

# **Symulacja układów elektronicznych w KiCad**

## **Moduł NG Spice**

Mariusz Pauluk

Materiały opracowane na potrzeby prowadzenia zajęć online z przedmiotu  
Elektronika Analogowa w AGH Katedra Automatyki i Robotyki  
Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki

© AGH, Kraków 2020, Marzec  
wersja robocza nr 6 data 23 III 2020 godz. 14:36:35

# Wstęp

Zakłada się, że czytelnicy niniejszego dokumentu posiadają podstawową wiedzę w posługiwaniu się edytorem schematów układów elektronicznych, modułem ESchema oprogramowania KiCad wspomagającego projektowanie elektronicznych urządzeń.

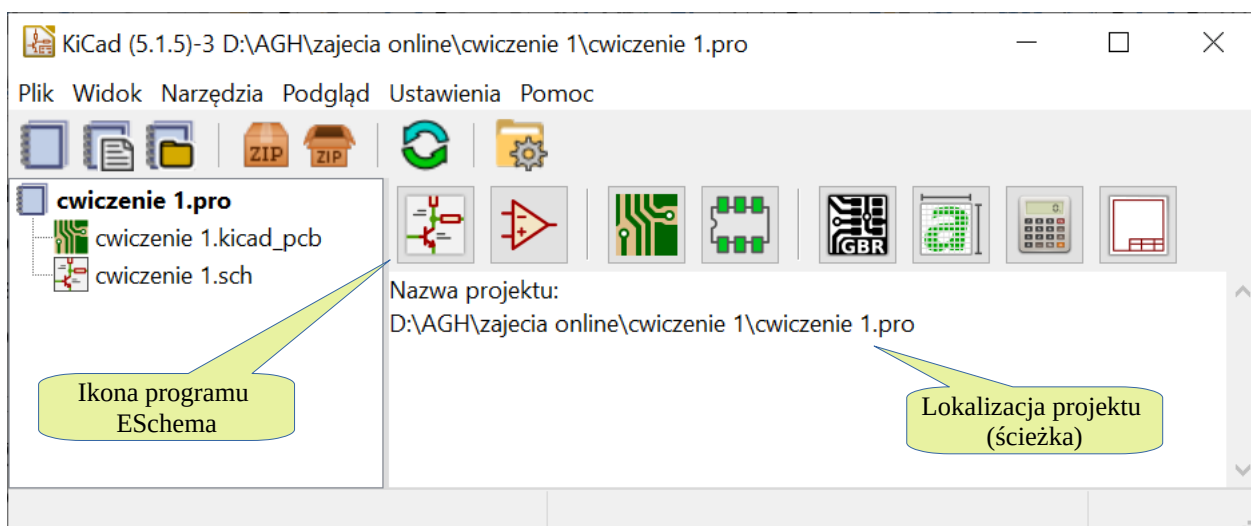
Celem tego opracowania jest dostarczenie podstawowych informacji, z zakresu prowadzenia analiz (symulacji) funkcjonowania zaprojektowanych układów elektronicznych.

W okresie przygotowywania tego dokumentu, dostępna jest wersja 5-1-5 programu KiCad. Oficjalna strona producenta: <https://www.kicad-pcb.org/>. Twórcy środowiska KiCad zalecają stosowanie wersji 64 bitowej. W ostatnim roku poszerzono funkcjonalność programu (od wersji 5) o możliwość symulowania zachowania układów elektronicznych. Symulacje można prowadzić w zintegrowanej z Kicade'm odmianą programu spice – NG Spice. Pakiet instalacyjny zawiera już to oprogramowanie. Informacje o współpracy obu środowisk można znaleźć m.in. na stronie: <http://ngspice.sourceforge.net/ngspice-eeschema.html>

Próba „przeniesienia” zajęć laboratoryjnych do wersji wirtualnej bazuje właśnie na możliwościach symulacyjnych tego środowiska, stwarzających możliwość: przeprowadzenia wirtualnych pomiarów oraz potraktowania skonstruowanych schematów w module ESchema jako zmontowanych układów elektronicznych.

## Rozpoczęcie pracy z programem

Po uruchomieniu programu KiCad pracę należy rozpocząć od założenia projektu, np. *ćwiczenie1*. W trakcie tworzenia projektu można również zdefiniować lokalizację poprzez określenie katalogu, w którym ma być on umiejscowiony. Przykładowo zdefiniowany projekt przedstawia rys. 1.

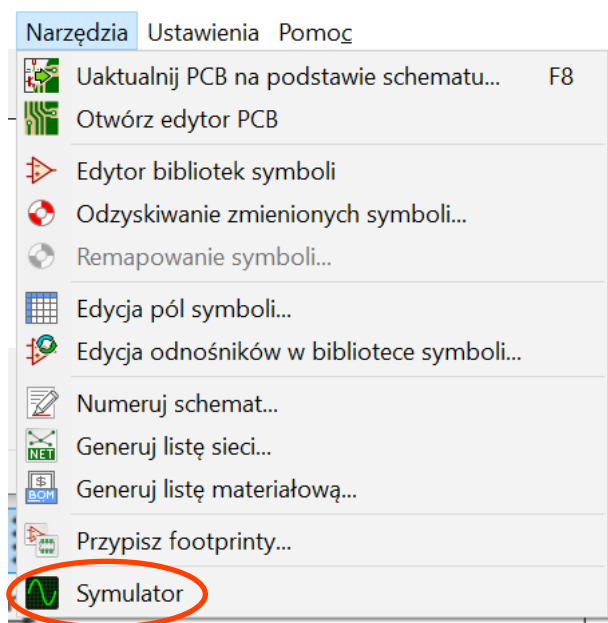


Rys. 1: Przykładowo utworzony projekt "ćwiczenie 1"

W ramach utworzonego projektu, zostają wygenerowane dwa pliki: *project\_name.sch* oraz *project\_name.kicad\_pcb* przeznaczone kolejno do: przechowywania projektu schematu ideowego oraz projektu płytki pcb. Podczas zajęć, nie będzie konieczności projektowania płytki. Przydatny będzie program ESchema.

## Weryfikacja instalacji programu NG Spice

Jeżeli instalacja obu programów przebiegła pomyślnie, po uruchomieniu edytora schematów w zakładce narzędzia, ostatnią pozycją na rozwiniętej liście zakładki jest *Symulator* (rys. 2).

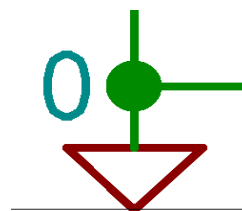
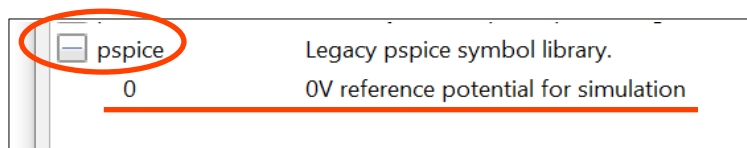


Rys. 2: Weryfikacja instalacji NG Spice

## Uwagi wstępne

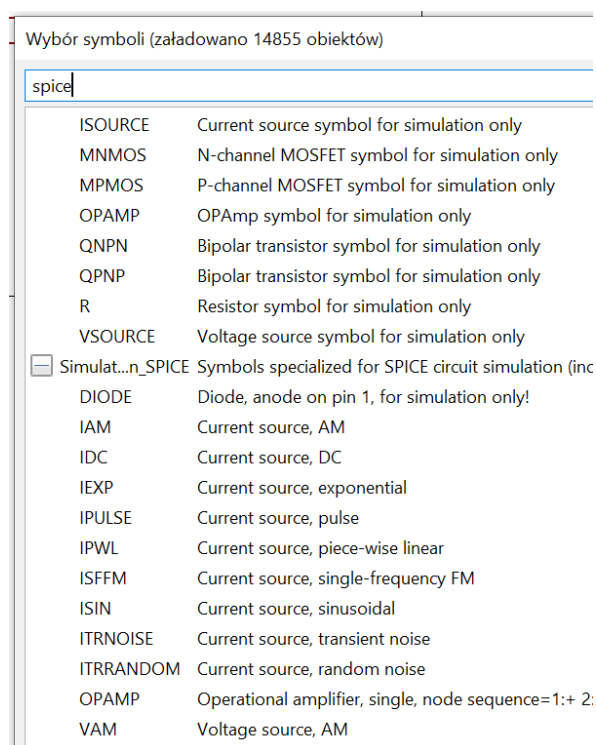
### Ważne !

Jedną z podstawowych reguł prawidłowego konstruowania schematów symulacyjnych w Spice jest wymóg specjalnego oznaczenia węzła o napięciu referencyjnym 0V. Warunek ten spełnia się w edytorze schematów za pomocą symbolu 0V (rys. 3). Symulacja bez tego symbolu nie uruchomi się.



Rys. 3: Symbol wymaganego przez Spice oznaczenia węzła referencyjnego, znajduje się w bibliotece pspice

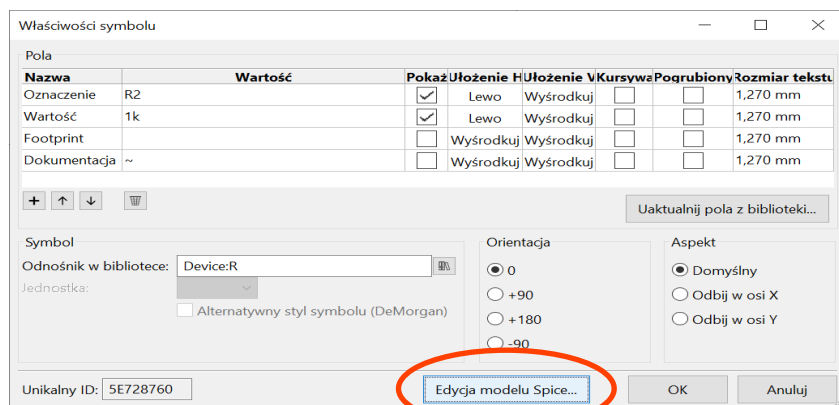
W wyniku integracji edytora schematów z NG Spice, do biblioteki elementów dostarczanych wraz z edytorem, został dodany zbiór symboli charakterystycznych dla Spice. Łatwo się z nimi zapoznać. Podczas dodawania nowego elementu do schematu, należy w polu filtr wpisać słowo spice. Zostaną wówczas wyświetlone nowe elementy (rys. 4).



Rys. 4 Wybrane elementy z biblioteki Spice w edytorze schematów

W praktyce, nie jest konieczne stosowanie symboli elementów dyskretnych z tej grupy, takich jak: diody, kondensatory, rezystory, czy tranzystory. Każdy symbol z ogromnej liczby pozostałych elementów, posiada w swoim oknie właściwości zakładkę, odpowiadającą za konfigurację na potrzeby symulacji (rys. 5).

Pozostałe jednak elementy z nowych bibliotek bibliotek, takie jak wszelkiego rodzaju źródła napięciowe prądowe, ułatwiają określenie różnego rodzajów parametrów symulacji i z tego powodu zalecane jest posługiwanie się nimi w pierwszej kolejności.



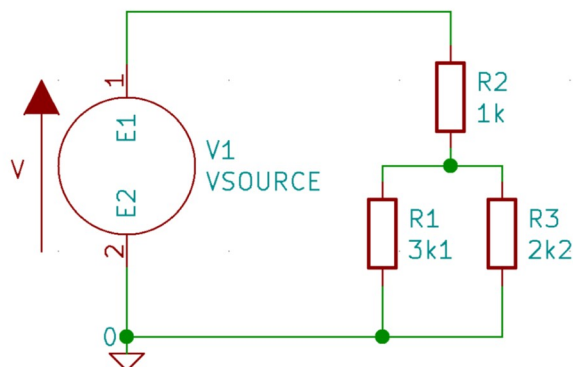
Rys. 5 Każdy symbol posiada przycisk "Edycja modelu Spice", również te ze standardowej biblioteki edytora schematów KiCad – powyższe okno to właściwości symbolu R z tradycyjnej biblioteki ESchema

# Analiza czasowa

Analiza ta umożliwia badanie stanów przejściowych, dynamicznych a także ustalonych w układach elektronicznych. Wartości napięcia w wybranych węzłach lub wartości prądów w wybranych gałęziach można oglądać graficznie, jako przebiegi w funkcji czasu.

## Przykład 1

Pierwszy przykład, to układ rezystorów połączonych szeregowo-równoległe i zasilanych stałym źródłem napięcia. Wybrano element VSOURCE z biblioteki spice (rys. 6.)



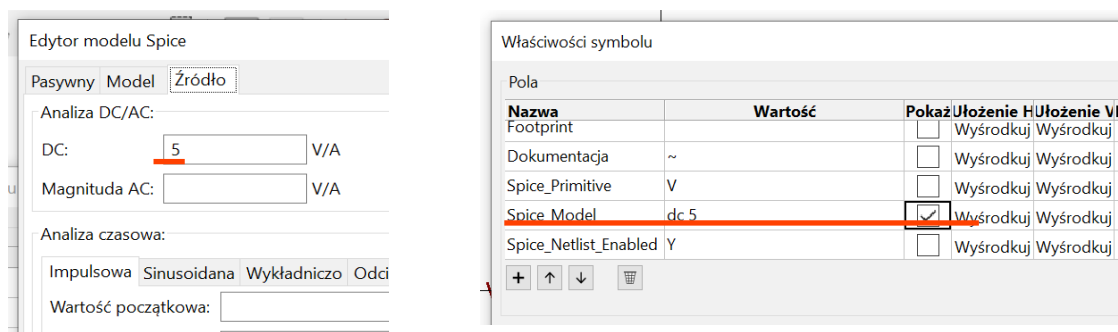
Rys. 6 Schemat elektryczny przykładowego obwodu

Po otwarciu okna właściwości dla elementu VSOURCE (klawisz E przy kursorze znajdującym się na symbolu), należy kliknąć: *Edycja modelu Spice*, (rys. 7.) i w zakładce *Źródło* tego okna ustawić wartość 5V. Wypełnienie pola DC, powoduje między innymi to, że wartość tego pola będzie brana pod uwagę przy obliczaniu punktu pracy, a także źródło to może być wykorzystane do analizy stałoprądowej.

### Ważne !

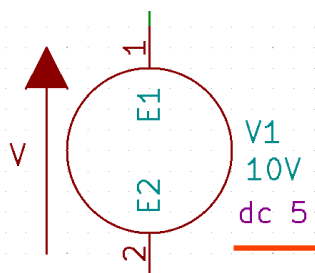
Pole VSOURCE normalnie było tylko etykietą (tekstem) do celów informacyjnych. Po zintegrowaniu ze sobą obu środowisk: NG Spice i KiCad, wartość tego pola przekazywana jest do symulatora po jego uruchomieniu i może pełnić funkcję np. wprowadzania komend dotyczących tego źródła, zgodnie ze standardem środowiska Spice.

Wprowadzona w ten sposób wartość 5V może być również zweryfikowana we wcześniejszym oknie *Właściwości*, w którym istnieje także możliwość zaznaczenia pola typu check-box - *POKAŻ dla tego parametru* na schemacie (rys. 7).



Rys. 7 Pole do ustawiania wartości napięcia na potrzeby symulacji

Efekt po zaznaczeniu check-box'a przedstawiono na rys. 8.



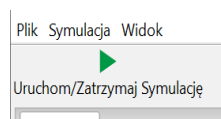
Rys. 8 Ustawienie wartości napięcia do analizy statycznej widoczne przy symbolu elementu po zaznaczeniu check-box'a POKAŻ

Dla tak przygotowanego schematu można przeprowadzić pierwszą analizę. W tym celu należy wybrać wspomnianą wcześniej opcję *Symulator* w zakładce *Narzędzia*. Otworzy się okno tego narzędzia.

Następnie w *Ustawieniach* należy wybrać zakładkę *Analiza czasowa* i ustawić dowolne „rozsądne” parametry dla tej analizy, kolejno w polach, np.:

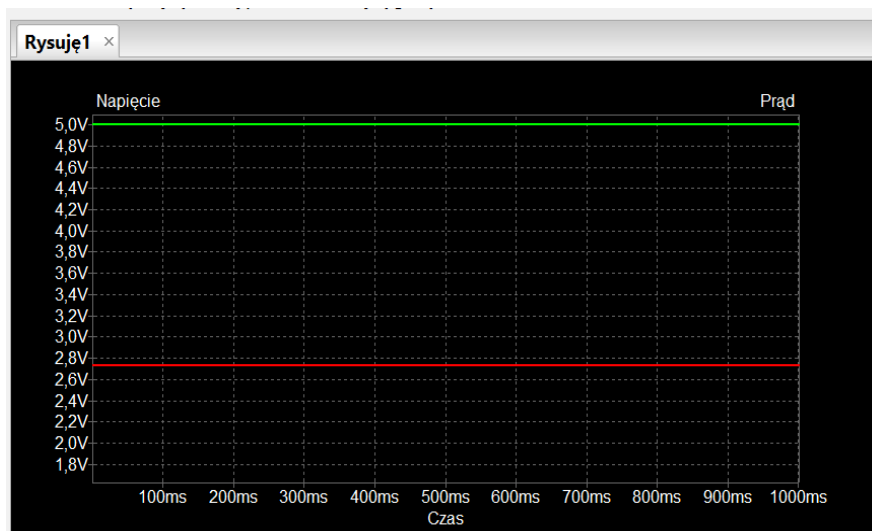
- *Krok czasu* = 10m,
- *Czas końcowy* = 1,
- *Czas początkowy* = 0.

Po zamknięciu okna z ustawieniami analizy czasowej, można uruchomić obliczenia symulacyjne klikając w narzędzie *Uruchom/Zatrzymaj Symulację* (rys. 9). W wyniku tego zostaną przeprowadzone obliczenia analizy czasowej oraz w oknie konsoli pojawią się wartości napięć w węzłach układu.



Rys. 9 Przycisk uruchomienia/zatrzymania symulacji

Dla podanego przykładu napięcia na górnej końcówce rezystora *net-r2-pad1* = 7,5V, napięcie pomiędzy rezystorem *R<sub>2</sub>* i równolegle połączonymi *R<sub>1</sub>* i *R<sub>3</sub>*, *net-r1-pad1* = 4,09091V. Powyższe napięcia można przedstawić graficznie. Służy do tego narzędzie: *Dodaj sygnały* i wybrać oba sygnały. Efekt działania tego narzędzia przedstawiono poniżej na rys. 10.



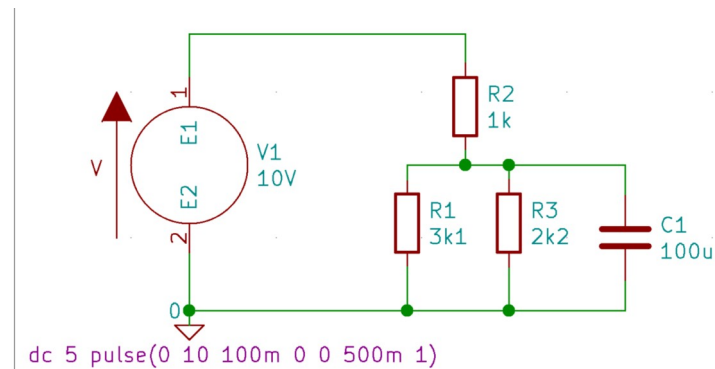
Rys. 10 Graficzne przedstawienie wartości napięć w obwodzie.

Podobnie można obejrzeć wartości prądów płynących w gałęziach obwodu.

Otrzymane w trakcie symulacji wyniki można zachować w pliku typu \*.csv do dalszej analizy lub wykonania sprawozdania z pomocą np. programów *Excel* lub *Matlab*. W tym celu należy w zakładce *Plik* wybrać opcję Zachowaj jako plik csv.

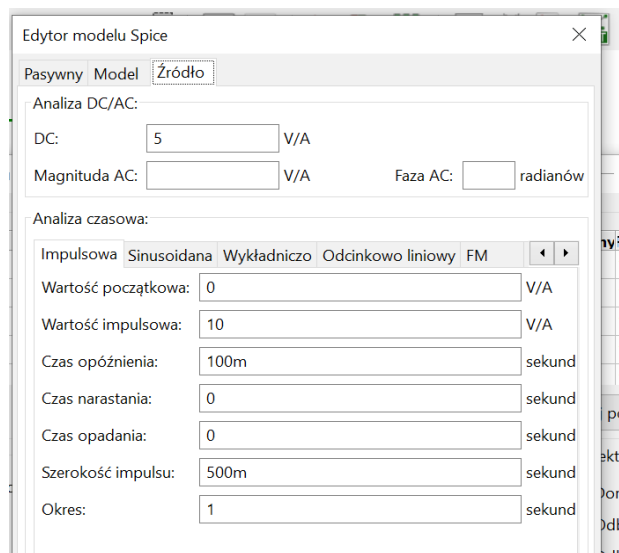
## Przykład 2

W kolejnym przykładzie przedstawiona jest analiza czasowa układu zawierającego element wprowadzający dynamikę. Do rezystorów  $R_1$  i  $R_3$  dołączono równolegle kondensator  $C_1=100\mu\text{F}$  (rys. 11).



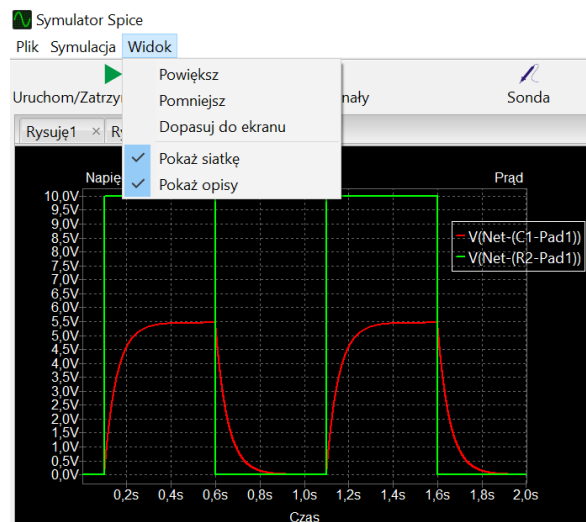
Rys. 11 Układ z dołączonym równolegle kondensatorem

Przeprowadzono symulację przebiegów napięć i prądów oraz zamieszczono na wykresie zmiany w czasie prądu zasilania i napięcia na kondensatorze. Dla odmiany zadano, aby źródło  $V_1$  symulowało ciąg impulsów o wartości amplitudzie 10V, trwających 500ms i aby okres ciągu impulsów wynosił 1s. Ustawienia te zadano w edytorze schematów, we własnościach modelu Spice, w zakładce analiza czasowa (rys. 12). W wyniku tego na schemacie pojawi się również składnia tego wymuszenia w notacji programu spice (rys. 11)



Rys. 12 Ustawienie źródła V1, jako elementu generującego ciąg impulsów.

Należy zwrócić uwagę, że tak ustawione parametry do analizy czasowej, nadpisały wartość napięcia źródła dla analizy DC, wynoszącej 5V. Poniżej na rys. 13 zamieszczono wyniki symulacji.



Rys. 13 Wyniki symulacji

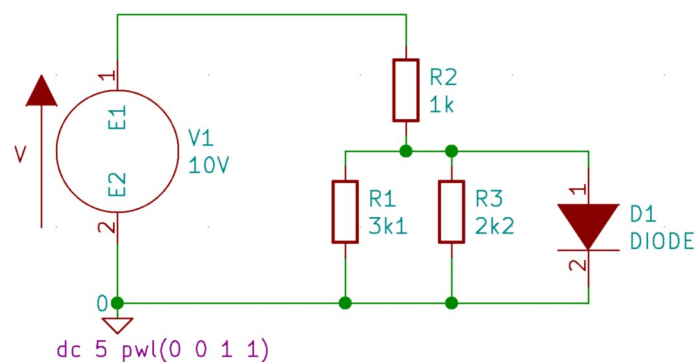
W symulatorze dostępna jest w zakładce *Widok*, opcja *Pokaż opisy*. Zaznaczenie tej opcji powoduje pojawienie się na wykresie legendy prezentowanych sygnałów. Na przedstawionym rysunku, sygnał zielony to napięcie zasilające układ, a czerwony to wykres napięcia na kondensatorze. Przebiegi przedstawiono w funkcji czasu w przedziale dwóch sekund. Zakładka źródło w edytorze modelu spice (rys. 12) umożliwia zadania standardowych wymuszeń jak: sinusoidalne, wykładnicze, odcinkowo-liniowe, zaszumione, itd.

## Przykład 3

Przedstawione w niniejszym podrozdziale analizę czasową można wykorzystać także do badania charakterystyk.

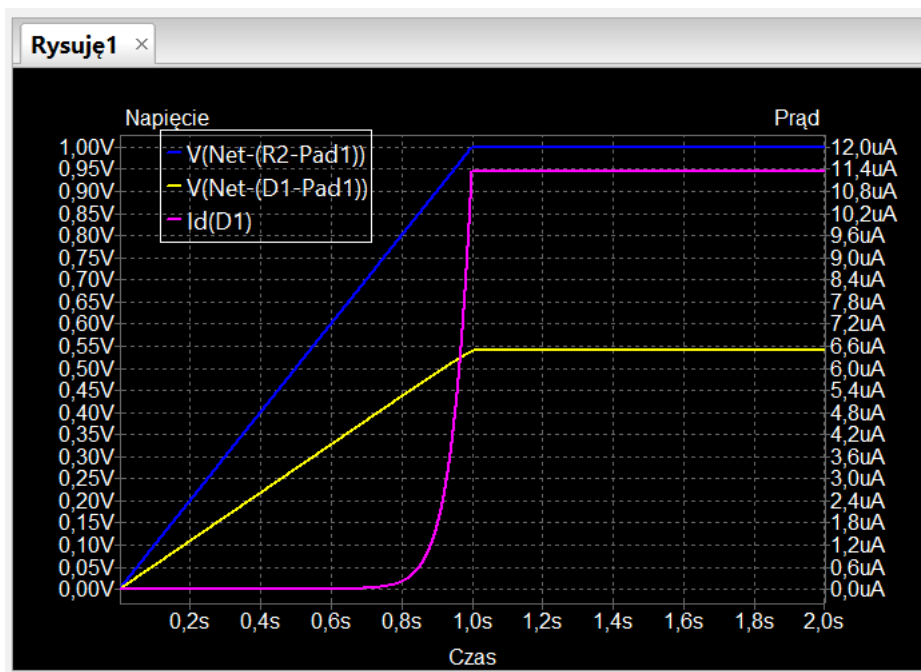
W miejsce kondensatora z poprzedniego przykładu, wstawiono diodę z biblioteki spice (rys. 14 ).





Rys. 14 Schemat układu z diodą

Źródło  $V_1$  ustawiono jako sygnał liniowo narastającego napięcia w czasie 1s, w zakresie od 0 do 10V. Przeprowadzono symulację czasową i na wykresie (rys. 15) zamieszczono: napięcie  $V_1$ , napięcie na diodzie oraz prąd przepływający przez diodę. Wartości prądu zamieszczono z prawej strony.



Rys. 15 Wykres napięcia i prądu na diodzie w odpowiedzi na wymuszenie narastające napięcia

Łatwo zaobserwować charakterystyczną dla złącza półprzewodnikowego eksponencjalną krzywą narastania prądu w funkcji napięcia.

Bardziej uniwersalnym sposobem analizy charakterystyki tego elementu jest nagranie otrzymanych wyników do pliku \*.csv, a następnie korzystając z oprogramowania typu *Excel* lub *Matlab* można prowadzić dalszą bardziej zaawansowaną analizę.

### Ważne !

Wprowadzone ustawienia z pomocą okien właściwości: `dc 5 pwl(0 0 1 1)` - widoczne poniżej źródła napięcia na rys. 14, można wprowadzić prościej, właśnie w takiej postaci jak powyżej w polu VSOURCE. Wówczas nie ma potrzeby edytowania ustawień klikając myszą. Dla osób nabierających z czasem biegłości w komendach Spice, jest to dużo bardziej efektywny sposób ustawiania parametrów symulacji.

## Przykład 4

### Wprowadzenie własnego modelu diody.

#### Dla dociekliwych !

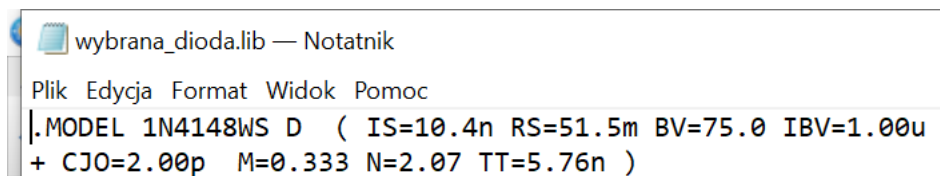
Przykładowa strona www, w której w przejrzysty sposób przedstawiono (przyjęty w programie spice) sposób modelowania diod półprzewodnikowych:

<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-3/spice-models/>

Założmy, że dany jest model diody przełączającej - np. podany przez producenta jak poniżej:

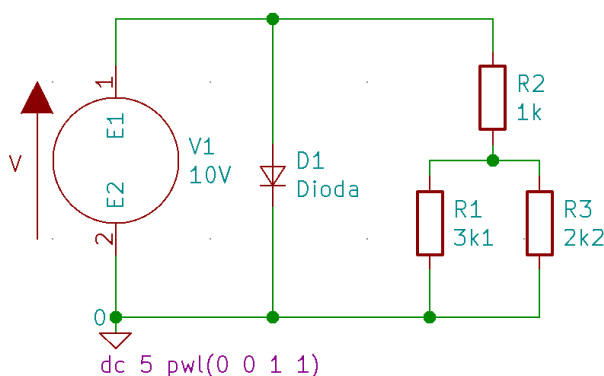
```
.MODEL 1N4148WS D ( IS=10.4n RS=51.5m BV=75.0 IBV=1.00u  
+ CJO=2.00p M=0.333 N=2.07 TT=5.76n )
```

Utworzono w kartotece projektu plik tekstowy: *wybrana\_dioda.lib*. Rozszerzenie *lib* nie jest koniecznym wymogiem, a raczej porządkowym. Inaczej pisząc, „zadziała” z plikiem tekstowym o dowolnym rozszerzeniu (rys. 16).



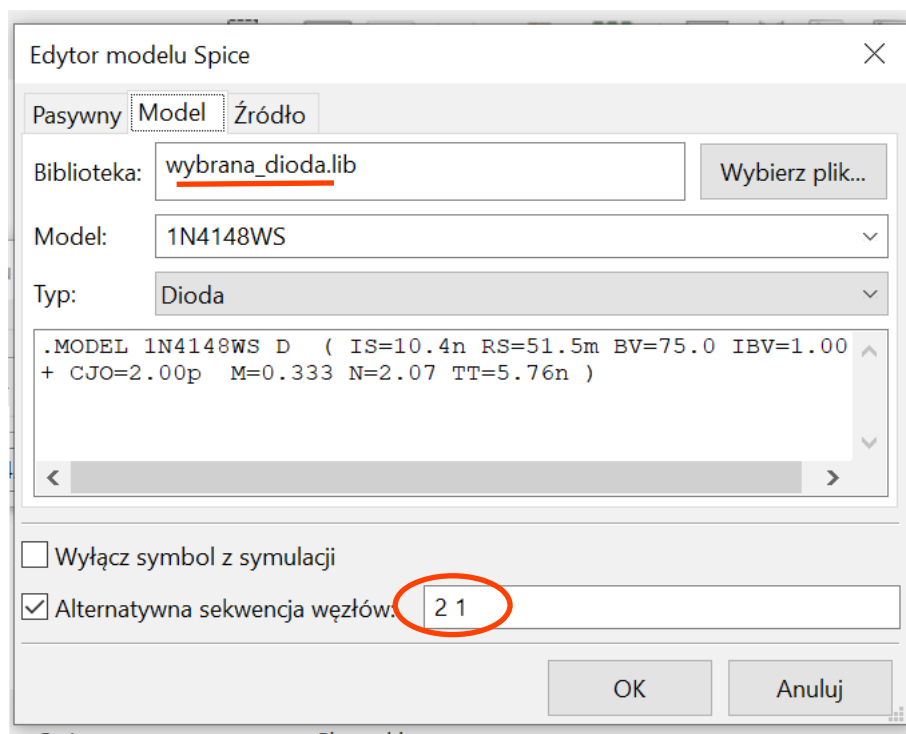
Rys. 16 Plik tekstowy *wybrana\_dioda.lib*

Wstawiono w schemacie z poprzedniego przykładu, w miejsce diody z biblioteki spice, symbol diody z biblioteki edytora schematów, nie posiadający modelu matematycznego (rys.17).



Rys. 17 Schemat układu z symbolem diody,  
nie posiadającym zdefiniowanego modelu matematycznego

W edytorze schematów, po kliknięciu w przycisk *Edycja modelu Spice* (rys. 5), wybrano plik z modelem, a następnie wybrano symbol diody w polu *Model* (rys. 18). W jednym pliku tekstowym pliku można umieścić praktycznie dowolną ilość modeli, stąd funkcjonalność wyboru w ramach pliku nazwy elementu.



Rys. 18 Zakładka do definiowania modelu diody`

### Ważne !

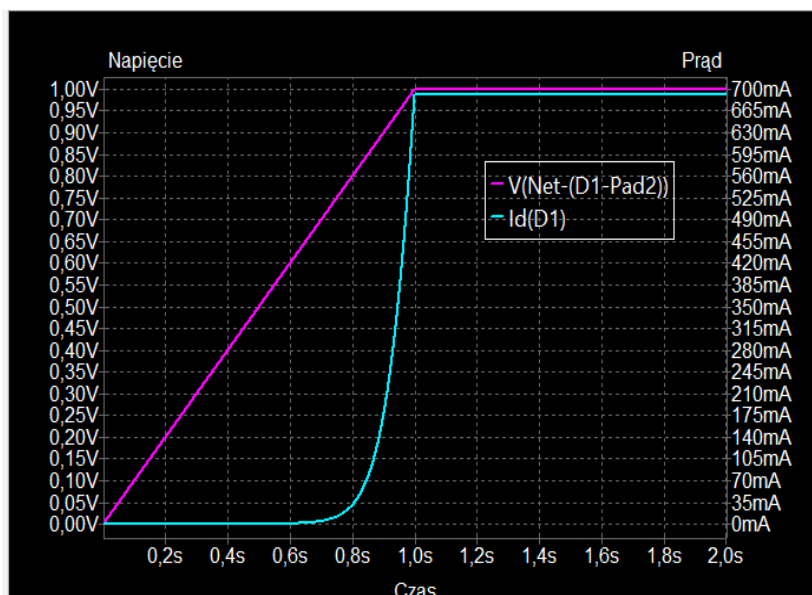
Struktura modelu diody w środowisku spice jest tak zdefiniowana, że domyślnie przyjmuje się: pin numer 1 to anoda, pin numer 2 to katoda. Trudno określić dlaczego, symbole diod w środowisku KiCad mają przypisane numery pinów odwrotnie. Prawdopodobnie z przyczyn historycznych.

W związku z powyższym, dla tak zdefiniowanego modelu i skierowanego elementu diody jak na schemacie, symulacja zostanie policzona dla kierunku zaporowego. Można to ominąć i odwrócić na schemacie kierunek diody na zaporowy, pałęając, że symulacja będzie liczona jak gdyby dioda była odwrócona w kierunku przewodzenia. Nie jest to oczywiście zalecany sposób rozwiązania tego problemu

Zamieszania unika się w ten sposób, że można podać alternatywną sekwencję węzłów (zob. zakreslenie rys. 18), taką jaką ma element w edytorze, czyli 2 1 i model diody zachowuje się już zgodnie z oczekiwaniami.

Podobne rozwiązanie problemu często jest konieczne w przypadku tranzystorów. Wówczas podaje się prawidłową sekwencję trzech pinów.

Następnie zweryfikowano poprawność symulacji (rys. 19). Obserwuje się charakterystyczny wzrost prądu według krzywej eksponencjalnej. Prędkość narastania napięcia na diodzie (i jednocześnie skala osi x) wynosi 1 Volt na 1 sekundę.



Rys. 19 Wynik symulacji weryfikujące jmodel diody

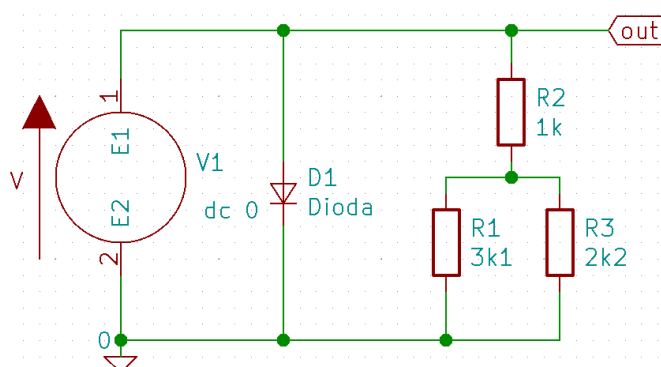
Prąd rośnie według krzywej eksponencjalnej w funkcji napięcia. Jest to dioda przełączająca uniwersalna. Wartość prądu w okolicach 1V wynosi 0,7 Ampera i jest to jak najbardziej realna wartość. Wstępnie można oszacować, że model jest wiarygodny i nie występują tzw. „błędy grube”

## Analiza DC

Analiza stało-prądowa w przeważającej mierze, przydatna jest do wyznaczania statycznych charakterystyk elementów elektronicznych. Polega ona na tym, że symulatorowi zadaje się zakres zmian wybranego źródła stałego napięcia (mogą to być tylko te źródła, które mają wpisaną jakąkolwiek wartość w polu DC, także 0V), ze stałym krokiem. Dla każdej wartości tak zmieniającego się napięcia obliczane są napięcia i prądy występujące w węzłach i gałęziach układu. Następnie można przeglądać zachowanie się statyczne badanego układu elektronicznego w funkcji tego napięcia.

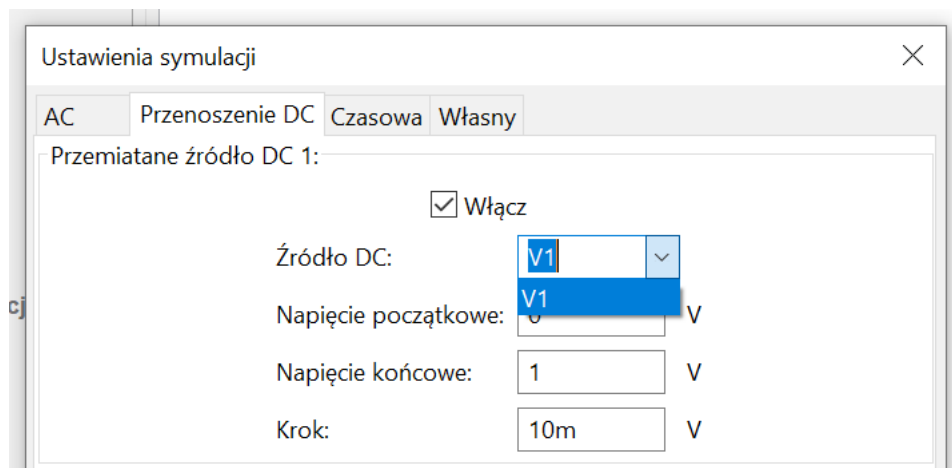
## Przykład 1

W układzie poniżej (rys. 20), wpisano w polu DC źródła  $V_1$  wartość: dc 0, umożliwiając tym wykorzystanie źródła w symulacji stało-prądowej. Dodatkowo, dla uproszczenia nadano węzłowi etykietę out.



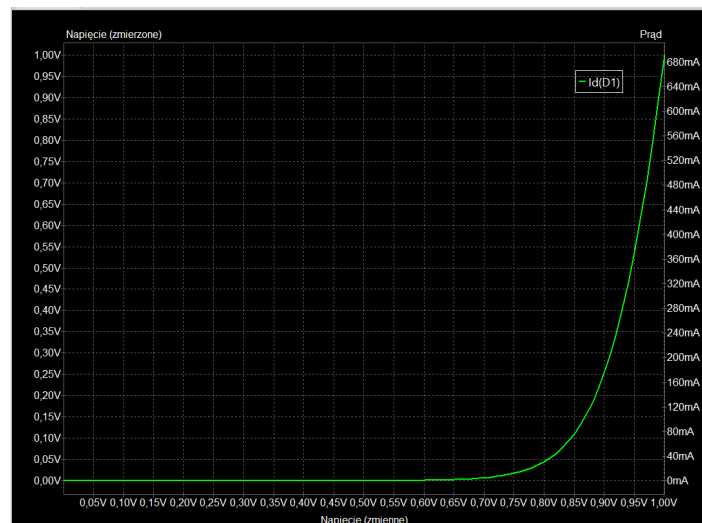
Rys. 20 Analiza stałoprądowa

Następnie uruchomiono symulator, wybrano zakładkę *Ustawienia*, i wprowadzono następujące wartości: Źródło DC: V1, Napięcie początkowe: 0, Napięcie końcowe 1 V, Krok: 10m (rys. 21).



Rys. 21 Ustawienie parametrów analizy DC

W kolejnym kroku uruchomiono symulację, a następnie wybrano do prezentacji prąd diody, symbol  $I_d(D1)$ . Łatwo zauważyć, że wygląd charakterystyki jest bardzo podobny do prezentowanej na rys. 19. Oba przebiegi powinny być praktycznie identyczne, ponieważ dotyczą tego samego modelu diody. W odróżnieniu od wcześniejszego przykładu, oś x wyskalowana jest w Voltach, zgodnie ze zmieniającą się wartością, którą w tym przypadku jest  $V_1$ .



Rys. 22 Wynik symulacji DC

c.d.n.

## Drukowanie schematów