

REGULACJA PRĄDU W OBWODZIE ELEKTRYCZNYM CEWKOWEJ WYRZUTNI MAGNETYCZNEJ

Zdzisław GOSIEWSKI*, Mirosław KONDRATIUK*, Piotr KŁOSKOWSKI*

*Katedra Automatyki i Robotyki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok

gosiewski@pb.edu.pl, m.kondratiuk@pb.edu.pl, kloskowski@o2.pl

Streszczenie: W niniejszym artykule przedstawiono koncepcję sterowania prądem w obwodzie elektrycznym cewkowej wyrzutni magnetycznej. Zaproponowano sposób realizacji układu regulacyjnego oraz zamodelowano elektroniczne komponenty obwodu. Przeprowadzono symulacje obiektu wraz z regulatorem impulsowym dzięki któremu stabilizowano wartości prądu w obwodzie cewki przy rozładowaniu kondensatora. W czasie symulacji dobrano odpowiednią częstotliwość pracy kontrolera. Badania przeprowadzono dla różnych wartości indukcyjności zwojnicy, co miało na celu określenie poprawności koncepcji sterowania dla zmienionych parametrów obiektu. Przeprowadzono analizę uzyskanych wyników oraz przedstawiono możliwości realizacji fizycznego układu. Niniejsze badania stanowią fazę wstępną przed budową eksperymentalnego modelu cewkowej wyrzutni elektromagnetycznej o stabilizowanym przyspieszeniu rdzenia.

1. WPROWADZENIE

Szybkie sterowanie procesami odgrywa coraz większą rolę we współczesnej technice. Nowoczesne mikrokomputery umożliwiają tworzenie konstrukcji, które nigdy nie uzyskałyby stabilności bez ekstremalnie szybkiej kontroli układów elektronicznych. Przykładami są m.in.: samoloty zwane potocznie „latającymi skrzydłami”, aktywne tłumiki drgań w układach mechanicznych, sterowane łożyska magnetyczne, wirujące magazyny energii kinetycznej, wysokopojemnościowe, kondensatorowe magazyny energii potencjalnej, itp. Można tu również wymienić cewkowe wyrzutnie elektromagnetyczne.

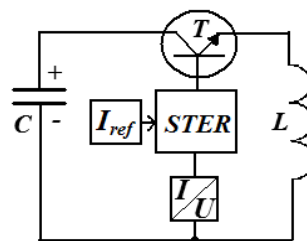
Cewki elektromagnetyczne są elementami powszechnie stosowanymi w różnego typu urządzeniach elektronicznych i elektrotechnicznych. Znajdują również zastosowanie w magnetycznych wyrzutniach cewkowych tzw. coilgunach, gdzie stanowią kluczowy element konstrukcyjny (Hainsworth i Rodger, 1995; Lockner i inni, 2004; Razał i inni, 2007). Rozważania dotyczące doboru cewek oraz zastosowań wyrzutni magnetycznych przedstawiono w innych publikacjach (Gosiewski i Kondratiuk, 2008; Gosiewski i Kondratiuk, 2009).

2. OPIS UKŁADU

Obwód złożony z cewki elektromagnetycznej, rezystancji i kondensatora jest przykładem klasycznego układu elektrycznego. Utrzymanie określonej wartości prądu w takim obwodzie wymaga zastosowania regulatora. W podobnych układach najczęściej wykorzystywane są elementy proporcjonalno-całkujące (PI). W celu bardzo szybkiej i precyzyjnej kontroli badanej wielkości często stosowana jest regulacja impulsowej. Niniejsze opracowanie przedstawia projekt układu automatycznej regulacji

właśnie z regulatorem impulsowym. Badania symulacyjne obiektów zostały przeprowadzone z myślą o przyszłej realizacji układu.

Zaprojektowano obwód założony z kondensatora, cewki elektromagnetycznej, elementu pomiarowego oraz sterownika (rysunek 1).



Rys. 1. Schemat układu sterowania, gdzie: C – kondensator, T – tranzystor, $STER$ – impulsowy układ sterowania prądem cewki, I_{ref} – zadana (pożądana) wartość prądu w obwodzie cewki, I/U – przetwornik mierzący prąd cewki, L – cewka elektromagnetyczna

Zasymulowano układ sterowania z przetwornikiem próbkującym stan prądu w cewce elektromagnetycznej. Wartość prądu była odczytywana dzięki elementowi pomiarowemu I/U . Gdy prąd w obwodzie nie osiągał zadanej wartości I_{ref} sterownik rozładowywał przy pomocy tranzystora T kondensator C przez obwód cewki L . Gdy prąd przekraczał określony poziom, sterownik odcinał dopływ sygnału sterującego tranzystorem i rozwiera obwód. Przy zastosowaniu odpowiednich parametrów układu: pojemności i napięcie ładowania kondensatora, rezystancji i indukcyjności cewki oraz czasu próbkowania, możliwa jest precyzyjna regulacja prądu płynącego przez obwód cewki elektromagnetycznej.

Badanie powyższego układu automatycznej regulacji ma na celu zastosowanie podobnego rozwiązania do po-

średniego sterowania ruchem rdzenia wyrzutni elektromagnetycznej, który jest wciągany do środka cewki na skutek przepływu prądu przez uzwojenie solenoidu.

3. REALIZACJA UKŁADU

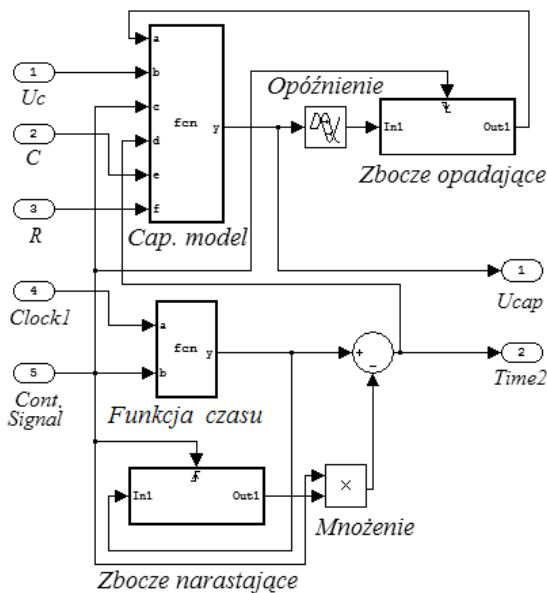
Do zaprojektowania i przebadania wyżej opisanego układu zastosowano oprogramowanie MATLAB z pakietem symulacyjnym Simulink. Zamodelowano poszczególne elementy obwodu cewki. Funkcjonalność całego układu została przebadana na drodze symulacji.

3.1 Kondensator

Schemat modelu kondensatora zbudowany w Simulinku został przedstawiony na rysunku 2. Blok o nazwie „Cap. model” został stworzony w oparciu o równanie ruchu opisujące dynamikę kondensatora. Rozwiązanie tego równania zostało przedstawione jako:

$$U(t) = U_c e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1)$$

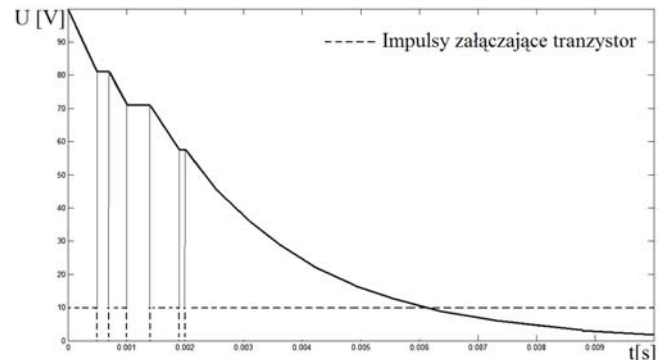
gdzie: $U(t)$ – napięcie rozładowania kondensatora [V], U_c – wartość napięcia do jakiej został naładowany kondensator [V], R – rezystancja w obwodzie cewki [Ω], C – pojemność kondensatora [F], t – czas rozładowywania kondensatora [s].



Rys. 2. Schemat kondensatora zbudowany w Simulinku

Bloki zamieszczone w układzie, zostały użyte w celu odwzorowania rzeczywistego zachowania kondensatora w obwodzie elektrycznym. W procesie rozładowania kondensatora, napięcie spada zgodnie z równaniem (1), natomiast w czasie gdy tranzystor nie przewodzi prądu, jest utrzymywane na stałym poziomie. Stopniowe rozładowywanie kondensatora jest trudne do modelowania, ponieważ napięcia nie jest opisane funkcją ciągłą. W celu reali-

zacji niezbędne okazało się wprowadzenie do układu dodatkowych bloków, które reagowały na zbocze narastające i opadające sygnału czasowego. Przedstawiony model symulacyjny umożliwia w miarę poprawne odwzorowanie procesu. Wyniki jego działania przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Proces stopniowego rozładowywania kondensatora przez tranzystor, gdzie U – napięcie na okładkach kondensatora

Na rysunku 3 przedstawiono w sposób symboliczny czas załączania tranzystora. Parametry symulowanego obiektu to: $U_c = 100V$ i $R = 0,5\Omega$.

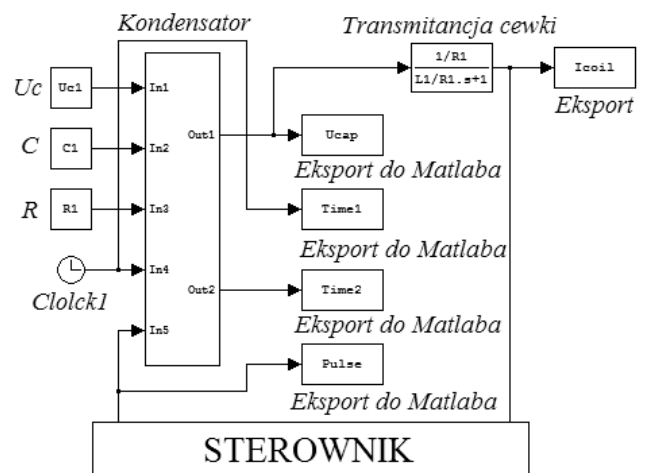
3.2 Cewka elektromagnetyczna

Solenoid został zamodelowany w postaci transmitancji $G(s)$ opisującej dynamikę prądową obwodu RL :

$$G(s) = \frac{1}{Ls + R} \quad (2)$$

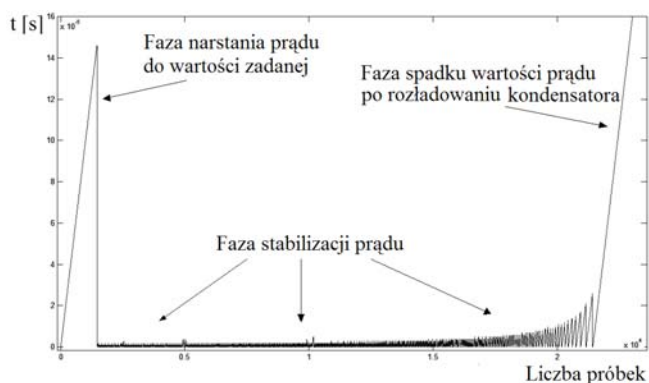
gdzie: R – rezystancja [Ω], L – indukcyjność cewki [H].

Sygnałem wejściowym transmitancji jest napięcie rozładowania kondensatora. Sygnałem wyjściowym jest prąd w obwodzie cewki. Układ symulacyjny kondensatora i cewki został przedstawiony na rysunku 4. Z modelowanych obiektów wyprowadzono szereg sygnałów służących do monitorowania pracy układu. Są to między innymi: prąd cewki (I_{coil}), napięcie rozładowania kondensatora (U_{cap}), czas symulacji ($Time1$), impulsy załączania tranzystora ($Pulse$) oraz „czas piłokształtny” ($Time2$).



Rys. 4. Układ symulacyjny kondensatora z cewką

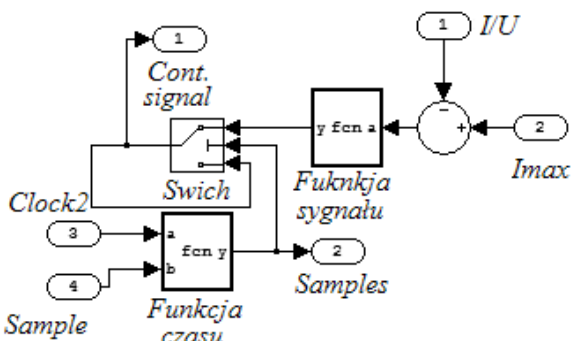
Równanie (1) opisuje dynamikę kondensatora dla stałej wartości napięcia. Przy stopniowym rozładowywaniu, wartość U ulega jednak zmianie (rysunek 3). Dla każdej kolejnej fazy rozładowywania musi zostać określony czas narastający od zera. Celem rozwiązania problemu, wprowadzono generator sygnału piłokształtnego modelujący stopniowe rozładowywanie kondensatora. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy przebieg „czasu piłokształtnego” w układzie automatycznej regulacji prądu cewki zasilanej z kondensatora.



Rys. 5. „Czas piłokształtny” służący do symulacji rozładowania kondensatora i opisu pracy układu

3.3. Regulator

Umieszczenie sterownika w symulowanym układzie regulacji przedstawiono na rysunek 4. Obiekt został zamodelowany jako urządzenie próbkujące z zadaną częstotliwością wartość prądu przepływającego przez obwód cewki elektromagnetycznej. W odpowiedzi na sygnał płynący ze sprzężenia zwrotnego, regulator włącza lub wyłącza tranzystor. Schemat zamodelowanego urządzenia wraz z sygnałami we/wy, przedstawiono na rysunku 6. Z regulatora wyprowadzono sygnał sterujący tranzystorem (*Cont. signal*), który wykorzystano do analizy pracy układu.

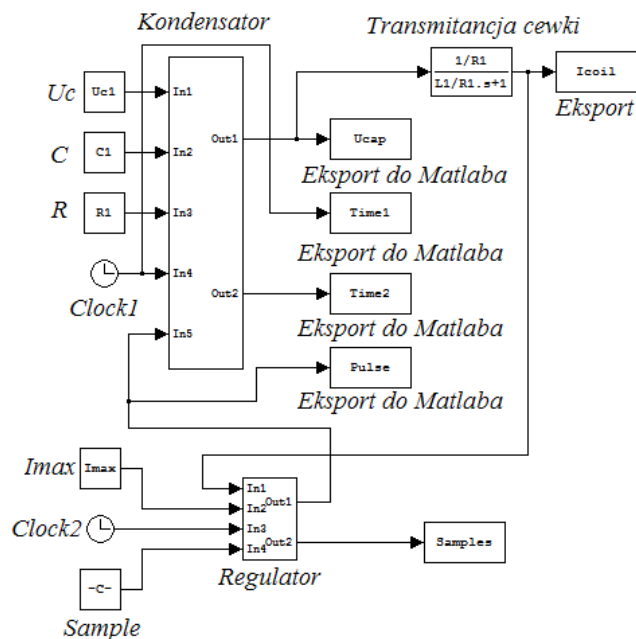


Rys. 6. Schemat regulatora zastosowanego w układzie stabilizacji prądu

Na rysunku 7 pokazano niezbędne sygnały wejściowe podawane do regulatora, tj. zadany prąd (I_{max}), czas symulacji ($Clock2$) oraz czas próbkowania ($Sample$). Do regulatora wpływa również informacja o prądzie płynącym

w obwodzie cewki (I_{coil}). Zapewnia to realizację sprzężenia zwrotnego w układzie automatycznej regulacji.

Elektroniczna realizacja układu nosi nazwę „choppera prądowego”. W porównaniu z układami regulowanymi szerokością impulsu (PWM), zasadniczym ograniczeniem przedstawionego regulatora jest brak możliwości wpływu na czas trwania impulsów wyjściowych. Podczas fazy stabilizacji prądu generowany jest sygnał prostokątny o stałej, zadanej częstotliwości. Jest to konstrukcyjnie proste rozwiązanie, które umożliwia sterowanie szybkimi i ekstremalnie szybkimi procesami.



Rys. 7. Regulatora w układzie wraz z zaznaczonymi sygnałami wejściowymi

3.4. Testowanie modelu

W celu sprawniejszej obsługi zaprojektowanego układu regulacji, stworzono skrypt uruchamiający symulację. Program ten umożliwił również wprowadzenie podstawowych danych i wyświetlenie wyników. Poniżej przedstawiono fragment listingu programu z parametrami wejściowymi modelu i regulatora:

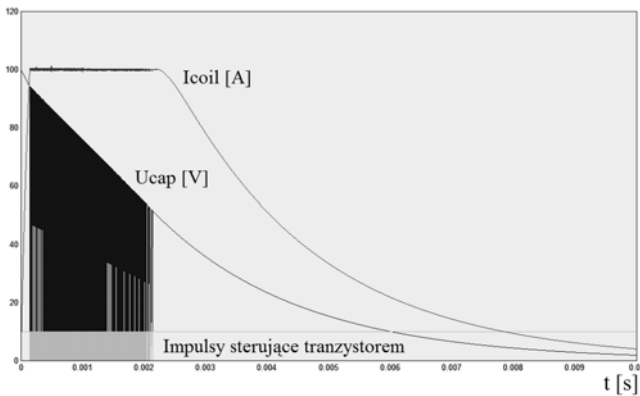
```
%Kondensator i cewka
Uc1=100; %Napięcie początkowe kondensatora, [V]
R1=0.5; %Rezystancja cewki, [Ω]
C1=0.0047; %Pojemność kondensatora, [F]
L1=0.0001; %Indukcyjność cewki, [L]
%Regulator
Imax=100; %Wartość zadana prądu, [A]
Sample=0.000001; %Czas próbkowania, [s]
```

Całkowity czas symulacji jest dobierany w menu Simulinka (10ms). Innym bardzo ważnym parametrem jest krok symulacji, który we wszystkich badaniach przyjmował stałą wartość (100ns). Jest to konieczne do umożliwienia ewentualnej praktycznej realizacji badanego układu sterowania.

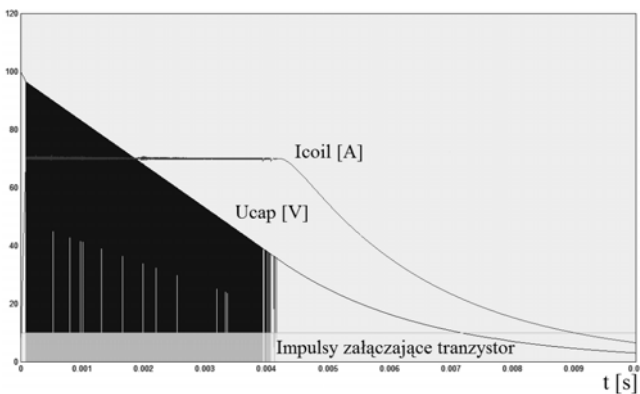
4. WYNIKI I WNIOSKI

Na rysunkach 8 – 13 przedstawiono wyniki działania symulacji układu automatycznej regulacji prądu w obwodzie cewki elektromagnetycznej. Próbkowanie układu pomiarowego zostało określone na poziomie 1MHz. Doboru dokonano w oparciu o dokumentację techniczną sterowników FPGA Spartan 3 firmy Xilinx (2005), które posiadają zegar o częstotliwości nawet do 200MHz. Umożliwia to implementację algorytmów bardzo szybkiego sterowania. Częstotliwość próbkowania przyjęta w symulacjach jest zatem realnie osiągalna przez układy fizyczne. Istotny jest również dobór odpowiedniego urządzenia załączającego obwód prądowy cewki. Czasy otwarcia kanału przewodzącego np. w tranzystorach MOS-FET oscylują wokół kilku lub kilkunastu nanosekund. Nie wpływa to więc znacząco na dynamikę układu. Innymi istotnymi parametrami przełącznika są również: dyssypacja mocy, napięcie pracy, dopuszczalny prąd ciągły oraz częstotliwościowe pasmo przenoszenia. W oparciu o dokumentację techniczną można wyszczególnić kilka modeli tranzystorów spełniających wymogi szybkiego przełączania dużych prądów (International Rectifier, 2008).

Wykresy obrazujące wyniki przeprowadzonych symulacji przedstawiają napięcie rozładowywania kondensatora (U_{cap} [V]), stabilizowany prąd (I_{coil} [A]) oraz impulsy załączające tranzystor.

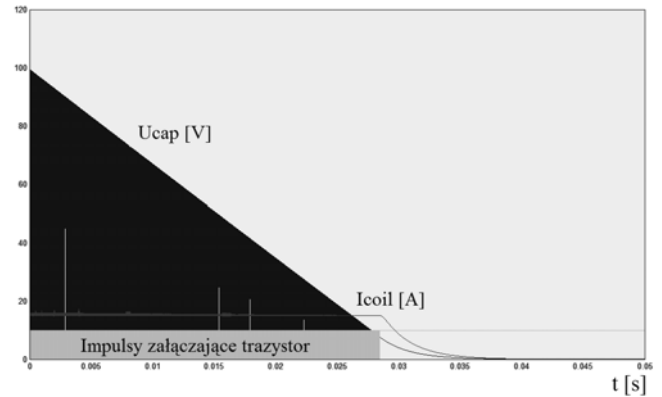


Rys. 8. Wyniki symulacji układu dla parametrów zgodnych z powyższym listingiem

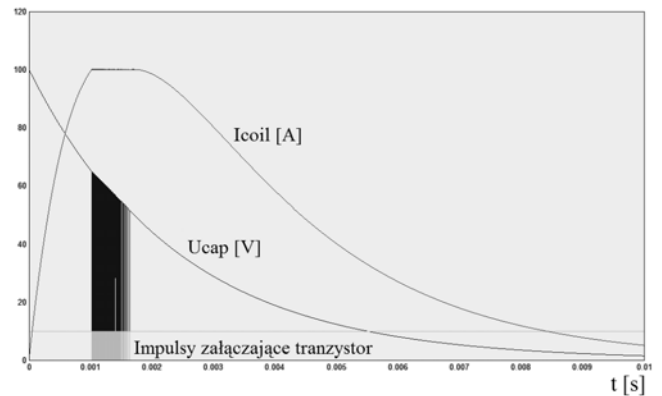


Rys. 9. Wyniki symulacji układu dla parametrów zgodnych z powyższym listingiem lecz z $I_{max}=10A$

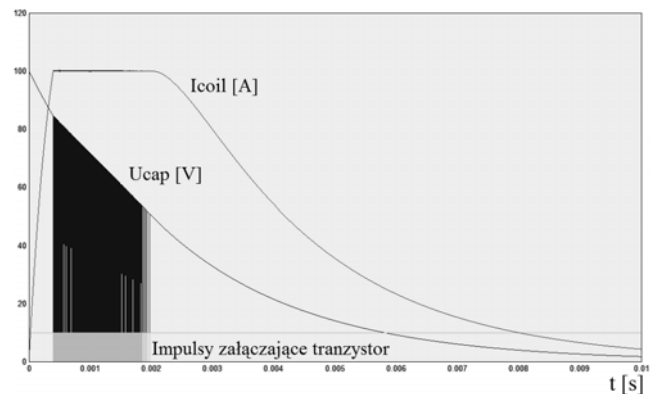
Na rys. 8 – 10 przedstawiono kilka symulacji z różnymi wartościami parametrów modelu. Możliwy jest również dobór innego czasu próbkowania, który jest powiązany z inercyjnymi właściwościami badanych sygnałów. W przypadku zwiększenia wartości indukcyjności jednocześnie zwiększa się bezwładność prądowa układu. Wówczas częstotliwość próbkowania sygnału wychodzącego z obiektu może ulec zmniejszeniu. Rysunki 11 i 12 przedstawiają wyniki symulacji przy zwiększonej indukcyjności cewki.



Rys. 10. Wyniki symulacji układu dla parametrów zgodnych z powyższym listingiem z $I_{max}=15[A]$ i czasem symulacji 50ms



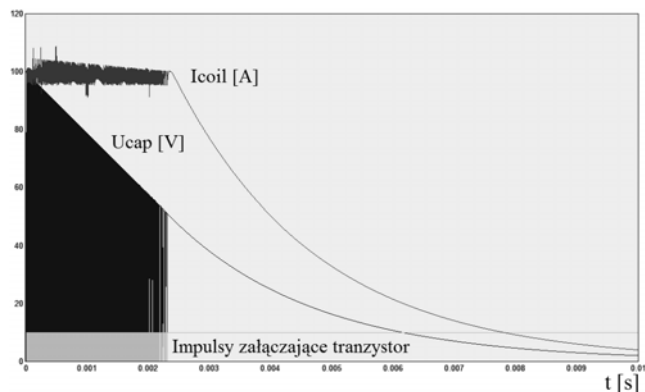
Rys. 11. Wyniki symulacji układu dla parametrów zgodnych z powyższym listingiem lecz z indukcyjnością cewki $L=500\mu H$



Rys. 12. Wyniki symulacji układu dla parametrów zgodnych z powyższym listingiem lecz z indukcyjnością cewki $L=250\mu H$

Gdy zmniejszono indukcyjność zwojnicy i zachowany taką samą częstotliwość próbkowania zaobserwowano znaczne pogorszenie się stabilizacji prądu (rysunek 13).

Należy zaznaczyć, że dynamika układu zależna jest również od rezystancji uzwojenia i geometrii cewki. Skonstruowany model może posłużyć jako pomoc w doborze parametrów modelu rzeczywistego takich jak opór elektryczny czy indukcyjność własna zwojnicy.



Rys. 13. Wyniki symulacji układu dla parametrów zgodnych z powyższym listingiem lecz z indukcyjnością cewki $L=10\mu\text{H}$

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wskazują, że przedstawiona koncepcja regulacji prądu w obwodzie RLC może być praktycznie zrealizowana. Projektowanie i symulacja przedstawionego układu odbywały się z myślą o zastosowaniu sterownika FPGA jako platformy sprzętowej regulatora impulsowego. Moduł wejść analogowych sterowników Spartan 3 firmy Xilinx, po uprzedniej odpowiedniej modyfikacji, może posłużyć jako przetwornik pomiarowy do odczytywania wartości prądu w cewce. Dobór tranzystora załączającego obwód elektryczny został zrealizowany na podstawie analizy dokumentacji technicznej poszczególnych modeli takich przełączników półprzewodnikowych. Dalsze prace mają na celu zaprojektowanie i przebadanie koncepcji regulatora siły działającej na ferrytowy rdzeń znajdujący się w polu magnetycznym cewki. Wyniki analiz pozwolą ustalić, czy przedstawiona koncepcja regulacji ma zastosowanie przy konstrukcji wyrzutni magnetycznej o kontrolowanym przyspieszeniu obiektu wyrzucanego.

LITERATURA

1. Gosiewski Z., Kondratiuk M. (2008), Introductory Investigations of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Coil Launcher, Scientific Proceedings of Riga Technical University, Series 6: *Transport and Engineering. Transport. Aviation Transport*, No. 27, 57-69.
2. Gosiewski Z., Kondratiuk M. (2009), Selection of Coil Parameters In Magnetic Launchers, *Solid State Phenomena*, Vols. 147-149, 438-443.
3. Hainsworth G., Rodger D. (1995), Design Optimisation of Coilguns, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 31, No. 1.
4. Lockner T. R., Kaye R. J., Turman B. N. (2004), *Coilgun Technology. Status, Applications, and Future Directions at Sandia National Laboratories*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA.
5. Razal M., Iqbal S. J., Hon K. W. (2007), Development of Magnetic Pulsed Launcher System using Capacitor Banks, *The 15th Student Conference on Research and Development – SCOREd 2007*, Malaysia.
6. International Rectifier (2008), IRFB411-5PbF Data Sheet.
7. International Rectifier (2008), IRFS4010-7PPbF Data Sheet.
8. Xilinx (2005), Spartan-3 FPGA Family: Complete Data Sheet.

CURRENT CONTROL IN THE ELECTRIC CIRCUIT OF THE COIL MAGNETIC LAUNCHER

Abstract: In this paper the conception of current control in the electric circuit of the coil magnetic launcher is presented. The implementation manner of the regulation system was proposed and electronic component of the electric circuit were modelled. The system of the object and the impulse regulator was simulated. When the coil was energised by discharging capacitor, the controller stabilised circuit current value. The appropriate frequency of the regulator work was obtained by the means of simulation. Research was conducted for different values of the coil inductance. Thus we checked control system correctness for the variable model parameters. The analysis of the simulation was conducted and its results were depicted. Described investigations state preliminary steps of designing and building of the coil magnetic launcher experimental model with stabilised armature acceleration.

Składamy serdeczne podziękowania Pani Aleksandrze Zareckiej za pomoc w przygotowaniu niniejszego artykułu.