

Podróże kształcą. Ale bajki kształcą w stopniu znacznie większym. Wszystko to, co mówił Nadmakaron, Wielki Bazarz wymyślił o wiele wcześniej, a doktor Paj-Chi-Wo opowiadał mi pięćdziesiąt lat temu.

Jan Brzechwa, „Podróże Pana Kleksa”

1. PIERWSZE KROKI

Prace nad komputerową analizą układów elektronicznych prowadzone w połowie lat siedemdziesiątych w zespole dr Nagel-a [24] w University of California zaowocowały w postaci programu SPICE2 służącego do symulacji układów elektronicznych. Sponsorem prac był rząd Stanów Zjednoczonych, stąd wynik — program SPICE2 — jest programem *public domain* tzn. z jego kodu źródłowego może korzystać swobodnie każdy obywatel Stanów Zjednoczonych. Program ten w bardzo krótkim czasie stał się nieformalnym standardem wśród programów do analizy obwodów elektronicznych. Pojawiło się także wiele wersji komercyjnych opracowanych na podstawie programu SPICE2. Jedną z nich jest program PSpice firmy MicroSim.

1.1. Komputerowa analiza układów elektronicznych

Wczesne lata siedemdziesiąte były początkiem burzliwego rozwoju technologii wytwarzania scalonych układów elektronicznych. Ze względu na wysoki koszt opracowania masek, układ scalony musi być jak najdokładniej sprawdzony nim przystąpi się do produkcji masowej. Badania wykonywane na prototypie w tym wypadku nie mogą być zastosowane z następujących powodów:

- ☐ Koszt wykonania jednego kompletu masek prototypu, w przypadku badań na prototypowym układzie scalonym, jest porównywalny z kosztem produkcji całego układu¹.
- ☐ Model układu wykonany w oparciu o elementy dyskretne z reguły nie oddaje zachowania układu scalonego. Powodem tego są efekty fizyczne charakterystyczne *tylko* dla układów scalonych.

¹Na koszt wytworzenia pojedynczego układu scalonego składa się głównie koszt projektu układu, koszt projektu masek i koszt testowania układu. Koszty użytych materiałów są znacznie mniejsze.

W rezultacie pozostaje symulacja komputerowa. Pozwala ona na sprawdzenie układu stosunkowo niskim kosztem, *zanim* jeszcze zostanie zrealizowany. Dlatego też początek lat siedemdziesiątych to okres intensywnych prac nad komputerową analizą układów elektronicznych. Powstał wtedy program CANCER [23], a następnie program SPICE2 (ang. Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis — symulator układów scalonych) przeznaczony do analizy układów elektronicznych zrealizowanych w postaci scalonej. Wygoda użytkowania oraz wyjątkowa wiarygodność i dokładność obliczeń spowodowały, że SPICE2 stał się wzorcem programu przeznaczonego do analizy obwodów i obecnie jest użytkowany także przy projektowaniu układów złożonych z elementów dyskretnych.

1.2. Prosty obwód

Użytkowanie programu PSpice na komputerze IBM PC² wymaga następujących umiejętności:

- ☐ Umiejętności posługiwania się edytorem tekstu w celu utworzenia i edycji zbioru z danymi wejściowymi. Zbiór taki zawiera opis obwodu w specyficznym języku symulacyjnym oraz zestaw instrukcji sterujących procesem analizy obwodu.
- ☐ Umiejętności uruchomienia programu PSpice i przekazania mu informacji gdzie znajdują się dane wejściowe i gdzie powinien umieścić wyniki analizy (dane wyjściowe).
- ☐ Umiejętności wyświetlenia wyników analizy (danych wyjściowych). Najwygodniej posłużyć się w tym celu tym samym edytorem tekstu, którego używano do utworzenia zbioru z danymi wejściowymi.

Autor sądzi, że Czytelnik jest w stanie opanować te czynności samodzielnie. W razie trudności można się odwołać do dowolnego podręcznika opisującego system operacyjny MS-DOS np. [13].

Przykład:

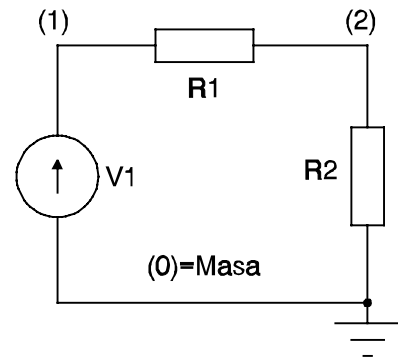
Rozważmy prosty obwód elektroniczny przedstawiony na Rys. 1. Dane wejściowe dla programu PSpice, opisujące ten obwód mają postać:

```
PROSTY OBWOD
V1 1 0 10V           ;źródło napięcia
R1 1 2 5KOHM         ;opornik R1=5k
R2 2 0 10KOHM        ;opornik R2=10k
.END                 ;koniec danych
```

Tekst, który znajduje się w pierwszej linii opisu obwodu to tytuł analizy. Zostanie on umieszczony jako nagłówek w wynikach analizy. Właściwy opis struktury obwodu zaczyna

²Program PSpice dostępny jest także na komputerach firmy Sun.

się w drugiej linii. Zawiera ona deklarację niezależnego źródła napięcia (SEM — sila elektro-motoryczna) o nazwie V1, wpiętego między węzeł o numerze 1 (wyższy potencjał) i węzeł o numerze 0 (niższy potencjał). Napięcie dostarczane przez źródło wynosi 10[V]. Następną linią to deklaracja opornika R1 o wartości 5000[Ω]. Opornik ten wpięty jest między węzły o numerach 1 i 2. Kolejną linią danych to deklaracja opornika o nazwie R2 i wartości 10000[Ω] wpiętego między węzeł 2 i 0. Oporniki R1 i R2 tworzą dzielnik napięcia. Ostatnia linia opisu zawiera instrukcję, która powoduje, że program PSpice kończy interpretację danych wejściowych. Jest to instrukcja .END³ (ang. **END** — koniec) — instrukcja końca obwodu. Należy zwrócić uwagę na następujące szczegóły:



Rys.1. Prosty obwód.

- ☐ Wartości oporności R1 i R2 podane zostały za pomocą przyrostka „K” oznaczającego tysiąc.
- ☐ Dla większej przejrzystości danych, wartości oporności zostały uzupełnione o nazwę jednostki fizycznej — OHM.
- ☐ Numeracja węzłów jest zupełnie dowolna z wyjątkiem węzła masy, którego numer *musi* być zawsze równy zero.
- ☐ Każda linia danych jest zostać opatrzona komentarzem. Komentarz umieszcza się po średniku „;” na końcu linii danych.

Po przetworzeniu danych wyniki analizy umieszczane są w zbiorze danych wyjściowych. W naszym przypadku wygląda on następująco:

```
***** 07/10/91 ***** Evaluation PSpice (Jan. 1988) ***** 15:26:18 *****
```

```
PROSTY OBWOD
```

```
****      CIRCUIT DESCRIPTION
```

```
*****
```

```
V1 1 0 10V           ;źródło napięcia
R1 1 2 5KOHM         ;opornik R1=5k
R2 2 0 10KOHM        ;opornik R2=10k
.END                 ;koniec danych
```

```
***** 07/10/91 ***** Evaluation PSpice (Jan. 1988) ***** 15:26:18 *****
```

```
PROSTY OBWOD
```

```
****      SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
```

```
*****
```

³Poprzedzająca kropka jest integralną częścią instrukcji końca opisu obwodu.

NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
(1)	10.0000	(2)	6.6667				

VOLTAGE SOURCE NAME	CURRENTS CURRENT
V1	-6.667E-04

TOTAL POWER DISSIPATION	6.67E-03	WATTS
-------------------------	----------	-------

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME	.82
----------------	-----

Zbiór danych wyjściowych podzielony jest na sekcje. Każda z nich zaczyna się nagłówkiem zawierającym:

- ☐ Informację o wersji używanego programu — Evaluation PSpice (Jan. 1988).
- ☐ Datę oznaczającą dzień, w którym przeprowadzono obliczenia — 07/10/91.
- ☐ Czas, w którym przeprowadzono obliczenia — 15:26:18.

Nagłówek zawiera ponadto:

- ☐ Tytuł analizy. Jest to zawartość pierwszej linii w zbiorze danych wejściowych. W naszym przypadku to PROSTY OBWOD.
- ☐ Krótką informację na temat zawartości sekcji. Np. pierwsza sekcja danych wyjściowych w naszym przykładzie to opis analizowanego obwodu. Stąd angielski tytuł tej sekcji **** CIRCUIT DESCRIPTION.

Pierwsza sekcja wyników zawiera powtórzenie opisu obwodu. Umieszczane są tu komunikaty o wszelkich wykrytych przez program błędach. W następnej sekcji umieszczone zostały, obliczone przez program potencjały węzłowe, prąd płynący przez źródło napięcia i moc rozpraszana przez układ. Jest to tzw. statyczny punkt pracy układu. Ogólnie rzecz biorąc składają się nań:

- ☐ Potencjały węzłowe.
- ☐ Prądy płynące przez niezależne źródła napięcia — SEM.
- ☐ całkowita rozpraszana moc.
- ☐ Parametry zadeklarowanych modeli;
- ☐ Prądy i napięcia na elementach półprzewodnikowych zadeklarowanych w strukturze obwodu.
- ☐ Wybrane parametry małosygnałowe przyrządów półprzewodnikowych zadeklarowanych w strukturze obwodu.

Zbiór danych wyjściowych kończy się komunikatem o czasie obliczeń — TOTAL JOB TIME. Czas ten podawany jest w sekundach. W naszym przypadku czas obliczeń wynosił 0.82[s].

1.3. Organizacja danych wejściowych

Na powyższym przykładzie widać, że dane wejściowe składają się z linii zawierających kolejno:

- ☐ Tytuł analizy.
- ☐ Opis obwodu.
- ☐ Instrukcję .END kończącą dane.

Zwykle po opisie obwodu, a przed instrukcją .END umieszcza się:

- ☐ Instrukcje programu PSpice sterujące analizą i wyprowadzaniem wyników obliczeń.
- ☐ Instrukcje programu PSpice sterujące dołączaniem bibliotek.
- ☐ Deklaracje modeli przyrządów, które występują w strukturze obwodu.
- ☐ Deklaracje podobwodów, które znalazły się w strukturze obwodu.

Dobrym zwyczajem jest komentowanie danych, w taki sposób jakby groziła nam amnezja. Komentarz umieścić można w osobnej linii zaczynając ją od znaku gwiazdki „* ”. Można też, tak jak w naszym przykładzie, komentarz umieścić na końcu linii po znaku średnika „; ”.

Jeżeli dane, które należy umieścić w jednej linii nie mieszczą się w 80 kolumnach, część danych można umieścić w następnej linii. Linia kontynuacji zaczyna się znakiem „,+”.

Przykład:

```
*TAK TEŻ MOŻNA ZADEKLAROWAĆ OPORNIK
R1 1 2
+      10KOHM
```

Inną metodą zaradzenia tego typu trudnościom jest zwiększenie liczby czytanych przez program PSpice kolumn za pomocą instrukcji .WIDTH (ang. *width* — długość). Jej postać jest następująca:

.WIDTH IN=_kolumna1 OUT=_kolumna2

Przykład:

```
.WIDTH IN=144 OUT=80
```

W polu **_kolumna1** (po słowie kluczowym IN=) umieszcza się numer ostatniej kolumny czytanej z każdej następnej linii danych wejściowych. W polu **_kolumna2** (po słowie kluczowym OUT=) umieszcza się liczbę kolumn każdej linii zbioru danych wyjściowych. Dopuszczalna liczba kolumn w zbiorze wyjściowym to 80 i 133.

Ze względu na zastosowaną metodę analizy obwodu (strona 11), program PSpice narzuca następujące ograniczenia na strukturę analizowanego obwodu [31],[26]:

- ☐ Obwód musi zawierać węzeł o numerze zero — węzeł masy.
- ☐ Do każdego węzła *muszą* być dołączone co najmniej dwa elementy.
- ☐ Każdy węzeł musi posiadać stałoprądowe połączenie z węzłem masy.
- ☐ Obwód nie może zawierać oczek składających się wyłącznie z źródeł napięcia i indukcyjności.
- ☐ Niedozwolone jest stosowanie tej samej nazwy dla oznaczenia różnych elementów.

1.4. Podstawowe typy elementów [26],[31],[33]

Na opis obwodu składają się deklaracje elementów elektronicznych. Deklaracja elementu zawiera nazwę, numery węzłów obwodu, w które element jest wpięty oraz parametry. Elementy o złożonym modelu wymagają podania nazwy modelu⁴. Poniżej przedstawione zostały deklaracje podstawowych elementów elektronicznych dostępnych w programie PSpice.

1.4.1. Opornik

Deklaracja opornika w strukturze obwodu:

RXXXXXXX n+ n- _war_r [TC=_tc1[, _tc2]] ⁵

Przykłady:

R1 23 4 500

RW2 2 3 1K TC=0.001,0.015

Nazwa opornika zawiera do ośmiu liter i zaczyna się od litery „R”. Parametry **n+** i **n-** oznaczają numery węzłów, między które wpięty jest opornik. Spadek napięcia na oporniku obliczany jest jako różnica potencjałów między węzłem **n+** i węzłem **n-**. Pole **_war_r** zawiera wartość opornika wyrażoną w omach. Ze względu na zastosowaną metodę analizy obwodu (strona 11) wartość oporności może być dodatnia lub ujemna, ale nie może być równa zero. Opcjonalne parametry **_tc1** i **_tc2**, których wartość podawana jest po słowie kluczowym **TC=**, służą do opisu zmian wartości oporności wraz z temperaturą:

$$_war_r(T) = _war_r \cdot [1 + _tc1 \cdot (T - TNOM) + _tc2 \cdot (T - TNOM)^2] \quad (1)$$

Wielkość **TNOM** oznacza we wzorze (1) temperaturę nominalną, dla której podano wartość oporności **_war_r**. Program PSpice przyjmuje, że **TNOM** ≈ 27°C (300K). Sposób zmiany wartości temperatury **TNOM** opisany został na stronie 135.

1.4.2. Kondensator

Deklaracja kondensatora w strukturze obwodu:

CXXXXXXX n+ n- _wartość_c [IC=_napięcie]

Przykłady:

CBYP 13 1 1UF

COSC 17 23 10NF IC=5V

⁴Modele wbudowane w program PSpice opisane zostały w rozdziale 6.

⁵Elementy deklaracji lub instrukcji, które nie muszą w niej występować ujmowane są w nawiasy kwadratowe [].

Nazwa kondensatora zaczyna się od litery „C”. Pola **n+**, **n-** oznaczają numery węzłów, w które w pięto odpowiednio dodatni i ujemny biegun kondensatora. Parametr **_wartość_c** to wartość pojemności kondensatora wyrażona w faradach. W polu **_napięcie** po słowie kluczowym **IC=** można podać wartość napięcia na kondensatorze w chwili, gdy rozpoczyna się analiza stanu nieustalonego w obwodzie. Parametr ten ma sens tylko wtedy, gdy w instrukcji analizy stanu nieustalonego (strona 72) użyto opcji UIC.

1.4.3. Indukcyjność

Deklaracja indukcyjności w strukturze obwodu:

LXXXXXXXX n+ n- _wartość_l [IC=_prąd]

Przykłady:

L2F1 2 31 1UH

LBIAS 3 5 10U IC=5MA

Nazwa indukcyjności zaczyna się od litery „L”. W polu **n+** i **n-** umieszcza się numer węzła, do którego dołączono odpowiednio dodatni i ujemny biegun indukcyjności. Spadek napięcia na indukcyjności to różnica potencjałów między dodatnim i ujemnym biegunem. Parametr **_wartość_l** to wartość indukcyjności wyrażona w henrach. Parametr **_prąd**, podawany po słowie kluczowym **IC=**, oznacza wartość prądu płynącego przez indukcyjność w chwili gdy rozpoczyna się analiza stanu nieustalonego w obwodzie. Parametr ten ma sens tylko wtedy, gdy w instrukcji analizy stanu nieustalonego (strona 72) użyto opcji UIC.

1.4.4. Indukcyjności sprzężone

Deklaracja sprzężenia magnetycznego indukcyjności ma następującą postać:

KXXXXXXXX LYYYYYYY LZZZZZZZ _wartość_k

Przykłady:

K12 L1 L2 0.995

KX1 LA1 LB3 0.8

Nazwy sprzężonych indukcyjności to **LXXXXXXXX** i **LYYYYYYY**. Parametr **_wartość_k** oznacza bezwymiarowy współczynnik sprzężenia. Jego wartość powinna być większa od zera i nie większa od jedności. Sprzężenie symulowane jest przez program PSpice w taki sposób, że indukcyjności narysowane na schemacie mają „gwiazdki” przy dodatnich biegunach.

1.4.5. Bezstratna linia długa

Program PSpice jest w stanie symulować zachowanie się obwodu, zawierającego w swojej strukturze bezstratną linię długą. Deklarując taki element należy jednak być ostrożnym. PSpice dokonuje analizy stanu nieustalonego z krokiem nie przekraczającym połowy czasu

potrzebnego na to aby fala elektromagnetyczna przebyła linię. W przypadku, gdy wspomniany czas jest krótki⁶ prowadzi to do niepotrzebnego wydłużenia czasu obliczeń.

Deklaracja bezstratnej linii długiej:

```

TXXXXXXX n1 n2 n3 n4 Z0=_imp [TD=_czas] [F=_częst [NL=_dług]]
+
[IC=_v1,_i1,_v2,_i2]

```

Przykłady:

```

TS 1 2 3 4 Z0=50 TD=10NS
T1 12 0 3 0 Z0=75 F=100M NL=5
TXW2 2 5 3 0 Z0=93 F=25M

```

Nazwa linii długiej zaczyna się od litery „T”. Model linii długiej w programie PSpice jest dwuwrotnikiem. W ten sposób modelowana jest tylko fala rozchodząca się „wewnątrz linii”. Fale rozchodzące się między np. masą, a jednym z przewodów linii muszą być modelowane za pomocą osobnej linii długiej. Parametry **n1,n2** oznaczają numery węzłów tworzących wrota wejściowe, natomiast **n3,n4** oznaczają numery węzłów tworzących wrota wyjściowe. Po słowie kluczowym **Z0=**, w polu **_imp**, podaje się wartość impedancji falowej linii wyrażoną w omach. Po słowie kluczowym **TD=**, w polu **_czas**, podaje się czas potrzebny na to by fala elektromagnetyczna przebyła linię. Czas ten można także zadeklarować w sposób pośredni. Mianowicie po słowie kluczowym **F=**, w polu **_częst**, podaje się częstotliwość⁷, dla której linia jest linią ćwierćfalową. Czas przelotu linii TD jest odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości F:

$$TD = 1 / (4 \cdot F) \quad (2)$$

Dopuszczalne jest także podanie, w polu **_częst**, dowolnej wartości częstotliwości. Wtedy w polu **_dług**, po słowie kluczowym **NL=** należy podać długość linii. Jednostką powinna być długość fali rozchodzącej się w linii dla częstotliwości podanej po słowie **F=**. Czas przelotu TD wyraża się wówczas wzorem:

$$TD = NL / F \quad (3)$$

Po słowie kluczowym **IC=** można podać w polach **_v1,_i1** i **_v2,_i2** napięcie i prąd odpowiednio na wejściu i wyjściu linii w chwili rozpoczęcia analizy stanu nieustalonego. Parametry te mają sens tylko wtedy, gdy instrukcja analizy stanów nieustalonych zawiera opcję UIC (strona 72).

⁶W stosunku do czasów charakterystycznych dla reszty obwodu.

⁷Wyrażoną w hertzach.

1.4.6. Niezależne źródła napięcia i prądu

Deklaracja niezależnego źródła napięcia (prądu) w strukturze obwodu ma postać:

VXXXXXXX n+ n- [[DC] DC\TRAN wartość_z][AC[_moduł[_faza]]]
IXXXXXXX n+ n- [[DC] DC\TRAN wartość_z][AC[_moduł[_faza]]]

Przykłady:

VCC 10 0 DC 10V
 V1 0 23
 ICC 10 0 DC 6MA
 IW1 13 2 0.1 AC 0.1 45.0

Nazwa niezależnego źródła napięcia zaczyna się od litery „V”. Nazwa niezależnego źródła prądu zaczyna się od litery „I”. Parametry **n+**, **n-** oznaczają odpowiednio dodatni i ujemny biegun źródła. Parametr **wartość_z**, poprzedzony słowem kluczowym **DC** (lub **DC/TRAN**), oznacza w przypadku SEM wartość napięcia stałego (wyrażoną w woltach) jakie wytwarzane jest między dodatnim i ujemnym biegunem źródła. W przypadku SPM oznacza on wartość prądu stałego (wyrażoną w amperach) wymuszanego przez źródło. Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, że dodatni prąd płynie od dodatniego bieguna źródła *przez* źródło do ujemnego bieguna. Parametry **_moduł** i **_faza** poprzedzone słowem kluczowym **AC** oznaczają moduł i fazę napięcia (prądu) zmiennego wytwarzanego przez źródło. Brak parametrów oznaczających wartość napięcia (prądu) dostarczanego przez źródło oznacza, że wartość ta wynosi zero.

1.4.7. Źródła sterowane napięciem

Program PSpice umożliwia umieszczenie w strukturze obwodu źródła napięcia (prądu) sterowanego napięciem. Odpowiednia deklaracja dla sterowanej SEM przyjmuje postać:

EXXXXXXXX n+ n- nc+ nc- wartość_s

natomiast dla sterowanej SPM:

GXXXXXXX n+ n- nc+ nc- wartość_s

Przykłady:

G1 2 0 5 0 0.1MHO
 EEM 20 30 11 10 1E3

Parametr **n+** i **n-** oznacza numer węzła, w który wpięto odpowiednio dodatni biegun źródła i ujemny biegun źródła. Napięcie sterujące to różnica potencjałów między węzłem określonym przez parametr **nc+** i węzłem określonym przez parametr **nc-**. W przypadku SEM sterowanej napięciem parametr **wartość_s** oznacza bezwymiarowe wzmocnienie napięciowe źródła. W przypadku SPM sterowanej napięciem parametr ten to transkonduktancja źródła o wymiarze [A/V].

1.4.8. Źródła sterowane prądem

Program PSpice dopuszcza także występowanie w obwodzie źródeł sterowanych prądem. Deklaracja SEM sterowanej prądem:

XXXXXXXX n+ n- _nazwa wartość_s

Deklaracja SPM sterowanej prądem:

XXXXXXXX n+ n- _nazwa wartość_s

Przykłady:

F1 2 5 VSTER 5

H1 1 15 VSTER 0.5K

Parametr **n+** i **n-** oznacza numer węzła, w który wpięto odpowiednio dodatni biegun źródła i ujemny biegun źródła. Parametr **n+** i **n-** oznacza odpowiednio numer węzła, w który wpięto dodatni i ujemny biegun źródła. Prąd sterujący płynie przez *źródło napięcia*, którego nazwa określona jest przez pole **_nazwa**. W polu **wartość_s** w przypadku SEM sterowanej prądem podaje się transrezystancję źródła (o wymiarze [V/A]). W przypadku SPM sterowanej prądem parametr podany w polu **wartość_s** oznacza bezwymiarowe wzmocnienie prądowe źródła.

Tablica I Przyrostki literowe odpowiadające kolejnym potęgom liczby dziesięć.

Przedrostek	Przyrostek	Wartość
femto	F	1.0E-15
pico	P	1.0E-12
nano	N	1.0E-9
micro	U	1.0E-6
mili	M	1.0E-3
kilo	K	1.0E+3
mega	MEG	1.0E+6
giga	G	1.0E+9
tera	T	1.0E+12

1.5. Wartości elementów

W przypadku wszystkich wymienionych wyżej deklaracji konieczne jest podawanie wielkości liczbowych opisujących element.

Jak można zorientować się z przytoczonych

przykładów wartości liczbowe mogą być podawane na trzy sposoby:

- ☐ Zwykle liczby w zapisie dziesiętnym:

5 ; 15.3 ; -234.51 .

- ☐ Liczby zapisane za pomocą mantysy i wykładnika:

0.023=2.3E-2 ; 100=1E2 ; -0.3=-3.0E-1 .

Litera E (ang. *exponent* — wykładnik) oddziela zwykłą liczbę dziesiętną (mantysę) od wykładnika. Liczba jest równa iloczynowi mantysy i potęgi o podstawie dziesięć i wykładniku zapisanym po literze E.

- ☐ Liczby zapisane za pomocą przyrostków odpowiadających kolejnym potęgom liczby dziesięć. Przyrostki te odpowiadają przedrostkom przed nazwami jednostek fizycznych dopuszczalnych przez układ jednostek SI (patrz Tablica I). Wczesne wersje programu PSpice dopuszczały używanie tylko dużych liter. Stąd przyrostek oznaczający 10^6 to

MEG, dla odróżnienia od przyrostka \underline{M} oznaczającego 10^{-3} . W ten sposób liczba 0.023 może zostać zapisana na wiele różnych sposobów np.:

23M ; 23000U ; 2.3E5K

Ze względu na czytelność danych najbardziej preferowana jest ostatnia forma zapisywania wartości liczbowych. Poza wymienionymi ignorowane są wszelkie litery. Dzięki temu wartości liczbowe można uzupełnić o skróty nazw odpowiednich jednostek fizycznych (patrz wcześniejsze przykłady).

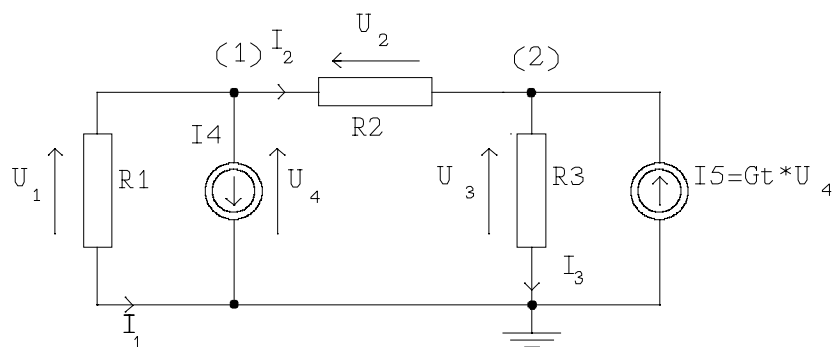
1.6. Uwagi o metodzie analizy obwodu

Wszystkie metody numeryczne stosowane do obliczania statycznego punktu pracy, charakterystyk zmiennoprądowych oraz do obliczania stanu nieustalonego sprowadzają się do szeregu analiz liniowego obwodu prądu stałego [28]. Stąd metoda stosowana do analizy takiego obwodu stanowi „jądro” każdego symulatora układów elektronicznych. Poniżej przedstawiona została zmodyfikowana metoda potencjałów węzłowych stanowiąca podstawę działania programu PSpice. Czytelnicy bardziej zainteresowani szczegółami algorytmów numerycznej analizy obwodów powinni sięgnąć do monografii poświęconych temu tematowi np. [5],[4],[6],[2].

1.6.1. Metoda potencjałów węzłowych

Przed przedstawieniem zmodyfikowanej metody potencjałów węzłowych należy przypomnieć samą metodę potencjałów węzłowych. Metoda ta polega na utworzeniu równań obwodu w następujących trzech krokach:

- ☐ Wyróżniamy w obwodzie jeden z węzłów zwany węzłem masy. Dla wszystkich pozostałych węzłów zapisujemy równania pierwszego prawa Kirchhoffa.
- ☐ Korzystając z równań opisujących elementy zawarte w gałęziach obwodu eliminujemy z równań pierwszego prawa Kirchhoffa prądy gałęziowe.
- ☐ Z tak otrzymanych równań, korzystając z drugiego prawa Kirchhoffa, eliminujemy napięcia gałęziowe przez potencjały węzłowe.



Rys.2. Przykładowy obwód analizowany metodą potencjałów węzłowych.

Wykonanie ostatniego kroku jest możliwe tylko wtedy, gdy graf analizowanego obwodu jest spójny. Stąd program PSpice narzuca ograniczenie:

dla każdego węzła obwodu musi istnieć stałoprądowa ścieżka, która łączy dany węzeł z węzłem masy (patrz strona 5).

Stosując metodę potencjałów węzłowych do obwodu o w węzłach otrzymuje się układ $w-1$ równań liniowych z $w-1$ niewiadomymi, którymi są potencjały węzłowe obwodu. Rozwiązanie tego układu znajduje się zwykle jedną ze standardowych metod. W przypadku programu PSpice jest to rozkład LU [28].

Przykład:

Rozważmy obwód przedstawiony na Rys. 2. Jeden z węzłów tego obwodu został wyróżniony jako węzeł masy. Pozostałe dwa otrzymały numery 1 i 2. W pierwszym kroku zapisujemy równania pierwszego prawa Kirchhoffa odpowiednio dla węzła 1 i węzła 2.

$$\begin{cases} I_1 + I_2 + I_4 = 0 \\ I_2 - I_3 + I_5 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Po uwzględnieniu równań opisujących poszczególne elementy otrzymujemy:

$$\begin{cases} U_1/R_1 + U_2/R_2 + I_4 = 0 \\ U_2/R_2 - U_3/R_3 + Gt \cdot U_4 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Napięcia gałęziowe eliminujemy za pomocą potencjałów węzłów 1 i 2.

$$\begin{cases} V(1)/R_1 + [V(1)-V(2)]/R_2 = -I_4 \\ [V(1)-V(2)]/R_2 - V(2)/R_3 + Gt \cdot V(1) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Równania (6) uporządkowane i przepisane w postaci macierzowej mają postać:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_2} \\ -\frac{1}{R_2} - Gt & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V(1) \\ V(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_4 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Lub krótko:

$$\mathbf{Y} \times \underline{V} = \underline{J} \quad (8)$$

Macierz kwadratowa \mathbf{Y} występująca po lewej stronie równania (8) nazywana jest macierzą admitancyjną układu. Wektor kolumnowy \underline{V} złożony jest z potencjałów kolejnych węzłów obwodu. Wektor kolumnowy \underline{J} występujący po prawej stronie równania (7) nazywany jest wektorem wymuszeń. Macierz admitancyjna obwodu oraz wektor wymuszeń są tworzone przez program PSpice w trakcie przetwarzania opisu obwodu.

Algorytm tworzenia macierzy admitancyjnej \mathbf{Y} obwodu:

- Na początku wszystkie elementy macierzy admitancyjnej \mathbf{Y} układu są równe zero.

- Jeżeli w strukturze obwodu pojawi się deklaracja opornika:

$R_nazwa\ n+\ n-\ R$

to liczbę $1/R$ dodaje się do:

- elementu macierzy admitancyjnej, leżącego na przecięciu wiersza i kolumny odpowiadających węzłowi o numerze $n+$;
- elementu leżącego na przecięciu wiersza i kolumny odpowiadających węzłowi $n-$. Liczbę równą $-1/R$ dodaje się do:
- elementu leżącego na przecięciu wiersza odpowiadającego węzłowi $n+$ i kolumny odpowiadającej węzłowi $n-$;
- elementu leżącego na przecięciu wiersza odpowiadającego węzłowi $n-$ i kolumny odpowiadającej węzłowi $n+$ (patrz Rys. 3).

Jasne jest teraz dlaczego niedopuszczalne jest stosowanie oporników o wartości oporności równej zero (strona 5). Przewodność $1/R$ takiego opornika jest nieskończona.

- Jeżeli w strukturze obwodu pojawi się deklaracja źródła prądu sterowanego napięciem w postaci:

$G_nazwa\ n+\ n-\ nc+\ nc-\ Gt$

to liczbę Gt dodaje się do:

- elementu macierzy admitancyjnej leżącego na przecięciu kolumny odpowiadającej węzłowi $n+$ i wiersza odpowiadającego węzłowi $nc+$;
- elementu leżącego na przecięciu kolumny odpowiadającej węzłowi $n-$ i wiersza odpowiadającego węzłowi $nc-$. Liczbę $(-1) \cdot Gt$ dodaje się do:
- elementu leżącego na przecięciu kolumny odpowiadającej węzłowi $n-$ i wiersza odpowiadającego węzłowi $nc+$;
- elementu leżącego na przecięciu kolumny odpowiadającej węzłowi $n+$ i wiersza odpowiadającego węzłowi $nc-$ (Rys. 4).

Algorytm tworzenia wektora wymuszeń \mathbf{J} :

- Na początku wszystkie elementy \mathbf{J} układu są równe zero.

$\mathbf{Y} := \mathbf{Y} +$

	$n+$	$n-$	
	$1/R$	$-1/R$	$n+$
	$-1/R$	$1/R$	$n-$

Rys.3. Modyfikacja wprowadzana do macierzy admitancyjnej obwodu po odczytaniu deklaracji opornika o wartości R .

$\mathbf{Y} := \mathbf{Y} +$

	$n+$	$n-$	
	Gt	$-Gt$	$nc+$
	$-Gt$	Gt	$nc-$

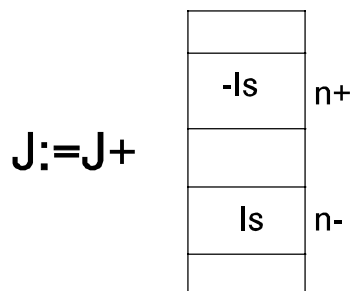
Rys.4. Modyfikacja wprowadzana do macierzy admitancyjnej po natrafieniu na deklarację sterowanej SPM o transkonduktancji Gt .

- Jeżeli w opisie obwodu pojawi się deklaracja niezależnego źródła prądu w postaci:

$$I_nazwa\ n+\ n-\ I_s$$

to:

- do elementu leżącego w wierszu odpowiadającym węzłowi $n+$ dodawana jest liczba równa $(-1) \cdot I_s$;
- do elementu leżącego w wierszu odpowiadającym węzłowi $n-$ dodaje się liczbę równą I_s (Rys. 5).



Rys.5. Modyfikacja wektora wymuszeń wprowadzana po zidentyfikowaniu deklaracji SPM o wydajności I_s .

Zalety metody potencjałów węzłowych, w stosunku do innych metod tworzenia równań obwodu, polegają na tym, że:

- Równania obwodu można *łatwo* tworzyć przeglądając kolejno linie danych zawierające deklaracje elementów.
- Macierz admitancyjna układu posiada na swojej przekątnej elementy różne od zera. Element leżący na przekątnej jest zwykle największym, co do wartości bezwzględnej, elementem w wierszu. Upraszcza to i przyspiesza działanie algorytmu rozwiązującego równania obwodu.
- Dla dużego obwodu macierz potencjałów węzłowych jest macierzą rzadką i można stosować metody numeryczne opracowane specjalnie dla tego typu macierzy.

Metoda ta posiada także pewne wady, a mianowicie:

- Nie pozwala na analizę obwodu, który zawiera źródło prądu sterowane prądem lub sterowane źródło napięcia⁸.
- Nie pozwala na analizę obwodu, w którego węzły połączone są za pomocą niezależnego źródła napięcia⁹. W szczególności niedozwolone są zwarcia między węzłami (SEM o wartości 0V).
- Obliczenie dowolnego prądu w obwodzie wymaga wykonania dodatkowych obliczeń ponieważ metoda dostarcza tylko potencjałów węzłowych.

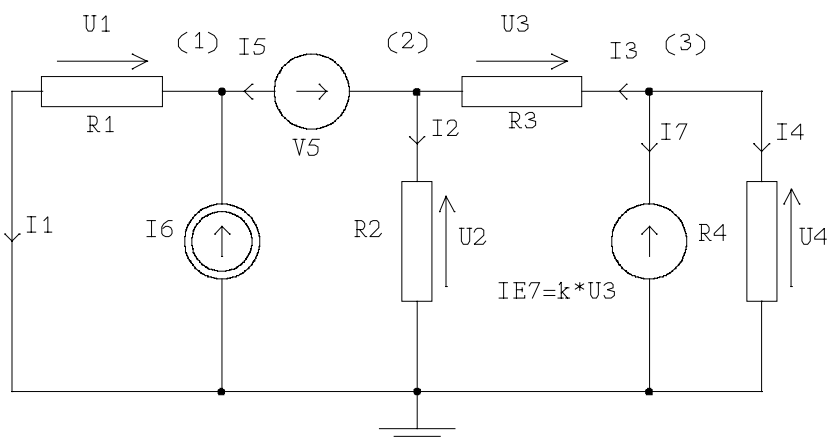
Usunięcie wymienionych niedogodności związane jest z modyfikacją metody tworzenia równań obwodu co prowadzi do tzw. zmodyfikowanej metody potencjałów węzłowych.

⁸Każdy obwód można przekształcić w ten sposób aby zawierał tylko źródła prądu sterowane napięciem. Metoda ta nie jest jednak wykorzystywana przez program PSpice.

⁹SEM połączona szeregowo z opornikiem może zostać przekształcona na podstawie twierdzenia Norton-a na SPM połączoną równolegle z opornikiem [17]. Dlatego obwody zawierające takie połączenia mogą być analizowane metodą potencjałów węzłowych.

1.6.2. Zmodyfikowana metoda potencjałów węzłowych

Sposób postępowania przy tworzeniu równań obwodu, w przypadku zmodyfikowanej metody potencjałów węzłowych, jest zbliżony do tego, który stosowany jest w metodzie oryginalnej. Zilustrujemy go przykładem.



Rys.6. Obwód analizowany zmodyfikowaną metodą potencjałów węzłowych.

Przykład:

Rozważmy obwód przedstawiony na Rys. 6. Zawiera on w swojej strukturze SEM oraz źródło napięcia sterowane napięciem. Równania pierwszego prawa Kirchhoffa zapisane dla kolejnych węzłów obwodu przyjmują postać:

$$\begin{cases} I_1 - I_5 - I_6 = 0 \\ I_2 - I_3 + I_5 = 0 \\ I_3 + I_4 + I_7 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Podstawiamy do nich równania elementów:

$$\begin{cases} U_1/R_1 - I_5 - I_6 = 0 \\ U_2/R_2 - U_3/R_3 + I_5 = 0 \\ U_3/R_3 + U_4/R_4 + I_7 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Napięcia zastępujemy potencjałami węzłowymi i porządkujemy:

$$\begin{cases} V(1)/R_1 - I_5 = I_6 \\ V(2) \cdot (1/R_2 + 1/R_3) - V(3)/R_3 + I_5 = 0 \\ -V(2) \cdot R_3 + V(3) \cdot (1/R_3 + 1/R_4) + I_7 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

W ten sposób otrzymujemy trzy równania z pięcioma niewiadomymi. Dodatkowe zmienne to prąd płynący przez niezależne źródło napięcia I_5 oraz prąd płynący przez źródło sterowane I_7 . Układ równań (11) uzupełniamy o równania opisujące niezależne źródło napięcia oraz źródło sterowane. Napięcia zostały już zastąpione różnicami potencjałów węzłowych.

$$\begin{cases} -V(1) + V(2) = V5 \\ V(3) = k \cdot V(3) - k \cdot V(2) \end{cases} \quad (12)$$

Równania (11) i (12) opisują w pełni stan układu. Ich postać macierzowa jest następująca:

$$\begin{bmatrix} 1/R_1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1/R_2 + 1/R_3 & -1/R_3 & 1 & 0 \\ 0 & -1/R_3 & 1/R_3 + 1/R_4 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k & 1-k & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V(1) \\ V(2) \\ V(3) \\ I_5 \\ I_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I6 \\ 0 \\ 0 \\ V5 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Lub krótko:

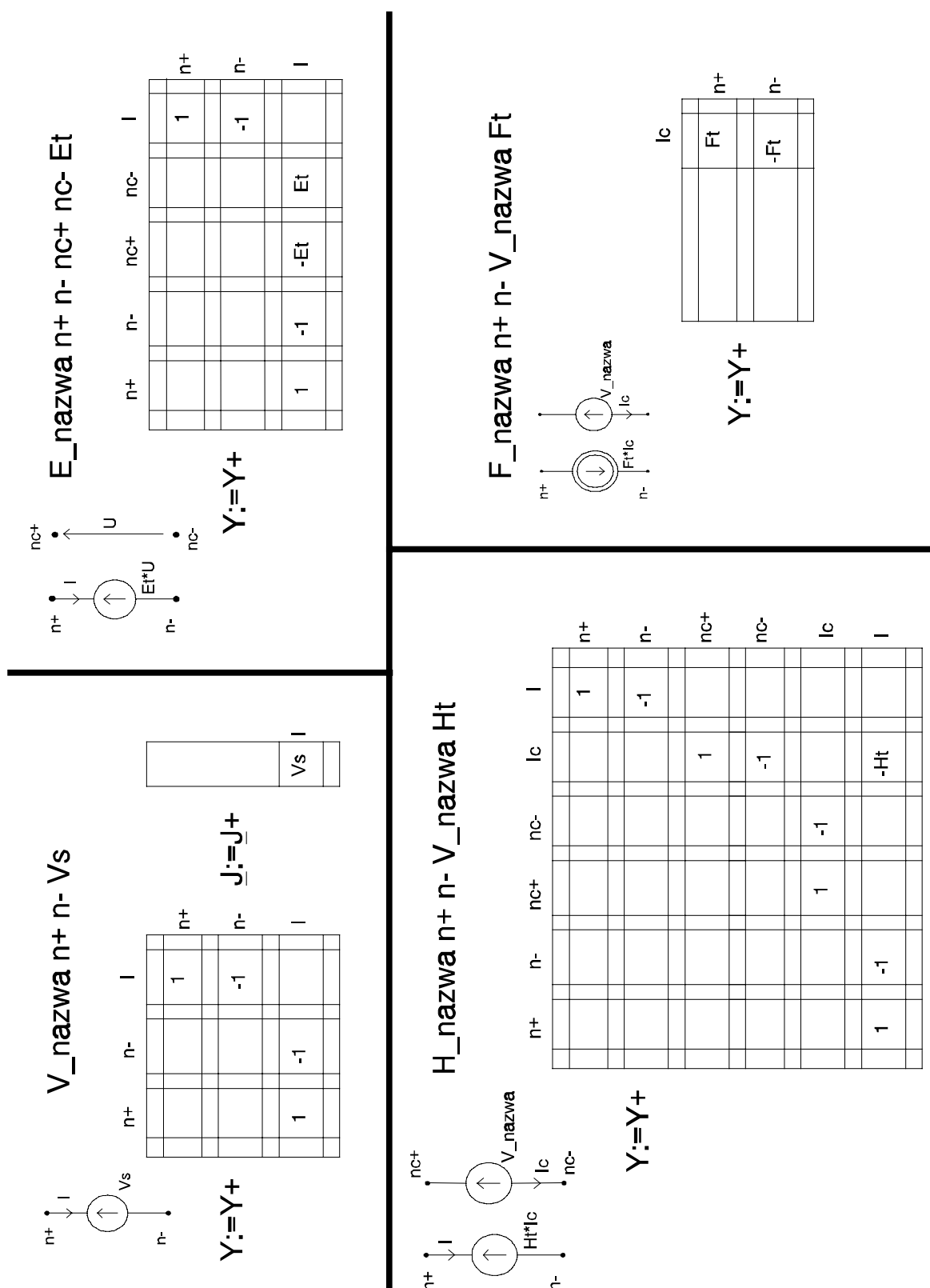
$$Y_{\text{mod}} \times \underline{V}' = \underline{J}'$$

Macierz kwadratowa Y_{mod} to zmodyfikowana macierz admitancyjna układu elektronicznego z Rys. 6. Wektor kolumnowy \underline{V}' to uogólniony wektor potencjałów węzłowych. Oprócz potencjałów węzłowych tworzą go także prądy płynące przez źródła napięcia (tak niezależne jak i sterowane). Wektor \underline{J}' to uogólniony wektor wymuszeń.

Zmiennymi opisującymi stan układu oprócz potencjałów węzłowych stały się prądy płynące przez źródła napięcia. Dzięki temu równania można zapisać także dla obwodu, który zawiera źródło sterowane prądem. Wystarczy aby prąd sterujący płynął przez niezależne źródło napięcia (strona 10). W strukturę obwodu zawsze można wpiąć SEM o wartości 0 (zwarcie) aby prąd sterujący płynął przez to źródło. A zatem stosując zmodyfikowaną metodę potencjałów węzłowych można analizować obwody, które zawierają wszystkie cztery typy źródeł sterowanych. Sposób dołączania parametrów źródła (napięcia, prądu) sterowanego prądem, źródła napięcia sterowanego napięciem oraz niezależnego źródła napięcia do zmodyfikowanej macierzy admitancyjnej i zmodyfikowanego wektora wymuszeń podsumowuje Rys. 7.

Zalety zmodyfikowanej metody potencjałów węzłowych można podsumować następująco:

- ☐ Równania obwodu można utworzyć przetwarzając kolejno deklaracje elementów. Niepotrzebne są przekształcenia obwodu.
- ☐ Można analizować obwody zawierające wszystkie typy źródeł niezależnych i sterowanych.
- ☐ Elementy przekątnej głównej, zmodyfikowanej macierzy admitancyjnej Y_{mod} , w większości wypadków są niezerowe i są elementami dominującymi co ma istotny wpływ na skrócenie czasu potrzebnego na rozwiązanie równań obwodu.



Rys.7. Sposób w jaki zmodyfikowana metoda potencjałów węzłowych uwzględnia w równaniach obwodu elementy niedopuszczalne w przypadku metody oryginalnej.