

SPICE – elektronika ze smakiem (1)

Konstruując mniej skomplikowane urządzenia elektroniczne, można przewidzieć lub obliczyć, jak zachowa się obwód przy zmianie wartości jednego elementu. Ale co w wypadku tych bardziej złożonych? Do ich zaprojektowania, sprawdzenia i optymalizacji używa się specjalnych programów, które służą do symulowania działania obwodów złożonych z elementów elektronicznych. Jednym z nich jest SPICE, o którym na pewno słyszało wielu konstruktorów, ale czy wiedzą, jak go poprawnie użyć?

Nazwa SPICE powstała z pierwszych liter pełnej nazwy Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis. Pomimo licznych dostępnych wersji, protoplastę SPICE opracowano na uniwersytecie Berkeley w Kalifornii [1], a obecnie jest rozwijany przez wiele firm w wersjach komercyjnych np. HSPICE (Synopsys), PSPICE (Cadence), Eldo i AFS (Mentor Graphics) i darmowych, na podstawie różnych licencji np. LTspice (Analog Devices), ngspice, Gnuicap itp.

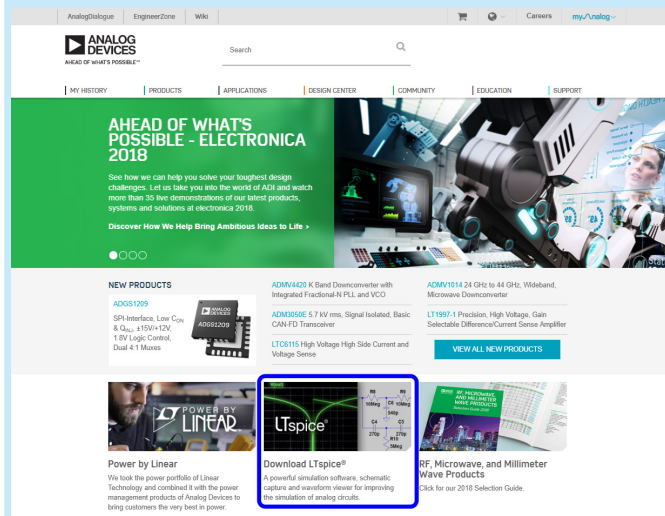
Pliki wejściowe i wyjściowe

W programach typu SPICE układ jest opisywany w pliku tekstowym (pliku wejściowym) zwanym z języka angielskiego netlistą. Definiuje ona nie tylko obwód elektryczny/elektroniczny, ale także rodzaj analizy, wymuszenia i warunki pracy układu. Na jej podstawie SPICE wykonuje odpowiednie obliczenia i generuje pliki wyjściowe, którymi zazwyczaj są: plik z zapisem wykonanych czynności (log), wyjściowy plik tekstowy z wynikami zdefiniowanych pomiarów, plik binarny z zachowanymi wartościami napięć i prądów. Ten ostatni jest wykorzystywany do graficznego zobrazowania zapisanych sygnałów w postaci wykresów.

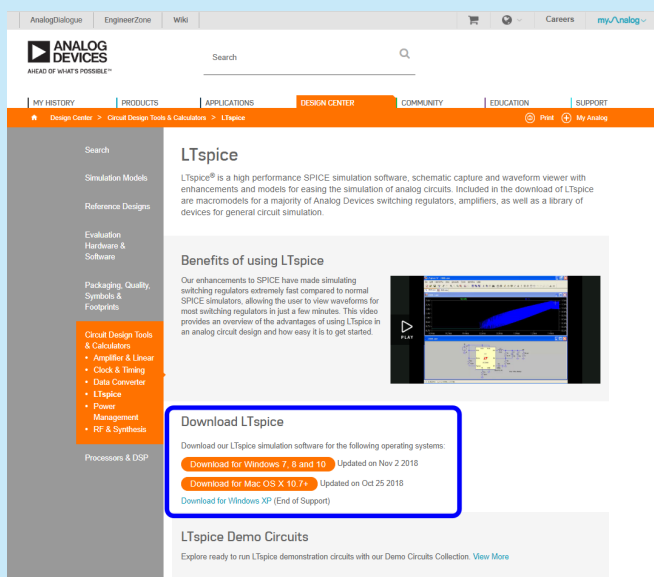
Format netlisty jest ściśle sprecyzowany i zostanie później opisany w tym kursie. Początkowo netlisty tworzone były ręcznie. Jednak, wraz z rozwojem komputerów i w ogóle technologii, programy SPICE były integrowane w większe środowiska projektowe, zawierające graficzne edytory schematów, symboli i programów wizualizacji wyników.

LTspice

W kręgu naszego zainteresowania pozostaną darmowe wersje tego rodzaju programów, a naszą przygodę rozpoczniemy od LTspice.



Rysunek 1. Witryna, z której można pobrać LTspice



Rysunek 2. Podstrona z odnośnikami do źródeł

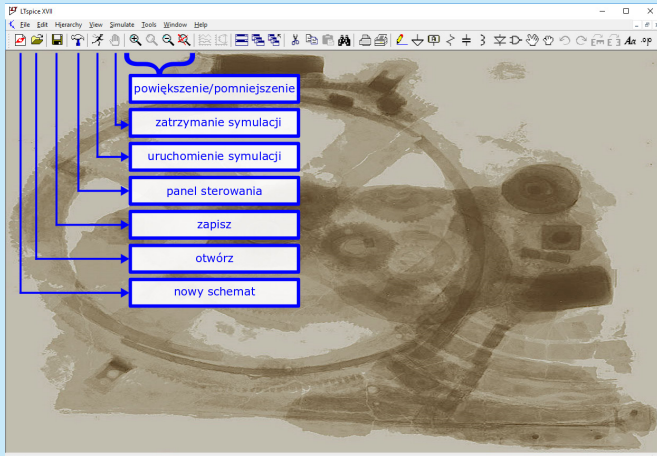
Program LTspice można pobrać ze strony www.analog.com [2]. Aby tego dokonać, należy kliknąć w link znajdujący się w dolnej części witryny (rysunek 1). Przekieruje on nas na stronę poświęconą samemu LTspice, gdzie znajdują się odnośniki do źródeł (rysunek 2).

Po uruchomieniu programu zostaje wyświetlone okno, w którym tworzymy schemat i uruchamiamy symulację. Niektóre pozycje paska narzędzi edycji schematu zostały opisane na rysunkach 3 i 4. Większość z tych opcji da się także uzyskać, korzystając z głównego menu programu, menu kontekstowego lub skrótów klawiszowych. Na przykład, aby utworzyć nowy schemat, można także:

- wybrać z menu: *File* → *New Schematic*,
- klikając prawym przyciskiem myszy, otworzyć menu podręczne i wybrać *New Schematic*,
- użyć skrótu klawiszowego *Ctrl + N*.

Wybrane, przydatne skróty klawiszowe edytora schematów LTSPICE [3]:

- | | |
|------------------------|-------------------------------|
| F3 – rysuj połączenie, | L – wstaw cewkę, |
| F5 – kasuj, | D – wstaw diodę, |
| F6 – kopiuje, | G – wstaw masę, |
| F7 – przenieś, | S – wstaw dyrektywę, |
| F8 – przeciągnij, | T – wstaw tekst, |
| F9 – cofnij, | F2 – wstaw element, |
| Shift + F9 – ponów, | F4 – nazwij połączenie, |
| R – wstaw rezystor, | Ctrl + E – odbicie lustrzane, |
| C – wstaw kondensator, | Ctrl + R – obróć. |



Rysunek 3. Opis wybranych opcji paska narzędzi, część 1

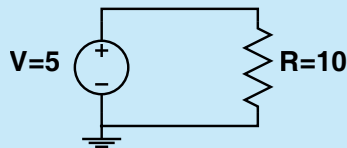
Przydatne skróty klawiszowe edytora schematów wymieniono w ramce.

Pierwsza symulacja

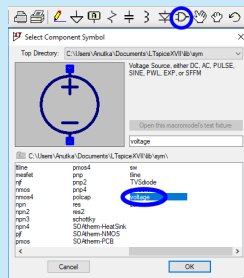
Prawdopodobnie najprostszym obwodem, który można sobie wyobrazić, jest rezystor dołączony do źródła napięcia stałego, jak na **rysunku 5**. Przykładowo może to być wyidealizowany schemat zastępczy żarówki zasilanej z baterii. Należy zwrócić uwagę, że symbol rezystora w tego typu programach jest inny niż ogólnie przyjęty kształt prostokąta.

Aby uzyskać taki schemat, należy po uruchomieniu programu wybrać *nowy schemat*, a następnie wstawić rezystor bezpośrednio z odpowiedniego menu. Źródło napięciowe znajduje się pod symbolem *wstaw element*. Znajduje się tam wiele elementów, dlatego być może trzeba będzie przewinąć pasek (**rysunek 6**). W kolejnych krokach pozostaje już tylko dorysować połączenia między tymi elementami i umieścić symbol masy (**rysunek 7**). Schemat jest już prawie gotowy. Należy teraz określić, jaką wartość napięcia ma nasza bateria (źródło napięcia) i jaka jest wielkość oporu. W tym celu klikamy prawym przyciskiem myszy na tych elementach i wstawiany żądane wartości w odpowiednie pola tak, jak na **rysunkach 8 i 9**.

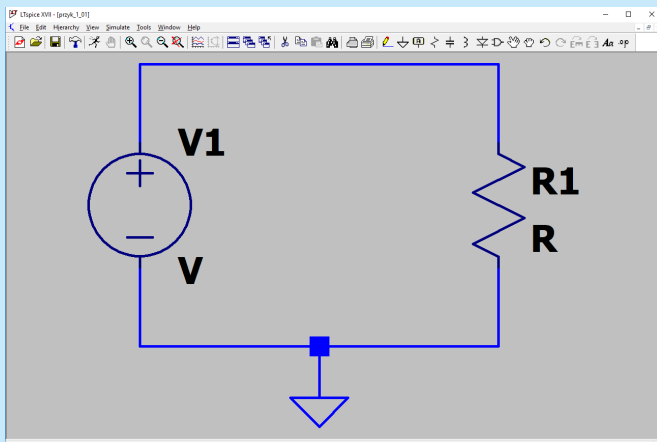
Czy możemy już uruchomić symulację? No prawie. Jeszcze tylko musimy programowi SPICE jakoś powiedzieć,



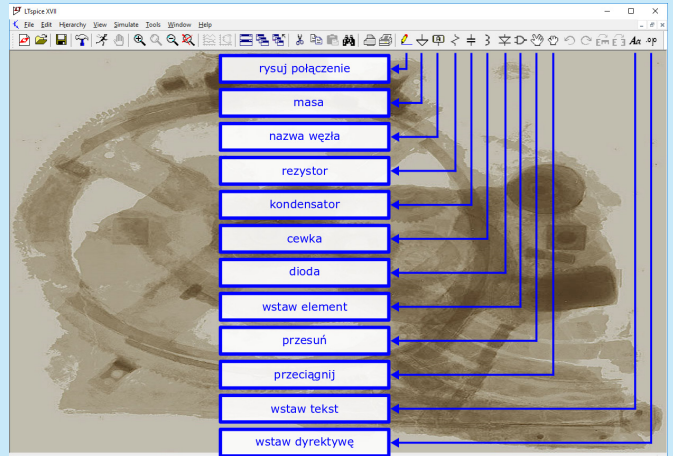
Rysunek 5. Schemat pierwszego obwodu do analizy



Rysunek 6. Okno umożliwiające wybór elementu



Rysunek 7. Dodanie symbolu masy



Rysunek 4. Opis wybranych opcji paska narzędzi, część 2

co ma policzyć. Między innymi do tego celu służą dyrektywy. Dlatego teraz klikamy na ikonkę z tekstem „op” i w puste pole wpisujemy... właśnie **.op** (**rysunek 10**) i zatwierdzamy przyciskiem OK. Gotowy schemat zamieszczono na **rysunku 11**.

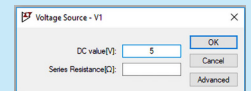
Instrukcja **.OP** służy do wyznaczania statycznego punktu pracy (ang. *operational point*). Dzięki temu SPICE wie, że ma obliczyć składowe stałe wartości napięć panujących w każdym węzle i składowe stałe wartości prądów płynących przez każdy element układu. Ta analiza traktuje pojemności jako rozwarcia, a indukcyjności jako zwarcia w obwodzie. W przypadku nieliniowych elementów (np. tranzystory) wyznaczane są także ich małosygnałowe parametry dla obliczonego stałoprądowego punktu pracy.

Uruchamiamy symulację, a jako wynik wyświetlony zostanie plik, w którym – jak wcześniej zaznaczono – wypisane są wartości wszystkich napięć i prądów w układzie. Jego zawartość wygląda mniej więcej tak:

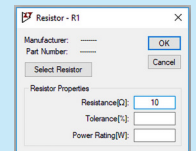
```

--- Operating Point ---
V(n001):  5      voltage
I(R1):    0.5    device_current
I(V1):    -0.5   device_current
    
```

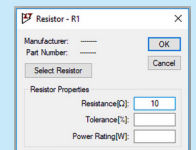
V(n001) oznacza napięcie na węzle łączącym dodatnią końcówkę źródła V1 z rezystorem R1. Nazwa n001 została utworzona



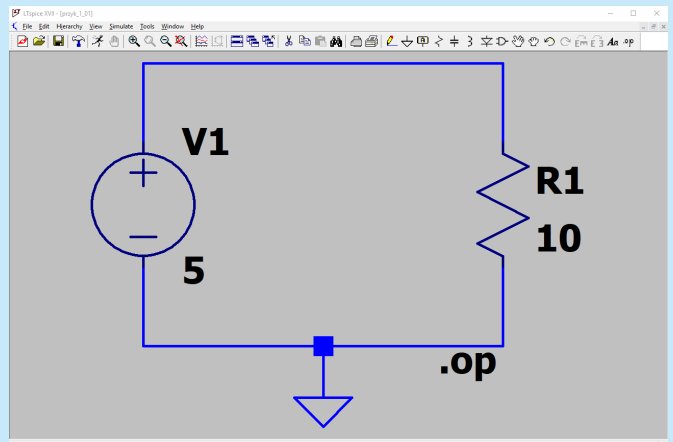
Rysunek 8. Okno parametrów źródła napięciowego



Rysunek 9. Okno parametrów rezystora



Rysunek 10. Wpisanie dyrektywy programu SPICE



Rysunek 11. Wygląd gotowego schematu

automatycznie przez edytor schematów. Oczywiście, można samemu nadać nazwy węzłom poprzez użycie ikonki *nazwa węzła* lub wybranie menu *Edit* → *Label Net* albo skrótu klawiszowego F4.

I(R1) oraz I(V1) oznaczają wartości prądów płynących przez odpowiednio rezystor R1 i źródło napięcia V1. Wartość prądu źródła napięcia jest ujemna, ponieważ jest to prąd wypływający ze źródła. Inaczej można powiedzieć, że przepływa przez samo źródło od ujemnej do dodatniej końcówki.

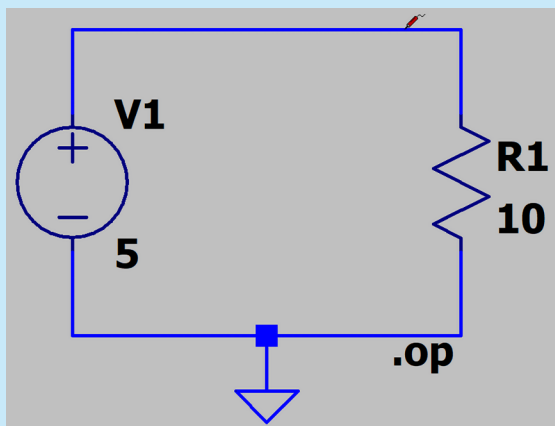
Sprawdźmy jeszcze, czy SPICE się nie pomylił. Na rezystorze 10 Ω panuje napięcie 5 V, więc zgodnie z prawem Ohma przez ten element płynie prąd o wartości:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{5}{10} = 0,5A$$

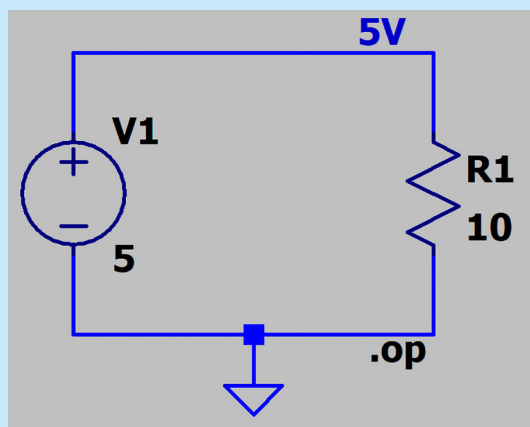
Na szczęście, to dokładnie tyle samo, ile obliczył program. Może to w tym wypadku brzmi zabawnie, ale **mówi się, że nie powinno się używać SPICE-a jeśli projektant kompletnie nie wie, czego ma się spodziewać jako wyniku. Jest to uzasadnione, ponieważ złe dobrane parametry analizy i dokładności obliczeń mogą skutkować błędnymi rezultatami.** Na szczęście, nie dotyczy to aż tak prostego przykładu.

Więcej wiadomości o warunkach analizy czy parametrach elementów nieliniowych znajduje się w pliku rejestru zdarzeń log, który otwiera się za pomocą skrótu Ctrl+L, jednak rozważany przykład nie zawiera tranzystorów, więc jedyną istotną informacją może być wartość temperatury. Tego rodzaju pliki są wstępnie zaprezentowane pod koniec niniejszego artykułu.

W wyniku działania analizy .OP otrzymujemy jedynie pliki tekstowe, nie ma możliwości oglądania wartości na wykresie (zresztą byłyby to pojedyncze punkty). Nie jest to konieczne, ponieważ ta analiza służy do sprawdzenia wartości prądów i napięć, a bardzo łatwo wyszukuje się te informacje w pliku tekstowym. Natomiast można wyświetlić uzyskane wartości napięć poszczególnych węzłów



Rysunek 12. Cursor umieszczony nad linią zasilającą



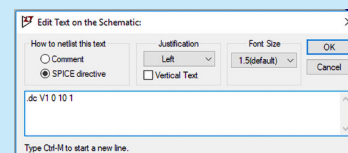
Rysunek 13. Poprawnie wpisany parametr

na schemacie poprzez użycie sondy napięciowej (ang. *probe*). W tym celu należy po prostu kliknąć lewym przyciskiem myszy na odpowiednie połączenie (rysunek 12 i 13).

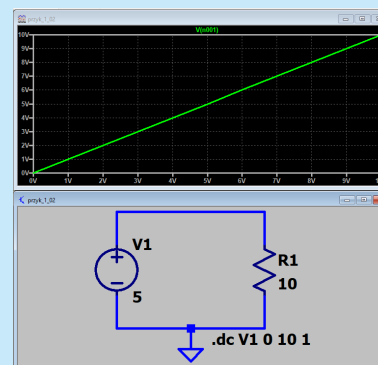
Analiza stałoprądowa .DC

Kolejnym rodzajem symulacji, którego można się nauczyć już na tak prostym obwodzie, jest analiza stałoprądowa „.DC”. Podobnie jak poprzednia, ta analiza również oblicza stałe wartości napięć i prądów, jednak nie informuje o małosygnalowych parametrach elementów nieliniowych. Umożliwia za to wykonanie obliczeń przy zmianie wartości napięcia/prądu w zastosowanym źródle. W naszym wypadku zmianie będzie ulegało napięcie źródła V1 w zakresie 0...10 V z krokiem co 1 V (rysunek 14).

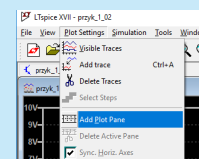
Aby zdefiniować takie zachowanie źródła, należy najpierw usunąć zdefiniowaną w poprzednim przykładzie dyrektywę .op (na przykład za pomocą ikonki wytnij – cut), a następnie dodać nową (np. za pomocą ikonki z napisem .op) .dc V1 0 10 1. Informuje ona program SPICE, że ma on zamienić zadeklarowaną wartość źródła V1 z 5 V na wartości kolejno 0, 1, 2, ... 10 V i dla każdej z nich wykonać symulację.



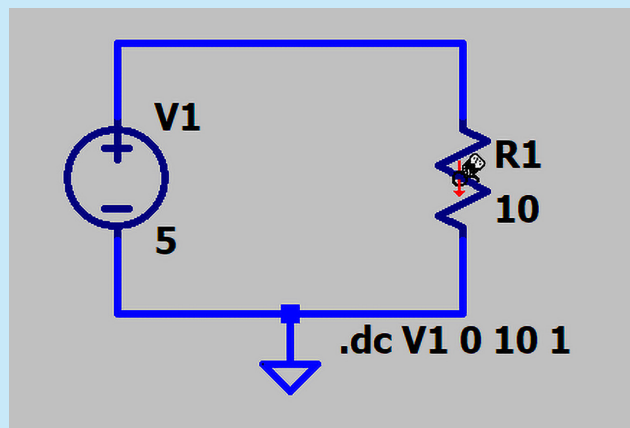
Rysunek 14. Okno parametrów źródła napięciowego



Rysunek 15. Graficzna prezentacja pracy źródła napięciowego



Rysunek 16. Tworzenie nowego wykresu

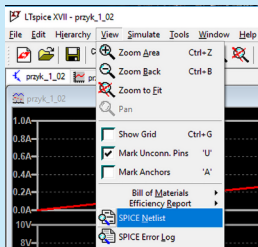


Rysunek 17. Ustawienie sondy prądowej



Rysunek 18. Wykresy napięcia i prądu

Po zakończeniu wykonywania analizy można, jak poprzednio, kliknąć lewym przyciskiem myszy na połączeniu między dodatnią końcówką V1 i rezystorem. W tym wypadku, zamiast pokazania wartości napięcia przy tym połączeniu na schemacie, zostanie wyświetlony wykres zależności napięcia V(n001) od wartości napięcia V1 (rysunek 15). W zależności od tego, czy jest aktywne okno schematu, czy wykresu, zmienia się menu programu. Aby wykreślić wartość prądu płynącego przez rezystor, można najpierw utworzyć nowy wykres poprzez wybranie *Add Plot Pane* z menu *Plot settings* (rysunek 16), oczywiście gdy jest aktywne okno wykresu. Następnie klikamy lewym przyciskiem myszy na tym elemencie – powoduje to użycie sondy prądowej (rysunek 17). Do wykresu zostanie dodana charakterystyka poboru prądu w zależności od napięcia V1 (rysunek 18).



Rysunek 19. Wyświetlenie netlisty

Jej zawartość będzie następująca:

```
* D:\EP\przyk_1_02.asc
V1 N001 0 5
R1 N001 0 10
.dc V1 0 10 1
.backanno
.end
```

Netlista ma rozszerzenie *net*, dla naszego przykładu jest to *przyk_1_02.net*. Często spotykane są także inne rozszerzenia netlist np.: *cir*, *sp*, *in*.

Pierwsza linia jest zawsze traktowana jako komentarz. W tym przypadku LTspice podaje ścieżkę do pliku *asc*, który jest tekstowym plikiem opisującym schemat. Nie jest to netlista, ale opis, jak graficznie wygląda schemat. Zawiera on np. współrzędne linii połączeniowych, współrzędne symboli elementów.

Natomiast deklaracje elementów układu i definicji analiz zawsze rozpoczynają się od nowej linii. Co więcej, pierwszy znak w linii definiuje rodzaj elementu. Na przykład rezystor jest deklarowany tylko i wyłącznie za pomocą litery *r* lub *R* (wielkość litery nie ma znaczenia), a niezależne źródło napięcia poprzez *v* albo *V*. Definicje analiz, czyli dyrektywy, rozpoczyna się od kropki i nazwy tej symulacji, np. poznane już *.op*, *.dc*.

W naszym układzie źródło napięcia stałego V1, o wartości 5 V, jest umieszczone pomiędzy węzłem nazwanym automatycznie przez LTspice jako N001 a symbolem masy. Jest to widoczne w netliście jako: **V1 N001 0 5**. W programach typu SPICE masa jest węzłem wyróżnionym i zawsze nazwanym „0”.

Ogólnie, źródła napięcia stałego definiuje się poprzez:

Vnazwa_źródła_węzeł_dodatni_węzeł_ujemny_wartość

Netlista

Analiza gotowa, wyniki zaprezentowane. Jednak na początku wspomniane było, że SPICE to wszystko wykonuje na podstawie netlisty, a my zrobiliśmy to bez tego pliku...

Tak, to prawda, nie tworzyliśmy tego pliku ręcznie, ale został on wygenerowany automatycznie na podstawie schematu. Wszystkie informacje, które zawarte są w schemacie jako nazwa źródła czy elementu, ich wartości, a także dyrektywy zostały w nim umieszczone. Aby zobaczyć, jak taka netlista wygląda, należy z menu *View* wybrać *SPICE netlist* (rysunek 19).

REKLAMA

100% elektroniki na avt.pl/prenumerata

KOLOROFON Z WI-FI

ELEKTRONIKA PRAKTYCZNA +FTP

Międzynarodowy magazyn elektroników konstruktorów • LUTY • 2019

Niezbędnik elektronika na DVD

Przebiegi analizy AC i błędów MIMO? Międzynarodowy przegląd teorii i przykładowe "Przebiegi analizy i błędów" w programie SPICE? Jak działa FFT? Zastosowanie FFT w analizie sygnałów? Jak działa FFT? Zastosowanie FFT w analizie sygnałów? Jak działa FFT? Zastosowanie FFT w analizie sygnałów?

Impedancje i decybelne projekcje

podzespoły sprzętu

tutoriale

TEMAT NUMERU DRUK 3D

Szkola Konstruktorów - Układ lub artykuł związany z Arduino

ELEKTRONIKA dla wszystkich

1.0219 STYCZEŃ • CENA 12zł • WWW.AVT.PL • 14.000 str.

Infinity

Mój serwer www

Poznaj układy PLD

- "Halogeny" LED
- Rejestратор czoła
- Ładownia akumulatora roweru
 - Przerobka fabrycznego zasilacza
 - Elektroniczny obwód elektronika hobbyista...
- Czy warto naprawiać sprzęt?
- Słuch komputerowa HiFi/HiRes, czyli o matrycach i wyspach Bergamutach
- Wzrost Arduino - Uno i IFT-8
- Przetwornice impulsowe
- Miał wstępy szeregowniki nieliniowe
- Automatyka grzewcza, czyli elektronika w systemach ogrzewania
- Słuch prosto z nieba
- Różnicowanie słuchów odborników lampowych
- Naprawa odbiornika Venus Luxus

Drukarki 3D (taniej, ciekawiej, szybciej)

Portale branżowe AutomatykaB2B.pl, ElektronikaB2B.pl

Miejsca dla specjalistów (elektronika, elektronika, elektronika)

OLED (elektronika, elektronika, elektronika)

SPICE (elektronika, elektronika, elektronika)

www.polskaelektronika.pl

1/2019 styczeń 14.000 str. (16.000)

Wydawca: rozmowa z Pawłem Bockanin i Grzegorzem Chojackim

Elektronik

MAGAZYN ELEKTRONIKI PROFESJONALNEJ

Obwody drukowane - wymagania klientów stale rosną

Wszystkie globalne trendy technologiczne w branży elektronicznej, a więc i w elektronice drukowanej, coraz mocniej promują do coraz większej miniaturyzacji i zwiększenia wymagań technologicznych, w zakresie obwodów drukowanych. Na to wszystko musi odpowiedzieć konstruktor, który zastawia się technologią, która umożliwia mu realizację coraz bardziej złożonych i wymagających obwodów drukowanych. Poniżej przedstawiamy kilka przykładów zastosowań i wyzwań, które stawia przed sobą konstruktor, który chce sprostać tym wymaganiom. **Patrz: str. 24**

Bezpieczne chipy i uwierzytelnianie cyfrowe w walce z podróbkami elektroniki

Niektórzy oryginalni producenci układów scalonych stosują w ich konstrukcji zabezpieczenia, które nie tylko dla producentów, którzy tracą w ten sposób część na bilansie, są niezauważalne, ale także dla klientów, którzy nie są świadomi, że nie w gwarancji jakości i niezawodności, ale w bezpieczeństwie. Niektórzy producenci stosują zabezpieczenia, które nie tylko dla producentów, którzy tracą w ten sposób część na bilansie, są niezauważalne, ale także dla klientów, którzy nie są świadomi, że nie w gwarancji jakości i niezawodności, ale w bezpieczeństwie. **Patrz: str. 24**

Wykres oscyloskopowy w analizie transmisji cyfrowej

Coraz większe prędkości transmisji danych w systemach cyfrowych oraz coraz większe wymagania dotyczące czasu dostawy i kosztów produkcji. Te wymagania muszą być zaspokojone w ramach elektroniki, z której powstają urządzenia i systemy. Do tego należy przede wszystkim przemyśleć i zoptymalizować procesy produkcyjne. **Patrz: str. 24**

W numerze

Obwód barierowy powrotny i gazowy... 24
Elektronika i konwersyjność... 24
Szybka dostawa... 24
Pod w stronę LED... 14

ELTRON (elektronika, elektronika, elektronika)

CONRAD (elektronika, elektronika, elektronika)

STIM (elektronika, elektronika, elektronika)

TECHDAYS (elektronika, elektronika, elektronika)

Projektowanie układów radiowych w AppCAD - str. 62

Przebiegi analizy AC i błędów MIMO? Międzynarodowy przegląd teorii i przykładowe "Przebiegi analizy i błędów" w programie SPICE? Jak działa FFT? Zastosowanie FFT w analizie sygnałów? Jak działa FFT? Zastosowanie FFT w analizie sygnałów?

Prenumeruj Elektronikę Praktyczną + Elektronikę dla Wszystkich? Skorzystaj z promocji 1+1=3 i zamów bezpłatną prenumeratę Elektronika

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie www.media.avt.pl

lub **Vnazwa_źródła węzeł_dodatni węzeł_ujemny DC wartość**
Słowo DC oznacza deklarację źródła napięcie stałego i można je pominąć.

Rezystor o oporze 10Ω jest definiowany w bardzo podobny sposób: **R1 N001 0 10**, co można zapisać ogólnie jako:

Rnazwa_rezystora węzeł_dodatni węzeł_ujemny wartość

Kolejna linia zawiera deklarację analizy stałoprądowej (**.dc V1 0 10 1**), a poszczególne pola oznaczają:

.dc Vnazwa_źródła wartość_początkowa wartość_końcowa krok

Oczywiście analizę stałoprądową można także zdefiniować dla źródeł prądowych, o których jeszcze nie wspominaliśmy, a także dla wielu źródeł jednocześnie, na przykład **.dc V1 0 10 1 I1 0 2 0.1**.

Powyższa netlista zawiera także deklarację **.backanno**, która jest automatycznie dodawana przez LTspice i jest wykorzystywana do automatycznego wyświetlania na wykresie prądów płynących przez element po kliknięciu na tym komponencie [4]. Koniec definicji obwodu jest oznaczany poprzez słowo *end* poprzedzone kropką, które podobnie jak w przypadku znacznika dyrektyw, także powinno znajdować się na początku linii.

Gdy netlistę tworzymy samodzielnie lub edytujemy, dla lepszej przejrzystości można zastosować puste linie i komentarze, które są pomijane przez program podczas jej wczytywania. Początek komentarza jest definiowany za pomocą gwiazdki ***** i obowiązuje on aż do końca linii. Należy tu podkreślić, że pierwsza linia, która zawsze jest komentarzem, nie musi zaczynać się od znaku gwiazdki. Trzeba o tym pamiętać, ponieważ umieszczenie w pierwszej linii np. deklaracji elementu lub analizy spowoduje, że będzie ona pominięta. Może być to przyczyną błędów zgłoszonych przez SPICE (np. braku analizy) albo, co gorsza, analiza może zostać wykonana bez uwzględnienia jakiegoś elementu i w wyniku otrzyma się błędny rezultat.

Pliki wyjściowe

W wyniku uruchomienia analizy generowane są także pliki wyjściowe. W plikach z rozszerzeniem **raw** zawarte są wartości prądów i napięć w układzie, które można wyświetlić jako wykresy. Natomiast w tekstowych plikach **log** SPICE umieszcza między innymi informacje o:

- czynnościach, które wykonał,
- ostrzeżeniach i błędach, jeśli takie zaistniały,
- warunkach pracy układu,
- dacie wykonania symulacji,
- czasie trwania symulacji,
- wykorzystanych metodach obliczeń i ustawieniach.

Zawartość pliku log można wyświetlić poprzez wybranie **View** → **SPICE Error Log** i dla naszego przykładu może wyglądać, jak poniżej:
Circuit: * D:\EP\przyk_1_02.asc

.OP point found by inspection.

Date: Sat Nov 17 10:10:23 2018
Total elapsed time: 0.034 seconds.

```
tnom = 27
temp = 27
method = trap
totiter = 20
traniter = 0
tranpoints = 0
accept = 0
rejected = 0
matrix size = 2
fillins = 0
solver = Normal
Matrix Compiler1: 36 bytes object code size
Matrix Compiler2: 96 bytes object code size
```

Na razie zwróćmy uwagę tylko na fakt, że nasza analiza została wykonana w temperaturze 27 stopni ($temp = 27$). SPICE domyślnie przyjmuje tę wartość (temperatura nominalna $tnom = 27$), jeśli użytkownik nie wskaże innej wartości.

Podsumowanie

Program SPICE jest profesjonalnym narzędziem wspomagającym projektowanie oraz analizę obwodów elektrycznych i elektronicznych. Moim zdaniem, jego naukę powinno się rozpocząć od prostych przykładów pokazujących z osobna poszczególne możliwości i cechy takiego oprogramowania. Pozwoli to na zdobycie podstawowych umiejętności, które zostaną w późniejszym czasie użyte do zgłębiania kolejnych tajników i rozwiązywania bardziej zaawansowanych problemów. Jednocześnie badanie prostych obwodów umożliwi naukę samej elektroniki. Daje możliwości sprawdzenia „co się stanie gdy...” bez obaw, że zostanie uszkodzony być może kosztowny element. W niektórych przypadkach można nawet zaobserwować wartości prądów i napięć występujących wewnątrz układu, co jest niemożliwe do zmierzenia w realnych elementach. Aczkolwiek zbadane lub zaprojektowane przez siebie układy czy urządzenia warto wykonać i porównać wyniki pomiarów z symulacjami.

Adam Gołda
adlogmada@gmail.com

Bibliografia:

1. J. Porębski, P. Korohoda, *SPICE program analizy nieliniowej układów elektronicznych*, WNT 1996
2. www.analog.com, listopad 2018
3. LTspice_ShortcutFlyer.pdf, <http://bit.ly/2SORLHe>, listopad 2018
4. www.ltwiki.org, listopad 2018

REKLAMA

www.sklep.avt.pl