

**Politechnika Opolska**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

Instytut Systemów Napędowych i Robotyki

**SPRAWOZDANIE PROJEKTOWE Z ELEKTRONIKI**

Studia pierwszego stopnia

Stacjonarne

Kierunek studiów

*Elektrotechnika*

**TEMAT PRACY**

Model prostownika sterowanego jednopółwkowego w programie  
LTspice

Promotor:

Garbiec Tomasz

Autor:

Hoffman Kacper

nr albumu: 95009

**Opole 2020**

## **Model prostownika sterowanego jednopółkowego w programie LTspice**

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono model cyfrowy prostownika sterowanego jednopółkowego wykonany za pomocą programu LTspice. Do realizacji projektu wykorzystano oprogramowanie LTspice oraz zdobyte ze stron producentów modele niektórych elementów układu. Zaproponowany układ prostownika umożliwia zrozumienie działania układu prostującego oraz sposobów wpływu na jego zachowanie. W oparciu o schemat ideowy zaprojektowano oraz wykonano niezbędny model komputerowy. W pracy zamieszczono szczegółowy opis układu prostowniczego, wpływu poszczególnych elementów na jego działanie oraz wyniki symulacji w oparciu na różne rodzaje obciążenia.

## **The model of a controlled half wave rectifier in LTspice**

### **Summary**

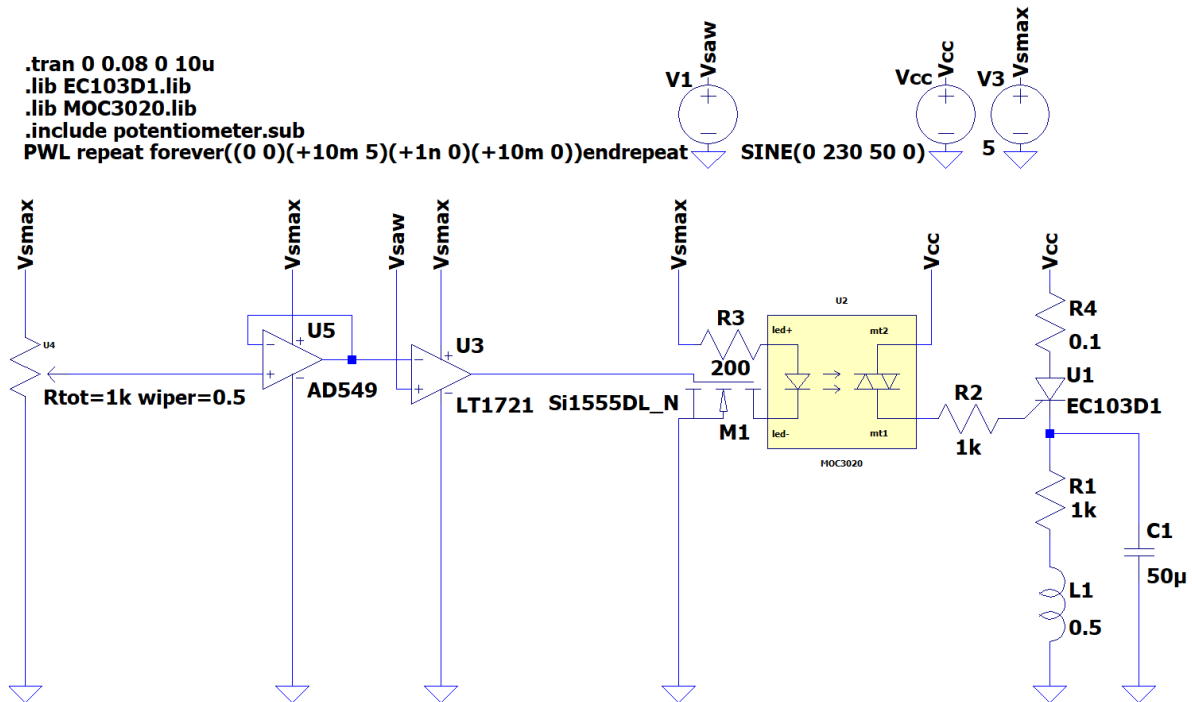
The work presents a digital model of a controlled half wave rectifier created using LTspice. The project uses the LTspice software and models of certain elements of the circuit gathered from the websites of their creators. The proposed circuit enables a better understanding of rectifying circuits and the ways of altering its behaviour. The required digital model was designed and created based on an appropriate thought model. The work contains a detailed description of the rectifying circuit, the effect of its various elements on its functioning and the results of simulations based on different loads .

## Zawartość

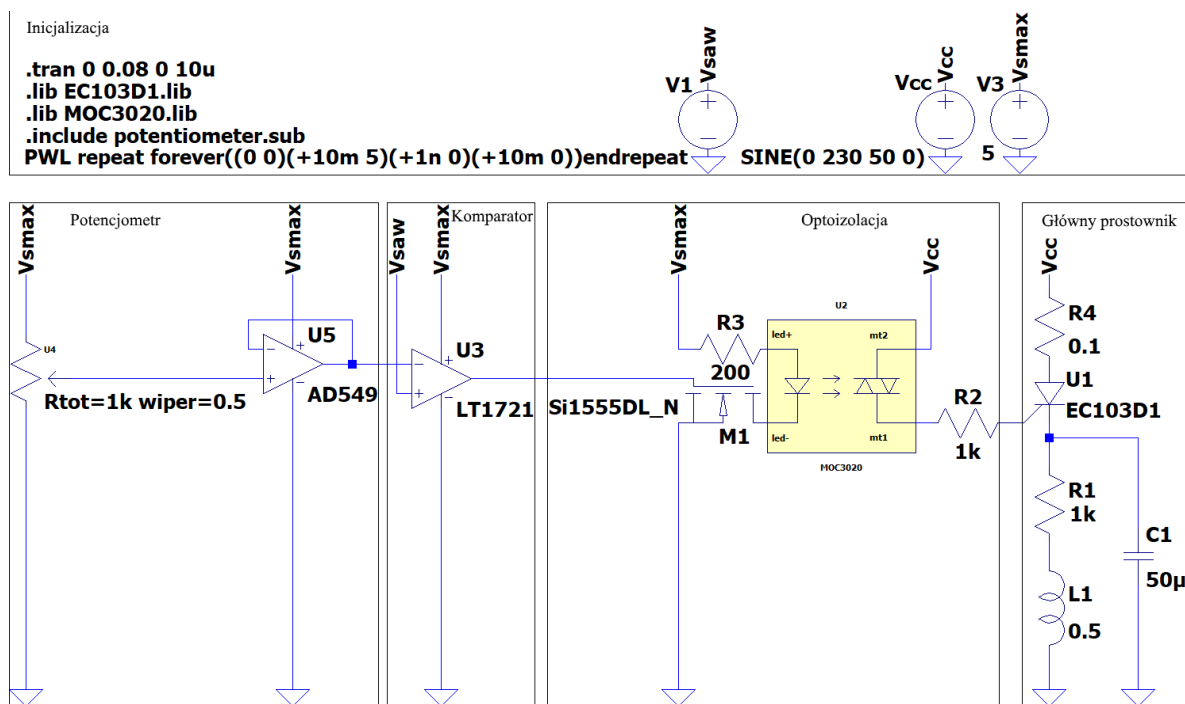
Zawartość.....	3
1 Opis modelu.....	4
2 Sposób działania.....	5
2.1 Potencjometr.....	5
2.2 Komparator.....	6
2.3 Optoizolacja.....	6
2.4 Główny Prostownik.....	6
3 Symulacja.....	7
3.1 Obciążenie rezystancyjne.....	8
3.2 Obciążenie rezystancyjno-indukcyjne.....	10
3.3 Obciążenie rezystancyjno-pojemnościowe.....	11
4 Wnioski.....	12
5 Literatura.....	13

# 1 Opis modelu

Stworzony model prostownika sterowanego jednopółwkowego składa się z czterech części: głównego prostownika, optoizolacji, komparatora i potencjometru. Dla prawidłowego funkcjonowania układu jest również potrzebna osobna część zawierająca komendy inicjujące i źródła napięcia. Pełen model został przedstawiony poniżej.



Rys. 1.1. Model prostownika sterowanego jednopółwkowego w programie LTSpice



Rys. 1.2. Powyższy model z zaznaczonymi częściami układu

W części inicjalizacyjnej przekazuje się komendy do programu, informując go, że zostały użyte elementy niewystępujące w domyślnym pakiecie (komendy *.lib* i *.include*) oraz informację o sposobie analizy układu (komenda *.tran*) [1]. Dodatkowo zostały tu zadeklarowane użyte źródła napięcia: idealne napięcie sieciowe  $V_{cc}$ , sygnał piłowy  $V_{saw}$  oraz napięcie zasilające układ  $V_{smax}$  (nazwa wynika z faktu, że jest to jednocześnie maksymalna wartość  $V_{saw}$ ). Część określoną jako główny prostownik tworzy tyrystor EC103D1 [2], rezystor ochronny R4 oraz ustawialne obciążenie R1, L1 i C1. Tyrystor EC103D1 [2] jest bezpośrednio podłączony do zasilania sieciowego, ponieważ ten model został zaprojektowany dla względnie wysokich napięć i jest w stanie funkcjonować nawet przy napięciu 600 V. Optoizolację, która służy do izolacji galwanicznej głównego prostownika od sygnału bramkowego tworzy rezystor bramkowy R2, optotriak MOC3020 [3] oraz klucz tranzystorowy oparty na tranzystorze MOSFET typu Si1555DL\_N [4] i odpowiednio dobranego rezystora R3. Kolejnym ważnym elementem układu jest komparator LT1721 [5]. Porównuje on sygnał piłowy  $V_{saw}$  z napięciem ustawionym na potencjometrze. Model potencjometru jest jedynym modelem trzeciopartyjnym w tym układzie i przez to nie posiada on swojego numeru. Ponieważ bezpośrednie połączenie potencjometru do komparatora nie było możliwe, został zastosowany wtórnik napięciowy oparty o wzmacniacz operatorowy AD549.

## 2 Sposób działania

Teoretyczne funkcjonowanie zaproponowanego modelu jest dosyć proste. Za pomocą potencjometru ustawia się napięcie z przedziału od 0 V do 5 V. To napięcie jest podawane na komparator. Porównuje on napięcie z potencjometru z sygnałem piłowym  $V_{saw}$ . Kiedy wartość sygnału piłowego  $V_{saw}$  jest wyższa od nastawionego, to na jego wyjściu pojawia się napięcie stałe 5 V, które jest przekazywane na bramkę tyrystora. Ze względu na swoją wewnętrzną budowę przepuszcza on tylko napięcie dodatnie przy odpowiednio wysokim prądzie bramki, prostując jedną połówkę napięcia sieciowego. Jednak w praktyce pojawiają się pewne szczegóły, które nie mają miejsca w idealnych warunkach. Przez to najlepiej jest przedstawić działanie tego modelu w większym detale.

### 2.1 Potencjometr

Użyty model potencjometru co prawda nie odpowiada rzeczywistemu elementowi, ale jego sposób działania jest identyczny. Posiada on pewną rezystancję całkowitą  $R_{tot}$  oraz aktualne ustawienie *wiper*. W tym przypadku rezystancja  $R_{tot}$  jest mało znacząca, ponieważ komparator porównuje tylko poziomy napięcia. Ustawienie *wiper* jest wartością z przedziału od 0 do 1, co odpowiada całkowitemu uziemieniu i przeniesieniu napięcia. Mimo poprawnego działania nie można jednak podłączyć sygnału z potencjometru bezpośrednio do komparatora ze względu na oddziaływanie reszty układu. Należało z tego powodu zastosować układ wtórnika napięciowego. Podłączenie wyjścia wzmacniacza operatorowego bezpośrednio do wejścia odwracającego powoduje, że powstaje układ o wzmocnieniu równym 1, czyli sygnał wejściowy jest przenoszony do wyjścia i może zostać podłączony do kolejnego elementu.

## 2.2 Komparator

W komparatorze następuje porównanie do siebie dwóch sygnałów - napięcia wychodzącego z potencjometru oraz sygnały piłokształtnego. Sygnał piłowy został wybrany ze względu na to, że pierwsza połowa jego okresu rośnie liniowo od 0 V do 5 V, a wynosi 0 V dla drugiej połowy. To oznacza, że znajdujący się dalej tyrystor będzie przewodził tylko dla dodatniej połowy napięcia wejściowego, oraz że przy tej dodatniej połowie łatwo jest wyznaczyć, od którego momentu należy zacząć prostowanie. Liniowe narastanie sprawia, że dla połowy okresu sygnału wejściowego sygnał piłowy wynosi 5 V, dla ćwierci 2.5 V a dla jednej ósmej 1.25 V. Stąd wynika naturalny wybór takiego kształtu przebiegu dla porównywania. Technicznie możliwe było wytworzenie tego sygnału z zasilania 5 V za pomocą odpowiedniego układu, na przykład układem czasowym 555, ale to rozwiązanie znajduje się poza zakresem zadania.

## 2.3 Optoizolacja

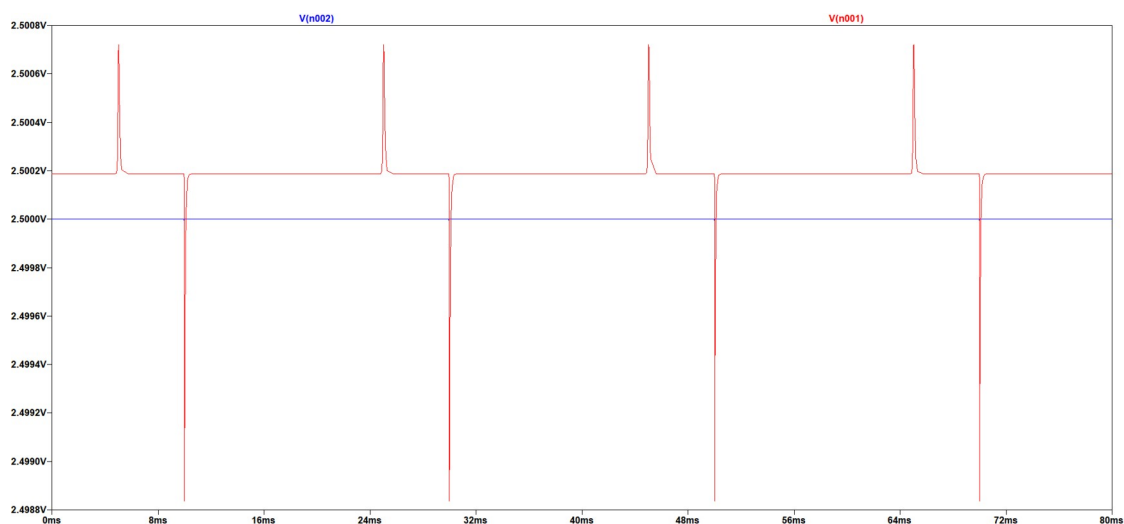
Aby zapewnić bezpieczeństwo funkcjonowania tyrystora należy go podłączyć do reszty układu poprzez izolację galwaniczną w postaci optoizolacji. Tutaj tą rolę spełnia układ izolacyjny MOC3020 [3]. Składa się on z diody LED na jednym końcu oraz optotriaka na drugim. W czasie przepływu prądu przez diodę zaczyna ona emitować światło, które pada na optotriak i pozwala na przejście przez niego napięcia zasilania 5 V. Co prawda dioda jest stale zasilana z napięcia zasilania, ale nie może ona ciągle świecić poprzez zastosowanie klucza tranzystorowego. Tranzystor Si1555DL\_N [4] nie pozwala na przejście prądu, dopóki na jego źródle nie pojawi się odpowiednio wysokie napięcie z komparatora. Ten układ nie tylko pozwala na proste sterowanie optoizolacją, ale również ma poboczną funkcję wtórnika (nie można bezpośrednio podłączyć sygnału komparatorowego do optoizolacji z tych samych powodów, co sygnału potencjometru do komparatora).

## 2.4 Główny Prostownik

Jako prostownik układu został użyty tyrystor typu EC103D1 [2]. Został on wybrany z tego powodu, że posiada on bardzo dużą wytrzymałość napięciową. Jest on w stanie prawidłowo funkcjonować przy napięciu dochodzącym nawet do 600 V, co oznacza, że można go bezpośrednio podłączyć do sieci 230 V bez obaw o uszkodzenie. Jako obciążenie tyrystora został użyty układ, w którym szeregowo został podłączony rezystor i cewka, a równolegle do nich kondensator. To pozwala w łatwy sposób regulować rodzaj obciążenia dla którego ma zostać zbadane działanie prostownika - w programie LTspice możliwe jest ustawienie cewki i kondensatora na 0, co oznacza, że cewka jest traktowana jako zwarcie, a kondensator staje się przerwą.

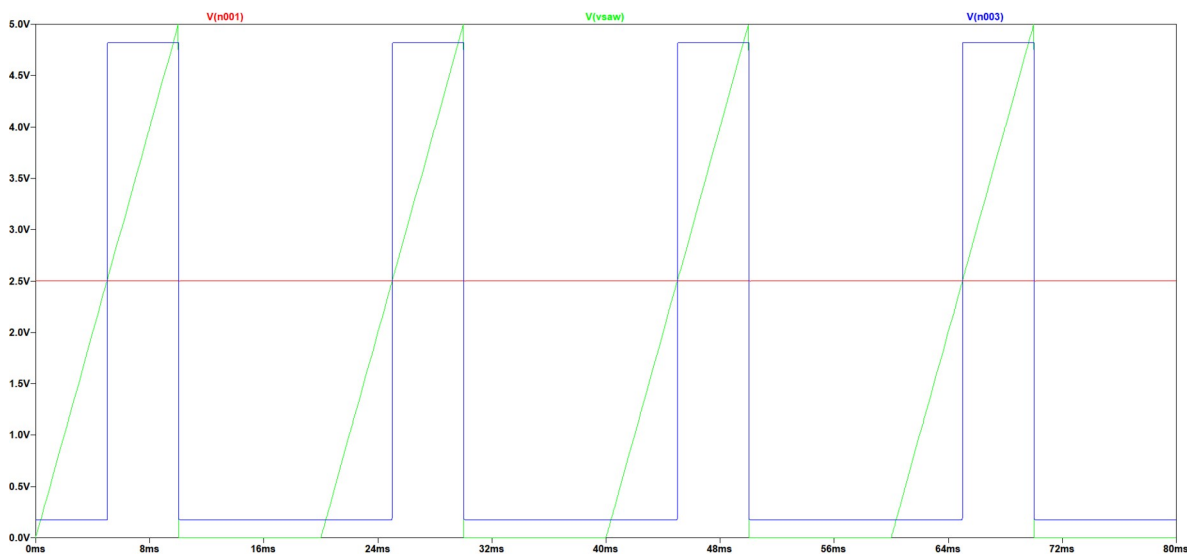
### 3 Symulacja

Układ prostowniczy został przygotowany do symulacji. Według informacji zawartych w inicjalizacji można zauważyć, że badana symulacja będzie przeprowadzona względem czasu (komenda *.tran* oznacza transient, czyli analizę czasową) [1]. Będzie ona trwała od 0 s do 0.08 s, pomiary będą wykonywane od samego początku symulacji a krok analizy wynosi 10 ns. Dla każdego rodzaju obciążenia niektóre przebiegi pozostają stałe. Wykonując pomiar napięcia przed i po wtórniku napięcia można zauważyć wpływ układu na działanie potencjometru. Jest on co prawda bardzo mały, ale jednak warto zaznaczyć jego obecność.



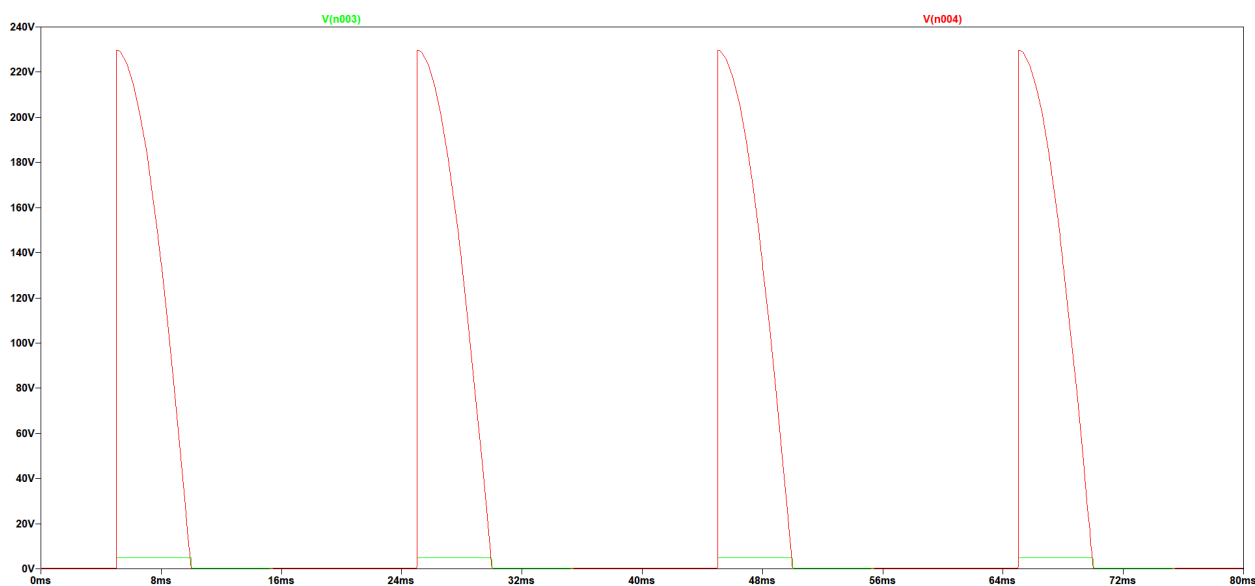
**Rys. 3.1** Przebieg napięcia potencjometru przed wtórnikiem napięcia (niebieski) i po wtórniku (czerwony)

Warto jest zauważyć, że samo włączenie potencjometru do reszty układu powoduje pewne zakłócenia dla momentów, w których komparator zmienia swój stan, a mimo że zakłócenia po wtórniku są większe, to dzięki wtórnikowi mają one jednak bardzo małą wartość i w ogóle nie wpływają na prawidłowe funkcjonowanie prostownika. O wiele ważniejsze są przebiegi na komparatorze. Przedstawienie na jednym wykresie przebiegu napięcia z wtórnika napięciowego, sygnału piłokształtnego i sygnału wyjściowego komparatora pozwoli lepiej zrozumieć jego rolę w układzie.



**Rys. 3.2** Przebiegi napięcia z wtórnika (czerwony), sygnału piłowego (zielony) i wyjścia komparatora (niebieski)

Kiedy napięcie na wejściu nieodwracającym, czyli tutaj sygnał piłowy, jest wyższy od sygnału na wejściu odwracającym, to na wyjściu komparatora pojawia się logiczna jedynka. Co prawda widać na przebiegu, że nie jest to idealne 5 V a stan zerowy to nie jest idealne 0 V, ale często przyjmuje się, że stan zerowy wynosi poniżej 0.8 V, a stan jeden jest powyżej 2 V, czyli komparator funkcjonuje prawidłowo. Sygnał wyjściowy komparatora jest przenoszony do optoizolacji. Latwo zobaczyć z jej przebiegów przed i po, że funkcjonuje prawidłowo.



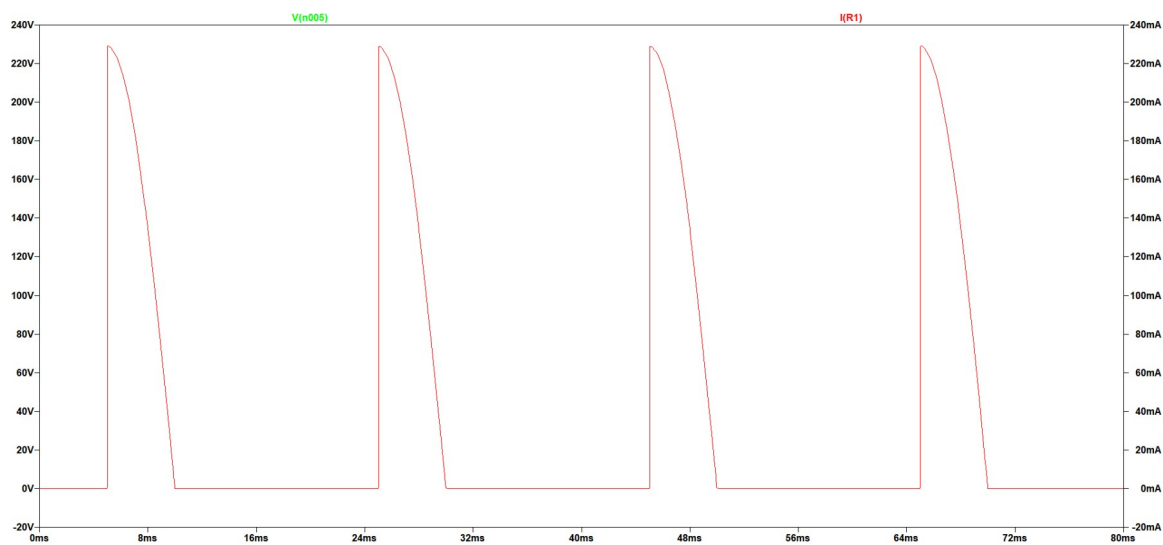
Rys. 3.3 Przebiegi napięcia przed optoizolacją (zielony) i po optoizolacji (czerwony)

Można zauważyć, że poniekąd sygnał po optoizolacji już jest wyprostowany z powodu optotriaka wewnątrz MOC3020 [3], ale jest to tylko efekt uboczny użytego sygnału porównywanego przez komparator. Możliwe było wybranie na przykład pełnego sygnału piłowego, a wtedy uzyskany z niego przebieg pomiędzy optoizolacją a tyrystorem nie byłby wyprostowany. Przebiegi na obciążeniu są zależne od rodzaju obciążenia i trzeba je analizować osobno.

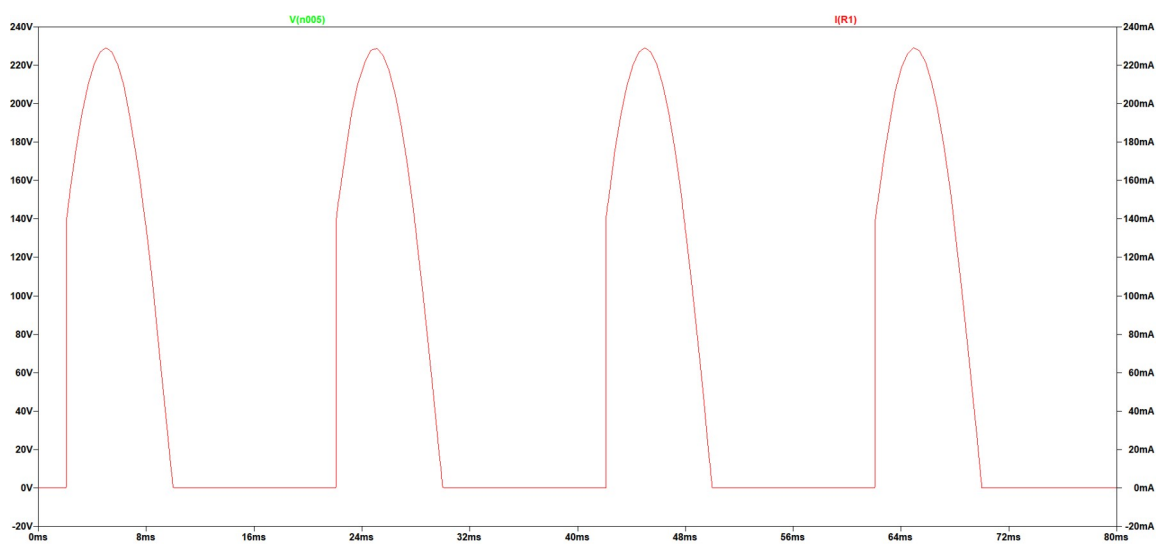
### 3.1 Obciążenie rezystancyjne

Dla obciążenia rezystancyjnego o wartości 1 k $\Omega$  należy się spodziewać, że mierzone napięcie zostanie wyprostowane przy odpowiednim przesunięciu fazowym. Ponieważ obciążenie jest czysto rezystancyjne to prąd powinien posiadać ten sam kształt co napięcie. Tak jak omówiono w rozdziale drugim dla uzystania obciążenia czysto rezystancyjnego ustawiono indukcyjność cewki na 0 H a pojemność kondensatora na 0 F. Działanie prostownika zostało sprawdzone dla ustawień potencjometru 0.5 (co powinno wyprostować połowę napięcia wejściowego), 0.2 i 0.8 (dla potwierdzenia funkcjonowania w innych ustawieniach).

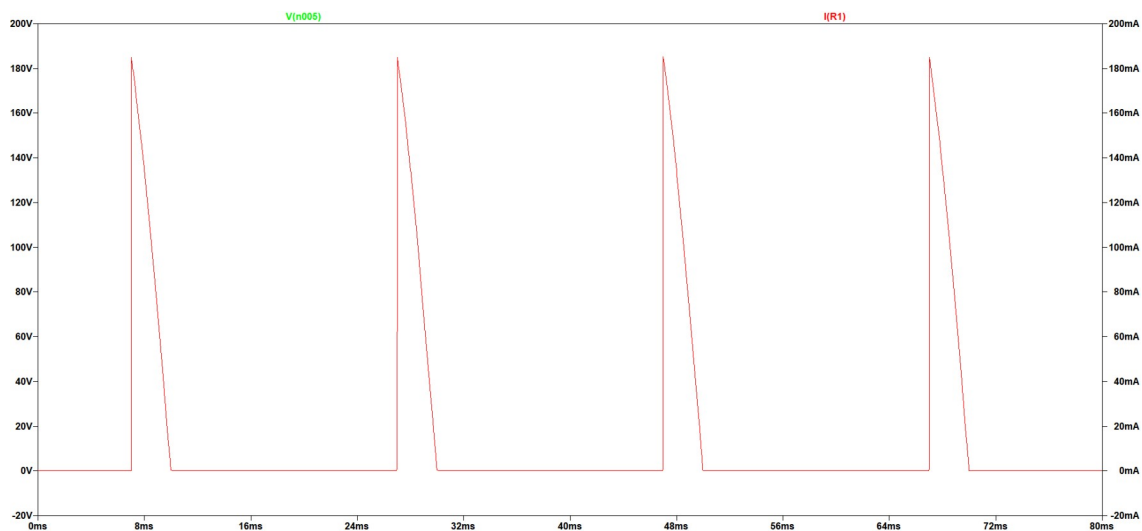




Rys. 3.4 Przebiegi napięcia (zielony) i prądu (czerwony) na obciążeniu czysto rezystancyjnym dla ustawienia 0.5



Rys. 3.5 Przebiegi napięcia (zielony) i prądu (czerwony) na obciążeniu czysto rezystancyjnym dla ustawienia 0.2

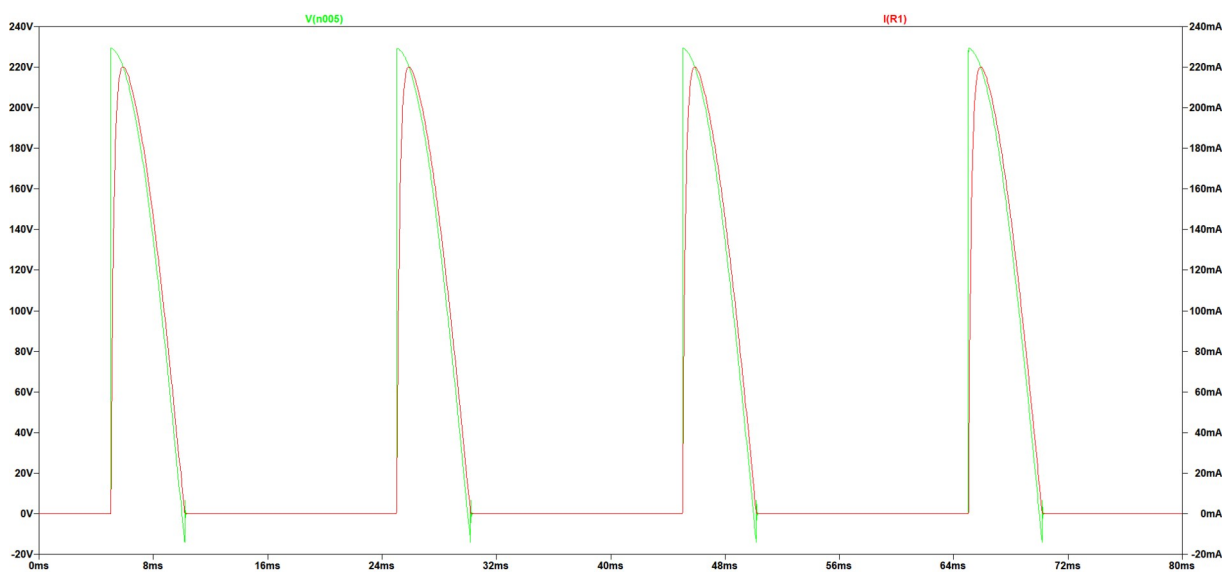


**Rys. 3.6** Przebiegi napięcia (zielony) i prądu (czerwony) na obciążeniu czysto rezystancyjnym dla ustawienia 0.8

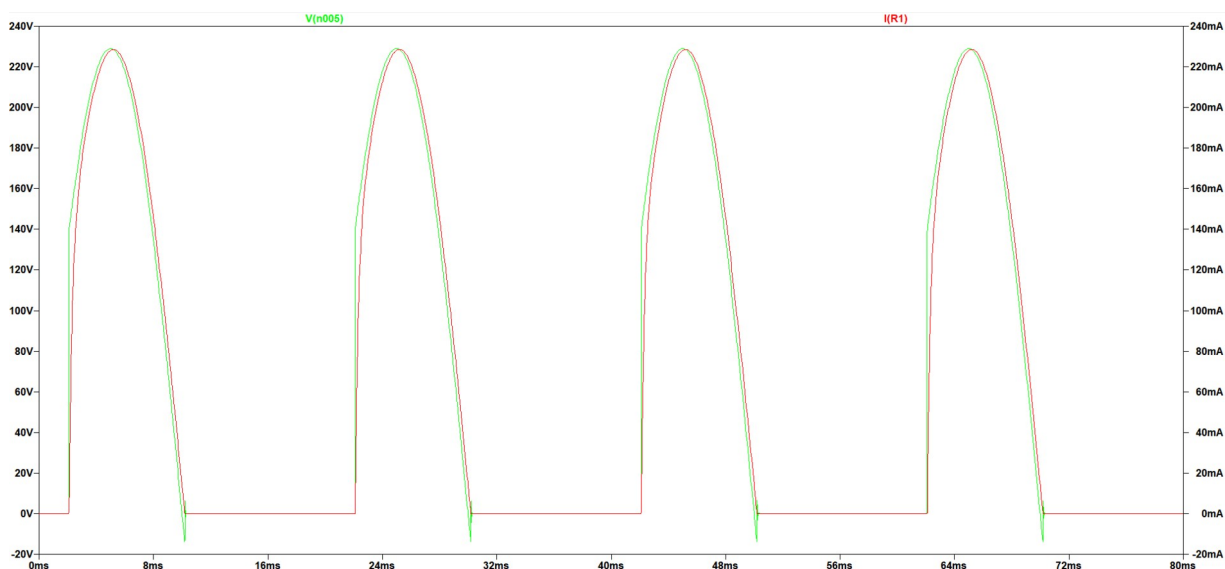
Przebiegi napięcia i rezystancji nakładają się tak dobrze, że są od siebie nieodróżnialne. Widoczne jest z uzyskanych przebiegów, że dla obciążenia rezystancyjnego układ działa prawidłowo.

### 3.2 Obciążenie rezystancyjno-indukcyjne

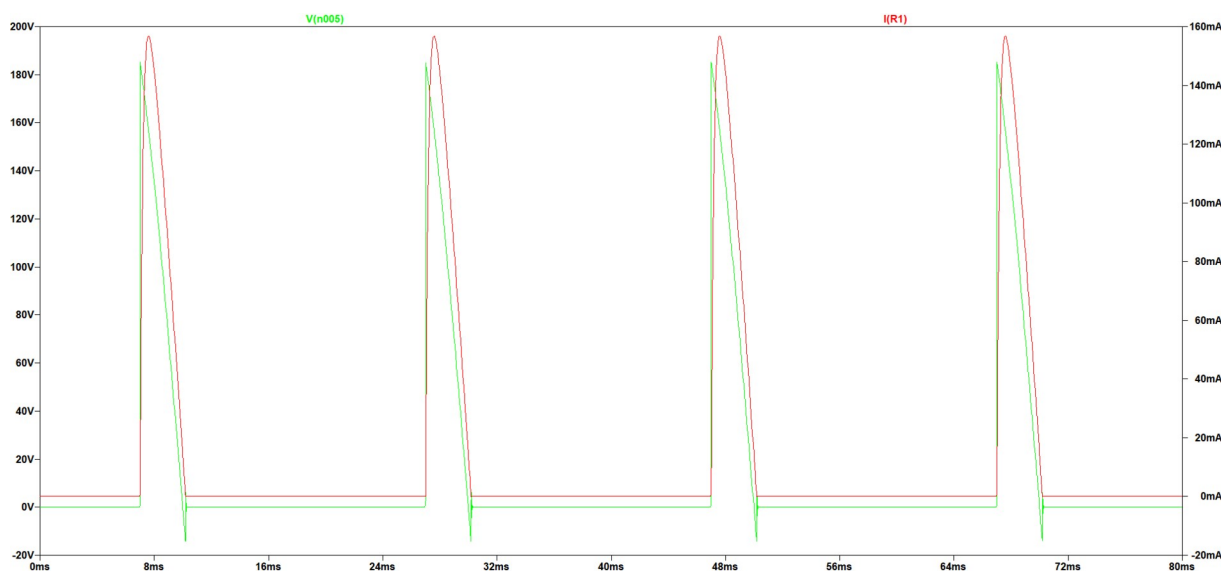
Dla obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego zastosowano rezystancję o wartości 1 k $\Omega$  oraz indukcyjność o wartości 0.2 H. Cewka powinna sprawić, że wyprostowany prąd wyjściowy będzie narastać wolniej. Wywoła to pewne przesunięcie pomiędzy sygnałem wyjściowym a wejściowym. To przesunięcie sprawi, że napięcie wyjściowe będzie zawierało fragment napięcia ujemnego z drugiej połowy zasilania.



**Rys. 3.7** Przebiegi napięcia (zielony) i prądu (czerwony) na obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym dla ustawienia 0.5



Rys. 3.8 Przebiegi napięcia (zielony) i prądu (czerwony) na obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym dla ustawienia 0.2

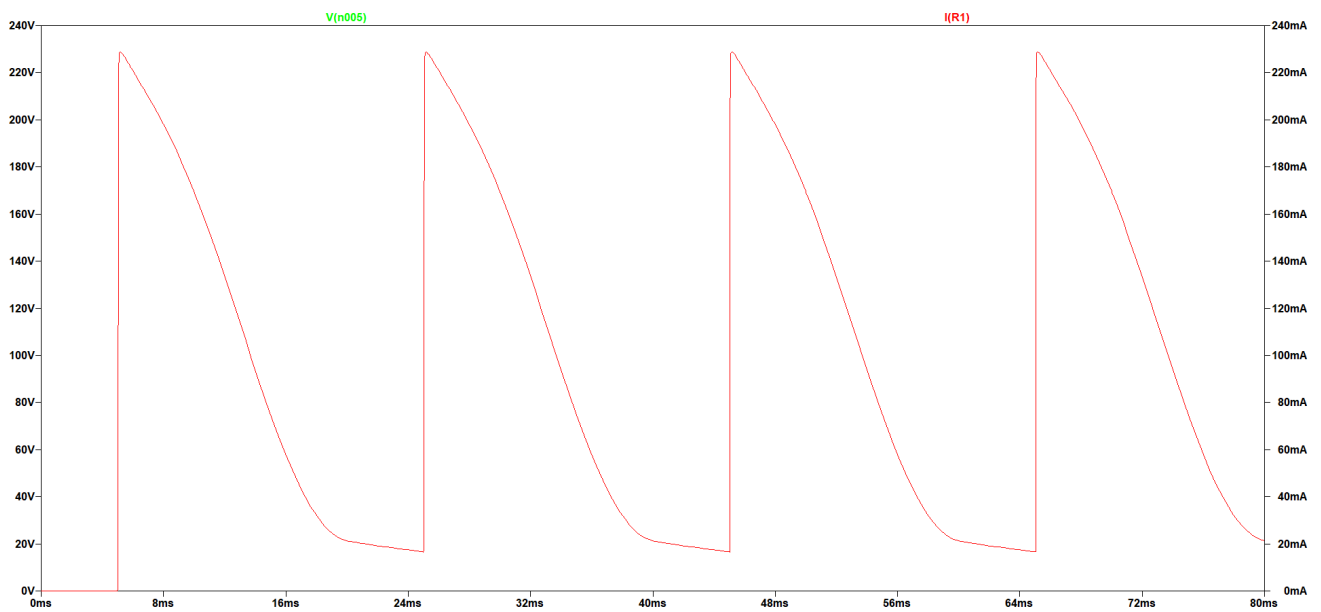


Rys. 3.9 Przebiegi napięcia (zielony) i prądu (czerwony) na obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym dla ustawienia 0.8

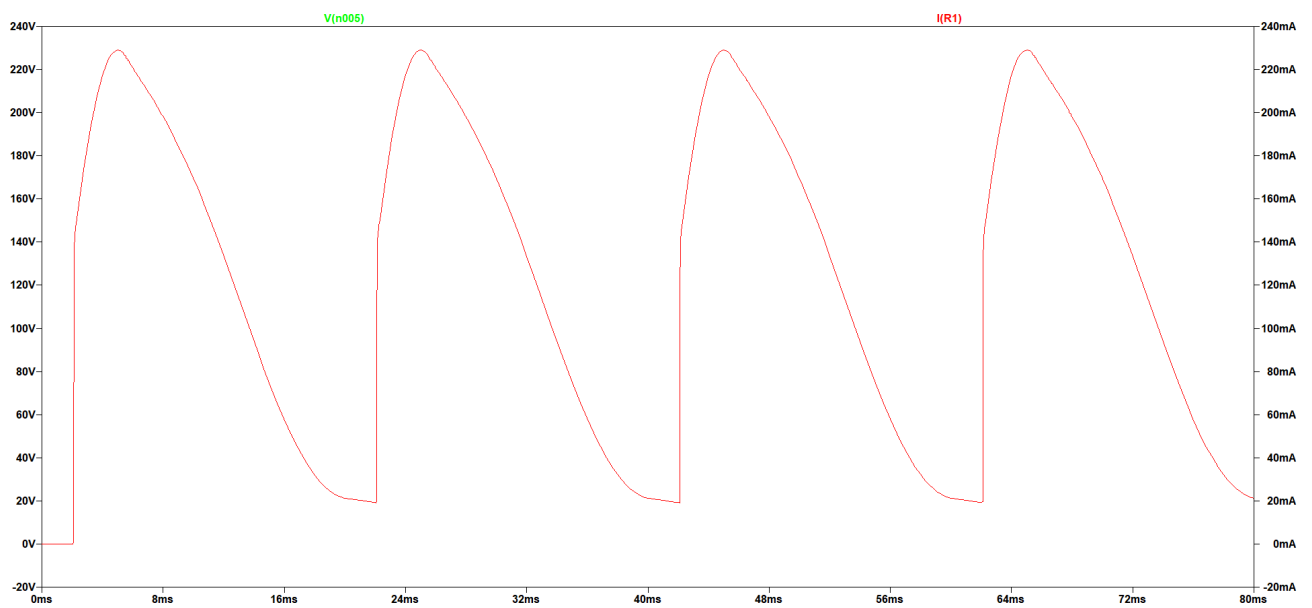
Zgodnie z przewidywaniami prąd narasta wolniej niż poprzednio, a napięcie podąża za nim zgodnie z pewnym przesunięciem.

### 3.3 Obciążenie rezystancyjno-pojemnościowe

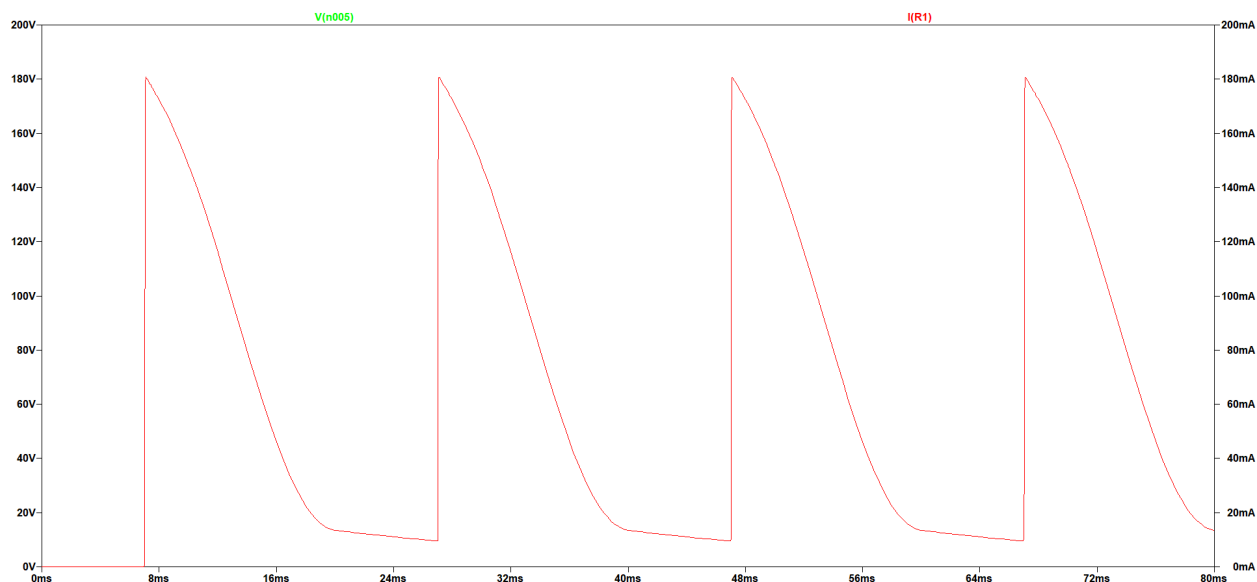
Dla tego obciążenia zastosowano rezystancję o wartości 1 k $\Omega$  oraz kondensator o pojemności 20  $\mu$ F. Obecność kondensatora sprawia, że tuż po rozpoczęciu prostowania zacznie się on ładować. Z tego powodu nawet przy ujemnym napięciu wejściowym na sygnale wyjściowym będzie widoczne napięcie rozładowującego się kondensatora.



**Rys. 3.10** Przebiegi napięcia (zielony) i prądu (czerwony) na obciążeniu rezystancyjno-pojemnościowym dla ustawienia 0.5



**Rys. 3.11** Przebiegi napięcia (zielony) i prądu (czerwony) na obciążeniu rezystancyjno-pojemnościowym dla ustawienia 0.2



Rys. 3.12 Przebiegi napięcia (zielony) i prądu (czerwony) na obciążeniu rezystancyjno-pojemnościowym dla ustawienia 0.8

Łatwo stwierdzić, że układ odpowiedział prawidłowo na to obciążenie.

## 4 Wnioski

Wynikiem końcowym projektu jest cyfrowy model prostownika sterowanego jednopółkowego, który w prawidłowy sposób zachowuje się przy różnych rodzajach obciążenia. Projekt pozwolił na lepsze zrozumienie działania układów prostowniczych oraz problemów związanych z ich projektowaniem. Dodatkowym pozytywnym efektem jest zapoznanie się z układami wtórnikowymi, pozwalającymi na łączenie poszczególnych elementów ze sobą tak, aby całość tworzyła prawidłowo funkcjonujący prostownik.

## 5 Literatura

- [1] SPICE-Simulation using LTspice IV Version 1.3 [online]. Gunthard Kraus, Elektronikschule Tettnang, Niemcy [dostęp 15 grudnia 2010]. Dostępny w Internecie: <[http://www.ieca-inc.com/images/Spice-Simulation\\_Using\\_LTspice\\_Part\\_1.pdf](http://www.ieca-inc.com/images/Spice-Simulation_Using_LTspice_Part_1.pdf)>
- [2] Discrete Thyristors EC103xx/SxSx Series Datasheet [online]. Littelfuse Inc. [dostęp 16 stycznia 2018]. Dostępny w Internecie: <[https://www.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/switching\\_thyristors/littelfuse\\_thyristor\\_ec103xx\\_sxsx\\_datasheet.pdf](https://www.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/switching_thyristors/littelfuse_thyristor_ec103xx_sxsx_datasheet.pdf)>
- [3] MOC3020 Triac Driver Output Optocoupler Datasheet [online]. Fairchild Semiconductor International Inc. [dostęp 1 lipca 2015]. Dostępny w Internecie: <<https://www.mouser.com/datasheet/2/149/MOC3020M-195880.pdf>>
- [4] Complementary Low-Threshold MOSFET Pair Datasheet [online]. Vishay Siliconics Inc. [dostęp 25 maja 2013]. Dostępny w Internecie: <<https://www.vishay.com/docs/71079/71079.pdf>>