

Mikołaj KSIĄŻKIEWICZ*

BADANIA SYMULACYJNE STABILIZATORA PRĄDU

Praca przedstawia wyniki badań symulacyjnych stabilizatora prądu, który jest głównym elementem wykonawczym stabilnego źródła prądowego, wykonane w programie PSpice. Celem badań jest zweryfikowanie poprawności działania stabilizatora poprzez wyznaczenie parametrów statycznych (m. in. charakterystyka wyjściowa, rezystancja wewnętrzna) oraz dynamicznych (m. in. odpowiedź skokowa, odłączenie zasilania).

SŁOWA KLUCZOWE: stabilizator, źródło prądu, symulacja, PSpice

1. WPROWADZENIE

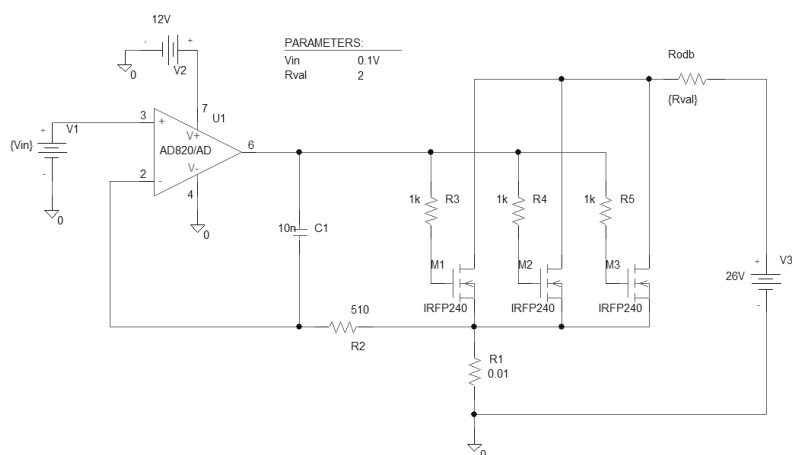
Symulacja komputerowa jest obecnie istotnym narzędziem podczas projektowania wszelkiego typu obiektów. Rozważania teoretyczne nie dają odpowiedzi czy zaprojektowane rozwiązanie będzie funkcjonować zgodnie z założeniami. Badania symulacyjne również nie rozwiewają wszelkich wątpliwości, jednakże dostarczają dodatkowych informacji, które pomagają w ocenie poprawności projektu. Im dokładniejszy model tym bardziej wiarygodne dane otrzymuje się dzięki symulacji. Ponadto można wykonać dowolną liczbę testów bez ponoszenia dodatkowych kosztów związanych na przykład z budową prototypów.

Praca przedstawia wyniki badań symulacyjnych stabilizatora prądu, który jest głównym elementem wykonawczym stabilnego źródła prądowego, wykonane w programie PSpice (źródło zdolne wygenerować prąd o wartości 12,5 A i zasilić odbiornik o mocy 300 W). Celem badań jest zweryfikowanie poprawności działania stabilizatora poprzez wyznaczenie jego charakterystyki prądowo-napięciowej, a na jej podstawie oszacowanie wartości rezystancji wewnętrznej źródła prądu, oraz zarejestrowanie błędu wartości generowanego prądu. Kolejnym celem jest zbadanie właściwości dynamicznych, które pokażą jak zachowuje się układ w stanach przejściowych bądź awaryjnych. Mają one wykazać czy występują zjawiska niepożądane mogące na przykład uszkodzić odbiornik lub sam stabilizator. Ostatecznym wnioskiem z przeprowadzonych badań powinno być stwierdzenie czy badany układ spełnia założone wymagania i można przejść do następnego etapu konstrukcji urządzenia.

* Politechnika Poznańska.

2. SCHEMAT SYMULOWANEGO UKŁADU STABILIZATORA PRĄDU

Rysunek 1 przedstawia schemat symulowanego w programie PSpice stabilizatora prądu. Schemat ideowy został wykonany na bazie precyzyjnego źródła prądowego opisanego w [2]. Do przygotowania obiektu badań oraz ustawienia parametrów symulacji korzystano z [1][3][4].



Rys. 1. Schemat symulowanego układu stabilizatora prądu

Poszczególne symbole oznaczają:

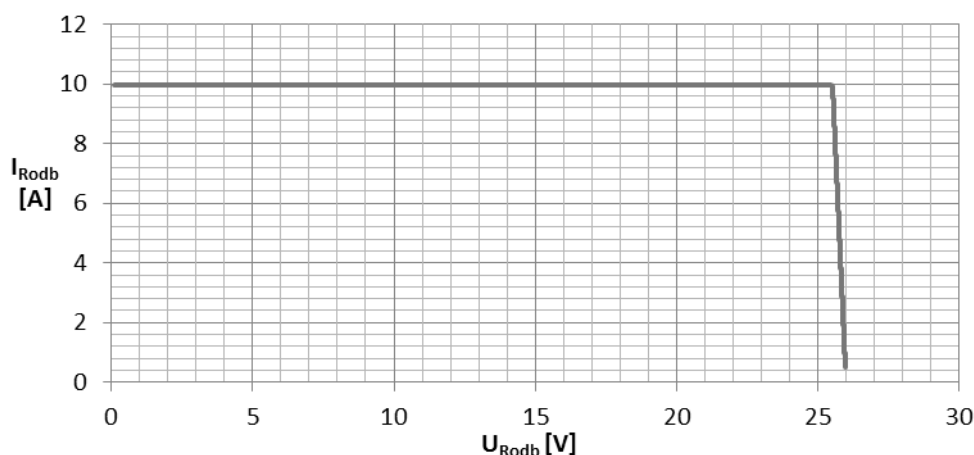
- V1** – {Vin}; źródło to reprezentuje sygnał sterujący wartością prądu stabilizatora,
- V2** – 12 V; zasilanie wzmacniacza operacyjnego,
- V3** – 26 V; zasilanie głównego toru prądowego,
- U1** – AD820; wzmacniacz operacyjny typu Rail-to-Rail IO z możliwością unipolarnego zasilania,
- R1** – rezystor: za jego pomocą realizowane jest ujemne prądowe sprzężenie zwrotne wymagane do poprawnej pracy stabilizatora,
- R2** oraz **C1** – rezystor i kondensator: służą kompensacji wpływu pojemności wejściowej bramek tranzystorów MOSFET,
- R3**, **R4**, **R5** – rezystory: podobnie jak R2 i C1 mają zapobiegać wzbudzeniu się wzmacniacza operacyjnego spowodowanego pojemnościowym obciążeniem wyjścia wzmacniacza,
- Rodb** – {Rval}; wartość rezystancji obciążenia,
- M1**, **M2**, **M3** – tranzystory MOSFET mocy IRFP240.

Wartości elementów podane w nawiasach klamrowych „{}” są parametrami symulacji, w przeciwnym wypadku ich wartości pobierane są z sekcji podpisanej „PARAMETERS”, która występuje na schemacie.

Charakterystyka sterowania $I_{Rodb}(\{Vin\})$ jest liniowa o nachyleniu 100 A/V, co odpowiada konduktancji R1 ($1/R1 = 1/0,01 = 100$ S).

3. WYZNACZENIE CHARAKTERYSTYKI WYJŚCIOWEJ STABILIZATORA PRĄDU

Dla schematu jak na rys. 1, dla danej nastawy prądu (ustalenie wartości napięcia $\{Vin\}$) wyznaczamy charakterystykę $I_{Rodb} = f(U_{Rodb})$ poprzez zmianę rezystancji obciążenia R_{obc} . Wyniki symulacji przedstawia rys. 2 (nastawa prądu wynosiła $Vin = 0,1$ V (10 A)).



Rys. 2. Charakterystyka wyjściowa $I_{Rodb} = f(U_{Rodb})$ stabilizatora prądu, $Vin = 100$ mV (10 A)

Początkowa część liniowa charakterystyki obejmuje punkty: (0,099569; 9,956916) do (25,126061; 9,956906). Na podstawie tych punktów wyznaczono, stosując regresję liniową, wartość rezystancji wewnętrznej stabilizatora prądu (traktowanego w tym przypadku jak źródło prądu).

$$r_w = 176 \text{ M}\Omega \quad (1)$$

Jest to wartość porównywalna z rezystancjami wewnętrznymi osiąganymi przez precyzyjne źródła prądu zbudowane tylko i wyłącznie w oparciu o wzmacniacze operacyjne.

Na podstawie punktu, w którym kończy się zakres liniowy można wyznaczyć minimalne napięcie zasilania stabilizatora, poniżej którego traci on swoje właściwości stabilizacyjne.

Z drugiego prawa Kirchhoffa dla toru wysokoprądowego otrzymujemy:

$$U_{V3} = U_{Rodb} + U_{stab}, \text{ gdzie} \quad (2)$$

$$U_{stab} = U_{M1M2M3} + U_{R1}, \text{ stąd} \quad (3)$$

$$U_{stab} = U_{V3} - U_{Rodb} = 26 - 25,126061 = 0,873939 \text{ V} \quad (4)$$

Minimalne napięcie zasilania wynosi 0,874 V.

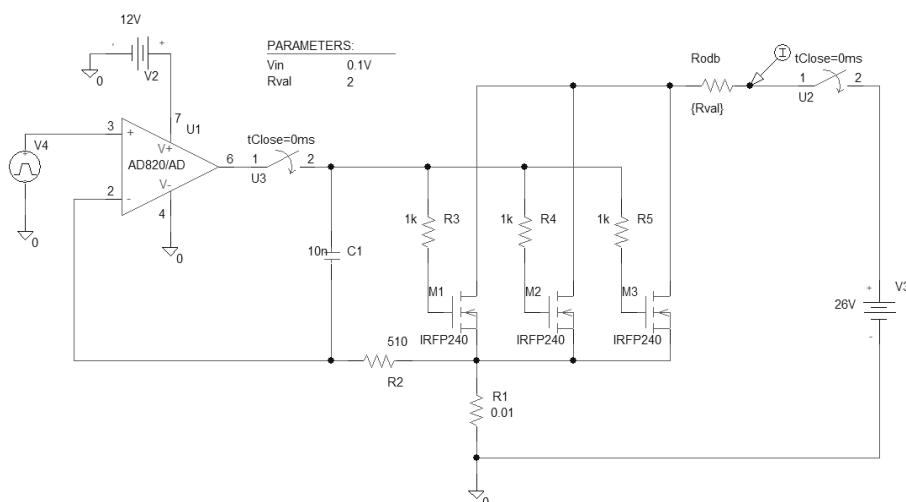
Wyznaczenie maksymalnego napięcia zasilania nie jest możliwe na podstawie samej symulacji, gdyż jest ono uzależnione od maksymalnej mocy strat jaką może rozproszyć stabilizator. Wartość tej mocy zależy głównie od zastosowanego układu chłodzenia.

Błąd statyczny wartości prądu stabilizatora wynosi:

$$\Delta I = 10 - 9,956916 = 0,043084 \text{ A} = 43,084 \text{ mA} \quad (5)$$

4. BADANIE WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH STABILIZATORA PRĄDU

4.1. Schemat układu do badania stanów dynamicznych



Rys. 3. Schemat układu stabilizatora prądu do badania stanów dynamicznych

Na schemacie (rys. 3) umieszczono przełączniki normalnie otwarte, podczas badań były one zastępowane przez przełączniki normalnie zamknięte w zależności od potrzeb. Zastosowano trzy przełączniki:

U2 – załącza/wyłącza zasilanie toru wysokoprądowego,

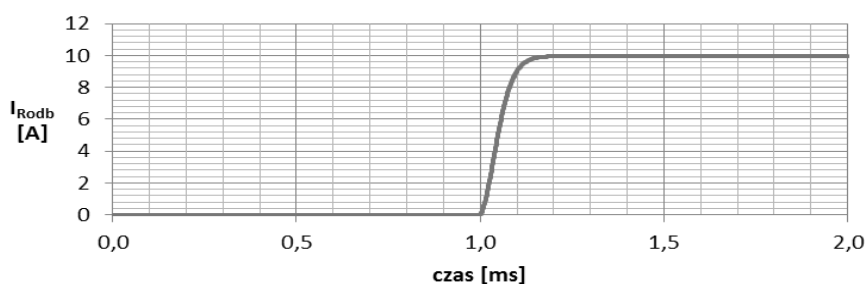
U3 – załącza/wyłącza wyjście wzmacniacza operacyjnego od bramek tranzystorów MOSFET,

V4 – sygnał sterujący w postaci impulsu prostokątnego o nastawnych parametrach.

4.2. Wpływ zmian napięcia sterującego na pracę stabilizatora prądu

- a) Zwiększenie napięcia sterującego z wartości $V_{in} = 0 \text{ V}$ (0 A) do wartości $V_{in} = 0,1 \text{ V}$ (10 A)

Przełączniki U2 i U3 zamknęły się w chwili $t = 0$, sygnał sterujący zmienił się z wartości 0 V do wartości 0,1 V w chwili $t = 1 \text{ ms}$ (czas narastania zbocza wynosił 1 ns). Przebieg prądu odbiornika przedstawia rys. 4.

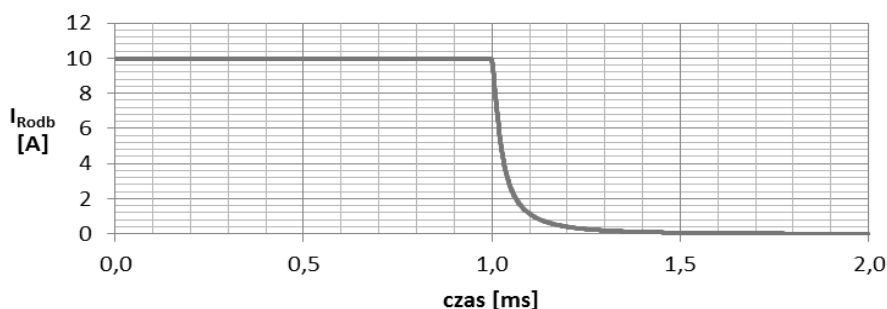


Rys. 4. Przebieg prądu odbiornika po zwiększeniu napięcia sterującego

Przy braku sygnału sterującego prąd stabilizatora wynosi 0 A. Po skokowej zmianie napięcia sterującego do wartości 0,1 V prąd wykładniczo narasta do wartości ustalonej 9,956 A (uznajemy tą wartość jako ustaloną uwzględniając błąd statyczny generowanej wartości prądu przez stabilizator). Czas ustalania wynosi około 0,3 ms od wystąpienia wymuszenia. Nie występuje przesterowanie wartości prądu.

- b) Zmniejszenie napięcia sterującego z wartości $V_{in} = 0,1 \text{ V}$ (10 A) do wartości $V_{in} = 0 \text{ V}$ (0 A)

Przełączniki U2 i U3 zamknęły się w chwili $t = 0$, sygnał sterujący zmienił się z wartości 0,1 V do wartości 0 V w chwili $t = 1 \text{ ms}$ (czas opadania zbocza wynosił 1 ns). Przebieg prądu odbiornika przedstawia rys. 5.

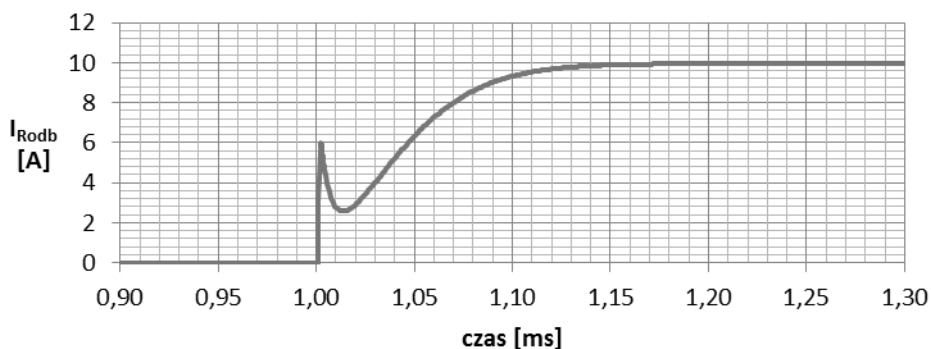


Rys. 5. Przebieg prądu odbiornika po zmniejszeniu napięcia sterującego

Zmniejszenie wartości napięcia sterującego wywołuje podobną reakcję układu jak jego zwiększenie. Podstawową różnicą będzie opadanie wartości prądu, jednakże kształt krzywej (wykładniczy) jest taki sam jak w poprzednim przypadku. Czas ustalenia się prądu jest większy i wynosi około 0,8 ms.

4.3. Doprowadzenie napięcia z wyjścia wzmacniacza operacyjnego do bramek tranzystorów MOSFET

Przełącznik U2 zamknął się w chwili $t = 0$, sygnał sterujący zmienił się z wartości 0 V do wartości 0,1 V w chwili $t = 0$ ms (czas narastania zbocza wynosił 1 ns). Przełącznik U3 zamknął się w chwili $t = 1$ ms. Przebieg prądu odbiornika przedstawia rys. 6.



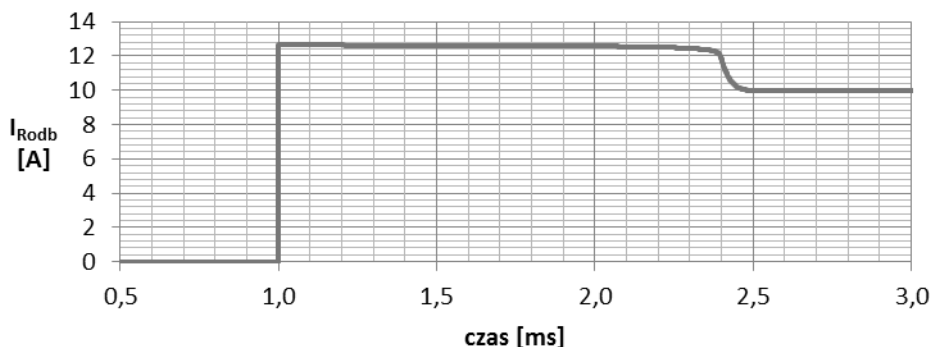
Rys. 6. Przebieg prądu odbiornika po dołączeniu napięcia ze wzmacniacza operacyjnego do bramek tranzystorów MOSFET

Układ reaguje natychmiast po zamknięciu przełącznika. Początkowo występuje krótki impuls prądowy związany najprawdopodobniej z przeładowaniem pojemności w układzie, który nakłada się na zaobserwowane już wcześniej wykładnicze narastanie prądu odbiornika do wartości ustalonej.

Nie udało się przeprowadzić pomyślnej symulacji dla przypadku odłączenia wyjścia wzmacniacza od bramek tranzystorów. Układ jest na tyle wyidealizowany, że rozładowanie się pojemności bramek zajmuje wielokrotnie więcej czasu niż ich naładowanie. Prąd stabilizatora pozostaje bez zmian po odłączeniu wzmacniacza.

4.4. Załączenie/odłączenie zasilania toru wysokoprądowego

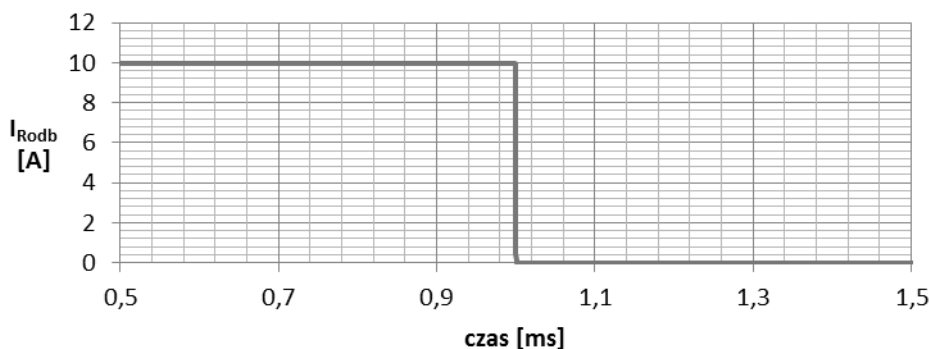
Przełącznik U3 zamknął się w chwili $t = 0$, sygnał sterujący zmienił się z wartości 0 V do wartości 0,1 V w chwili $t = 0$ ms (czas narastania zbocza wynosił 1 ns). Przełącznik U2 **zamknął się** w chwili $t = 1$ ms. Przebieg prądu odbiornika przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Przebieg prądu odbiornika po załączeniu zasilania toru wysokoprądowego

Załączenie zasilania toru wysokoprądowego powoduje skokową zmianę wartości prądu powyżej wartość zadaną (około 12,6 A zamiast 10 A). Stan taki utrzymuje się przez około 1,4 ms po czym wartość prądu opada do wartości zadanej. Biorąc pod uwagę, że przesterowanie wartości prądu utrzymuje się przez niedługi okres czasu w kontekście możliwej wielogodzinnej stabilnej ciągłej pracy, można byłoby uznać, że nie jest to groźne zjawisko dla odbiornika.

Przełącznik U3 zamknął się w chwili $t=0$, sygnał sterujący zmienił się z wartości 0 V do wartości 0,1 V w chwili $t=0$ ms (czas narastania zbocza wynosił 1 ns). Przełącznik U2 **otworzył się** w chwili $t=1$ ms. Przebieg prądu odbiornika przedstawia rys. 8.



Rys. 8. Przebieg prądu odbiornika po wyłączeniu zasilania toru wysokoprądowego

Wyłączenie zasilania toru głównego powoduje skokowe zmniejszenie prądu odbiornika do wartości 0 A. Przebieg prądu odbiornika ma kształt opadającego zbocza impulsu prostokątnego.

5. UWAGI KOŃCOWE

Wyznaczona charakterystyka prądowo-napięciowa jest charakterystyką rzeczywistego źródła prądowego, co jest bazowym założeniem projektu. Obliczona rezystancja wewnętrzna stabilizatora, wynosząca około 176 M Ω , jest bardzo duża i spełnia wymagania projektowe. W stanach dynamicznych nie stwierdzono występowania potencjalnie szkodliwych zjawisk. Układ może przejść do etapu prototypowania.

LITERATURA

- [1] Król A., Moczko J., PSpice symulacja i optymalizacja układów elektronicznych, Wydanie I, Wydawnictwo Nakom, Poznań 1998.
- [2] Tietze U., Schenk Ch., Układy półprzewodnikowe, Wydanie IV, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009, s. 37-62, 179-209, 293-332, 823-834, 939-941.
- [3] Walczak J., Pasko M., Komputerowa analiza obwodów elektrycznych z wykorzystaniem programu Spice, Wydanie I, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
- [4] Walczak J., Pasko M., Zastosowanie programu Spice w analizie obwodów elektrycznych i elektronicznych, Wydanie I, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.

SIMULATION TESTS OF CURRENT STABILIZER

The paper presents simulation results of current stabilizer, which is the main component of stable current source, made in PSpice. The aim of the study is to verify the proper operation of the stabilizer through the designation of static parameters (i.a. output characteristic, internal resistance) and dynamics (i.a. step response).