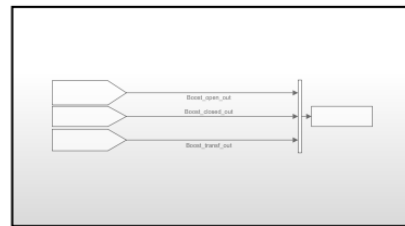
Boost pętla zamknięta



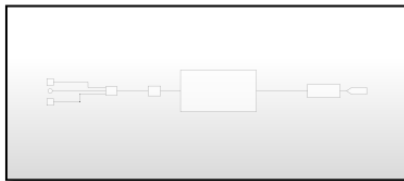
Sekcja pomiarowa



Boost transmitancja



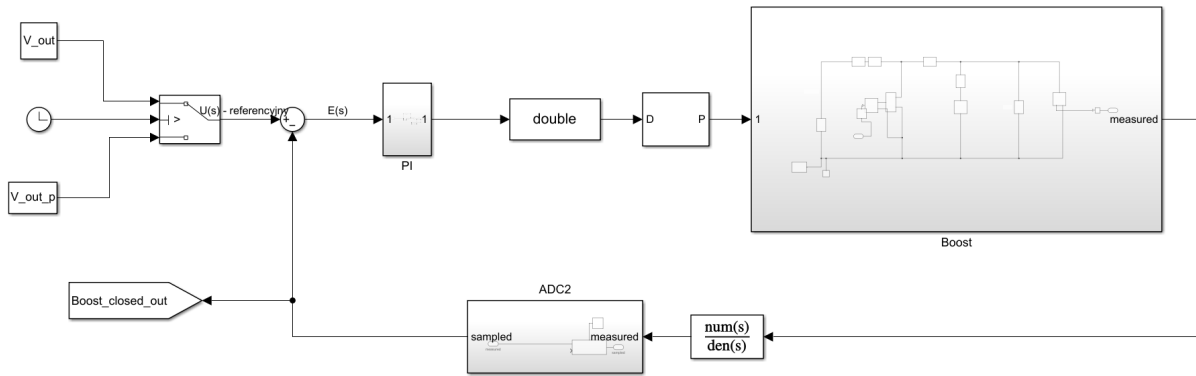
Eksport danych



Boost pętla otwarta

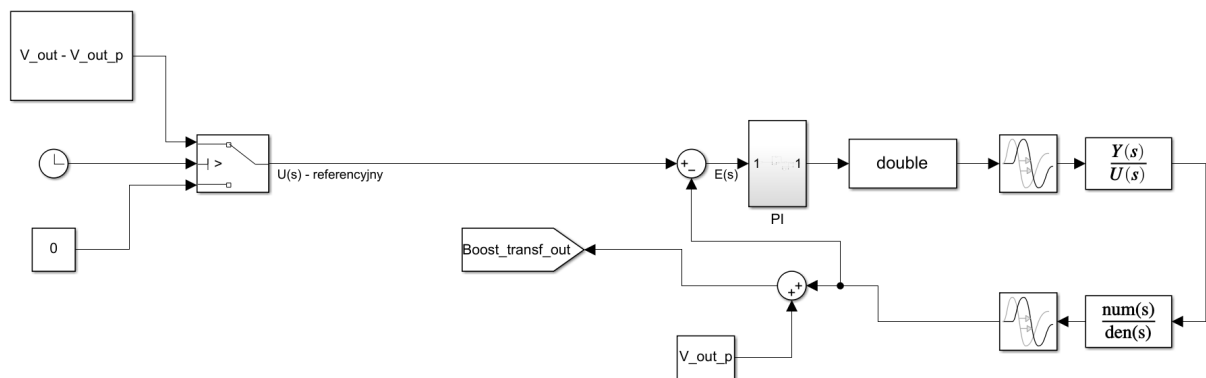
Rysunek 8.17: Sekcje modelu *S6\_Boost\_closed\_model.slx*

- Boost pętla zamknięta - w tej sekcji przekształtnik Boost pracuje w zamkniętej pętli regulacji automatycznej. Napięcie wyjściowe jest próbkowane przez przetwornik analogowo-cyfrowy o parametrach określonych w pliku *S1\_parameters.m*.



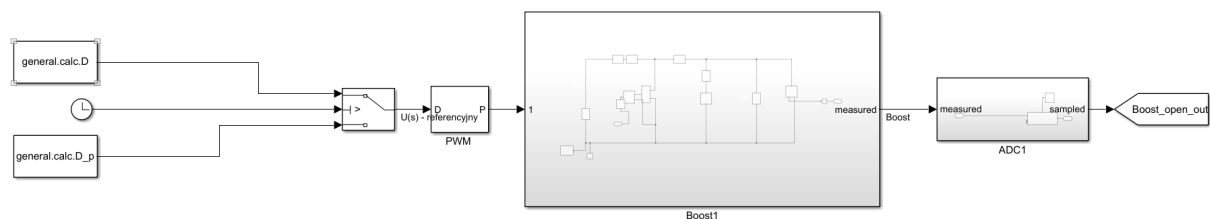
Rysunek 8.18: Sekcja układu regulacji zamkniętej modelu *S6\_Boost\_closed\_model.slx*

- Boost transmitancja - w tej sekcji także zaprezentowano zamknięty układ regulacji, jednak w tym przypadku jest on zbudowany nie za pomocą obwodów elektrycznych lecz transmitancji wyznaczonej w części *S3\_Small\_signal*.



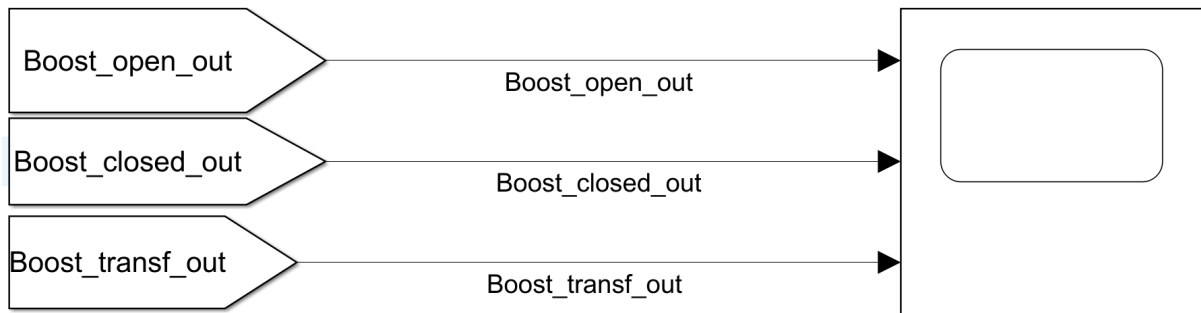
Rysunek 8.19: Sekcja układu regulacji zamkniętej zbudowanego z bloków transmitancji modelu *S6\_Boost\_closed\_model.slx*

- Boost pętla otwarta - w tej sekcji realizowany jest scenariusz z modelu *S3\_small\_model.slx*.



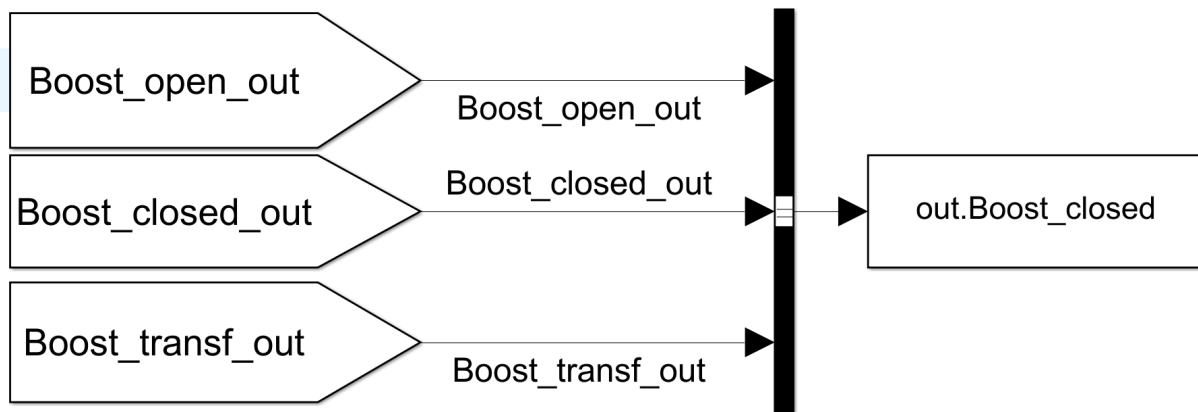
Rysunek 8.20: Sekcja otwartego układu regulacji modelu *S6\_Boost\_closed\_model.slx*

- Sekcja pomiarowa - sekcja służąca do podglądu sygnałów napięcia wyjściowego z trzech układów zawartych w symulacji.



Rysunek 8.21: Sekcja pomiarowa modelu *S6\_Boost\_closed\_model.slx*

- Eksport danych - sekcja łącząca sygnały mierzone w modelu w strukturę i eksportującą tą strukturę do przestrzeni roboczej programu MATLAB.



Rysunek 8.22: Sekcja eksportu danych modelu *S6\_Boost\_closed\_model.slx*

### 8.2.7. Instrukcja obsługi środowiska

1. Dobór parametrów przetwornicy (*S2\_Power\_stage*):
  - (a) W folderze *S1\_Input\_data* w pliku *specification.m* wpisać specyfikację działania przetwornicy.
  - (b) Uruchomić skrypt *S2\_main\_ideal.m*.
  - (c) W folderze *S2\_reports* utworzy się plik *report\_ideal.txt*. Na podstawie tego pliku dobrać parametry przetwornicy w pliku *S2\_parameters.m*.
  - (d) Uruchomić skrypt *S2\_main\_real.m*.
  - (e) Sprawdzić plik *S2\_report\_real.txt* w celu ustalenia czy dobrano dobrze parametry przetwornicy. Jeśli nie to należy zmodyfikować parametry.
2. Transmitancja małosygnałowa (*S3\_Small\_signal*):
  - (a) Uruchomić *S3\_main.m*.
3. D-dekompozycja (*S4\_D\_decomposition*):
  - (a) Uruchomić skrypt *S4\_main.m*. Nie zamykać wyświetlonego wykresu płaszczyzny d-rozbiecia.

4. Algorytm genetyczny (*S5\_Genetic\_algorithm*):
  - (a) Na płaszczyźnie d-rozbita zlokalizować obszar pomiędzy krzywymi *GM\_low* i *GM\_high* oraz *PM\_low* i *PM\_high*. Obszar ten musi znajdować się w obszarze stabilnym. Przeanalizować, które z tych krzywych tworzą ten obszar. Na wykresie oznaczyć punkty przecięcia tych krzywych. W skrypcie *S5\_main.m* należy wpisać współrzędne Z punktów przecięcia. Odszukać punkty należące do obszaru położone najdalej na lewo i na prawo. Wprowadzić współrzędne X tych punktów jako zmienne *left\_boundary* i *right\_boundary*. Odszukać punkty należące do obszaru położone najdalej w górze i w dół. Wprowadzić współrzędne Y tych punktów jako zmienne *upper\_boundary* i *lower\_boundary*.
  - (b) Uruchomić skrypt *S5\_main.m*.
5. Układ zamknięty (*S6\_Boost\_closed\_loop*):
  - (a) Uruchomić skrypt *S6\_main.m*.
  - (b) Otworzyć plik *S6\_Boost\_model\_closed.slx* i przeanalizować wyniki w sekcji pomiarowej modelu.