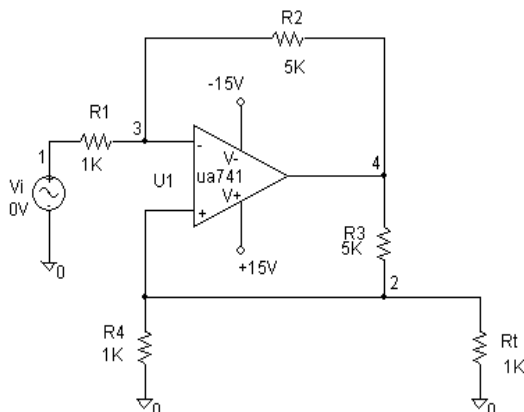


# Демонстратор: Анализ на преобразувател на напрежение в ток

## 1. Цел



фигура 1. Принципна схема

схемата чрез компютърни симулации с **PSpice**.

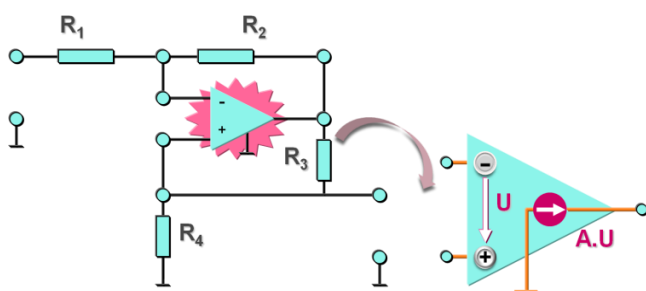
Този демонстратор има за цел да илюстрира приложението на метода на възловите напрежения за анализ на схемата от Фиг.1 и всички необходими действия при подготовката и извършването на компютърните симулации с **PSpice**.

Основните цели на изследването са две:

1. Определяне в общ вид на условието, при което схемата реализира източник на ток, т.е. условието при което изходният ток не зависи от товара.

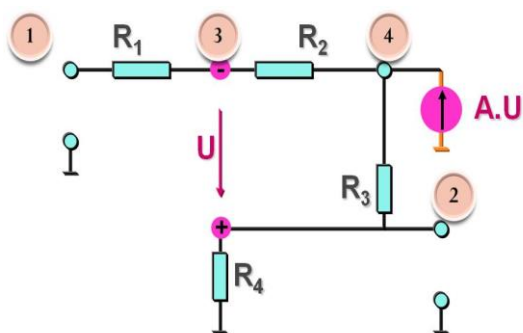
2. Анализ на работните характеристики на

## 2. Анализ на схемата по метода на възловите напрежения

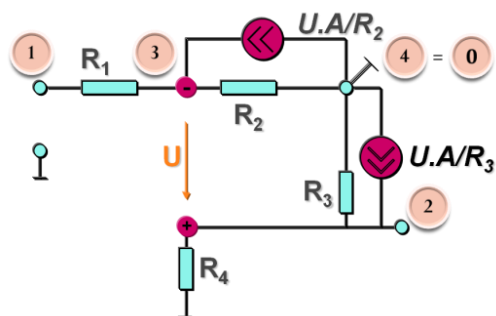


фигура 2

Прилагаме практическите правила за анализ на схемата (фиг. 1) в общ вид по метода с възловите напрежения, при което се извършва следното: Операционният усилвател се замества с идеален източник на напрежение управляван от напрежение (Фиг.2), при което се получава еквивалентната схема от фиг. 3.



фигура 3. Еквивалентна схема



фигура 4. Преобразувана еквивалентна схема

За целите на възловия анализ еквивалентната схема от фиг. 3 се преобразува във вида от фиг. 4, където идеалният източник на напрежение управляван от напрежение  $U.A$  е прехвърлен зад възел 4 и еквивалентно трансформиран в два източника на ток управлявани от напрежение  $U.A/R_2$  и  $U.A/R_3$ .

Съставя се матрицата на проводимостите за схемата от фиг. 4 по метода с

възловите напрежения:  $[Y] =$

	1	2	3
1	$1/R_1$		$-1/R_1$
2		$1/R_3+1/R_4 -A/R_3$	$+A/R_3$
3	$-1/R_1$	$-A/R_2$	$1/R_1+1/R_2 +A/R_2$



Проводимостта на правото предаване  $Y_{21}$ , която свързва тока в изхода на схемата  $I(R_t)$  с входното управляващо напрежение  $U_{in}$ , може да определим от схемната матрица  $[Y]$ .

- По дефиниция, проводимостта на правото предаване при включен товар  $R_t$  в изхода е  $Y_{21} = \frac{I_{out}}{U_{in}} = \frac{I(R_t)}{V_{in}}$ ;
- умножаваме с  $U_{out}$  числителя и знаменателя на  $Y_{21} = \frac{I_{out}}{U_{in}} \cdot \frac{U_{out}}{U_{out}}$ ;
- комбинираме съответните величини:  $Y_{21} = \frac{I_{out}}{U_{in}} \cdot \frac{U_{out}}{U_{out}} = \frac{U_{out}}{U_{in}} \cdot \frac{I_{out}}{U_{out}} = K_u \cdot \frac{I_{out}}{U_{out}}$ ;
- заместваме  $I_{out} = -Y_t \cdot U_{out}$ :  $Y_{21} = K_u \cdot \frac{I_{out}}{U_{out}} = K_u \cdot \frac{-Y_t \cdot U_{out}}{U_{out}}$ ;
- извършваме съкращения на еднаквите величини и заместваме  $K_u = \frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{aa} + \Delta_{aa}, bb \cdot Y_t}$ , при което получаваме:  

$$Y_{21} = K_u \cdot \frac{-Y_t \cdot U_{out}}{U_{out}} = -Y_t \cdot K_u = -Y_t \cdot \frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{aa} + \Delta_{aa}, bb \cdot Y_t} = -Y_t \cdot \frac{\Delta_{12}}{\Delta_{11} + \Delta_{11,22} \cdot Y_t}$$

За проводимостта на правото предаване  $Y_{21}$ , която свързва тока в изхода на схемата  $I(R_t)$  с входното управляващо напрежение  $V_i$ , след определяне на адюнгираните количества на  $[Y]$  и заместване следва:

$$Y_{21} = \frac{I(R_t)}{V_i} = -Y_t \cdot \frac{\Delta_{12}}{\Delta_{11} + \Delta_{11,22} \cdot Y_t} = -\frac{\frac{1}{R_t}}{\frac{R_1 \cdot R_3}{R_2 \cdot R_4} - 1 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2} \cdot \frac{1}{R_t}}, \text{ при } A \rightarrow \infty.$$

Анализът на получения израз за правата проходна проводимост (стръмността)  $Y_{21}$  на схемата, се прави със стремеж да бъде елиминирано товарното съпротивление  $R_t$ , т.е. да определим условието, при което  $R_t$  може да бъде съкратено от числителя и знаменателя.

Това може да стане при  $\frac{R_1 \cdot R_3}{R_2 \cdot R_4} - 1 = 0$ , от където следва условието:  $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$ .

Тогава за правата проходна проводимост на схемата следва:  $Y_{21} = \frac{I(R_t)}{V_i} = \frac{R_2}{R_1 \cdot R_3}$ ,

или все едно, токът в изхода няма да зависи от товара  $R_t$ :  $I(R_t) = \frac{R_2}{R_1 \cdot R_3} V_i$

Очевидно, за схемата от фиг. 1 е изпълнено изведеното условие, тъй като  $R_1=1K$ ,  $R_3=5K$ ,  $R_2=5K$  и  $R_4=1K$ . Тогава за проводимостта на правото предаване (стръмността) на схемата се получава  $Y_{21} = 1 \cdot 10^{-3} S = 1 \text{ ma/V}$ .

### 3. Симулации на схемата с PSpice

След така направения предварителен анализ на схемата в общ вид можем да преминем към определяне на работната област на генератора на ток с помощта на числени симулации.

За целта със симулатора **PSpice** и графичния постпроцесор **Probe** ще извършим постояннотокови анализи, при които може да се изследва областта, в която предавателната характеристика (зависимостта между изходния ток  $I(R_t)$  и управляващото входно напрежение  $V_i$ ) запазва линейния си характер при дадено товарно съпротивление, в случая  $R_t=1K$ . Разбира се, най-забележителното свойство на тази схема е, че и за други стойности на товарното съпротивление ще се получи пълно съвпадение на набора от линейни характеристики, но с увеличаване на  $R_t$  ще се ограничава линейната работна област.

За да изследвате преобразувателя **УЛ** в постояннотокова област, са необходими следните процедури:

#### 1. Отваряне на схемния файл на преобразувателя УЛ

1.1. От меню *File* изберете команда *Open*

1.2. Изберете файла, който е създаден в средата на *Schematics* или въведете името му.

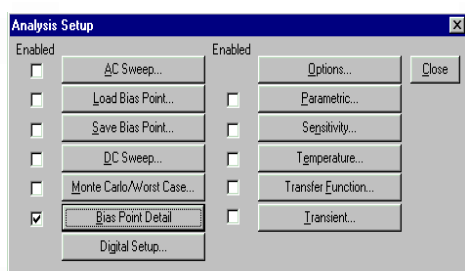
#### 2. Задаване на анализа за изчисляване на подробна информация за работната точка

2.1. За целите на този анализ първо трябва да специфицирате подходящ постояннотоков (*DC*) стимул:

- Кликнете два пъти бързо върху източника на входно напрежение  $V_i$
- В диалоговото меню на *Stimulus Attributes* изберете *DC* и въведете стойност **0V**
- Натиснете *Enter* или бутон от менюто *Save Attr*
- Натиснете *OK*.

2.2. За да зададете изчисляване на подробна информация за работната точка:

– От меню *Analysis* изберете *Setup*



фигура 5

– В менюто *Analysis Setup* изберете кутийката за **Enabled** пред бутон *Bias Point detail* (фиг. 5)

– Натиснете *Close*.

2.3. За да стартирате симулацията, от меню *Analysis* изберете *Simulate*.

2.4. За да анализирате резултатите, визуализирайте изходния текстов файл

(.out) и прочете информацията.

Изходният текстов файл (.out) съдържа списъка с елементите и връзките в схемата (netlist), командите за специфицираните симулации в синтаксиса на PSpice и резултатите от симулациите – подробна информация за работната точка. Той има следната структура:

➤ Списък с елементите и връзките в схемата на преобразувателя U/I

\* Schematics Netlist \*

```
X_U1 2 3 +15V -15V 4 uA741
R_R2 4 3 5K
R_R3 2 4 5K
R_R1 3 1 1K
R_R4 0 2 1K
V_V- 0 -15V 15V
V_V+ +15V 0 15V
V_Vi 1 0 DC 0V AC 0V 0
R_Rt 0 2 1K
```

➤ Команди на PSpice

\*\* Analysis setup \*\*

```
.OP
.LIB "nom.lib"
.END
```

➤ Резултати от симулацията

\*\*\*\* SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION (установена работна точка по постоянен ток) TEMPERATURE  
= 27.000 DEG C  
(Възлови напрежения)

NODE	VOLTA GE	NODE	VOLTA GE	NODE	VOLTA GE	NODE	VOLTA GE
(1)	0.0000	(2)	23.14E-06	(3)	42.38E-06	(4)	653.1E-06
(+15V)	15.0000	(-15V)	-15.0000	(X_U1.6)	-65.36E-09	(X_U1.7)	665.5E-06
(X_U1.8)	665.5E-06	(X_U1.9)	0.0000	(X_U1.10)	-.6076	(X_U1.11)	14.9600
(X_U1.12)	14.9600	(X_U1.13)	-.5938	(X_U1.14)	-.5938	(X_U1.53)	14.0000
(X_U1.54)	-14.0000	(X_U1.90)	248.1E-06	(X_U1.91)	40.0000	(X_U1.92)	-40.0000
(X_U1.99)	0.0000						

\*\*\* VOLTAGE SOURCE CURRENTS (токове през източниците на напрежение)

NAME	CURRENT
V_V-	-1.667E-03
V_V+	-1.667E-03
V_Vi	4.238E-08
X_U1.vb	-6.536E-13
X_U1.vc	1.400E-11
X_U1.ve	1.455E-11
X_U1.vlim	2.481E-07
X_U1.vlp	-4.000E-11
X_U1.vln	-4.000E-11

\*\*\*\*TOTAL POWER DISSIPATION (пълна разсейвана мощност) 5.00E-02 WATTS

\*\*\*\*OPERATING POINT INFORMATION (информация за работния режим)

TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\* VOLTAGE-CONTROLLED CURRENT SOURCES (източници на ток управлявани от напрежение)

NAME X\_U1.ga X\_U1.gcm  
I-SOURCE -3.621E-09 -3.622E-09

\*\*\*\* VOLTAGE-CONTROLLED VOLTAGE SOURCES (източници на напрежение управлявани от напрежение)

NAME X\_U1.egnd  
V-SOURCE 0.000E+00  
I-SOURCE -2.937E-07

\*\*\*\* CURRENT-CONTROLLED CURRENT SOURCES (източници на ток управлявани от ток)

NAME X\_U1.fb  
I-SOURCE -5.390E-06

\*\*\*\* CURRENT-CONTROLLED VOLTAGE SOURCES (източници на напрежение управлявани от ток)

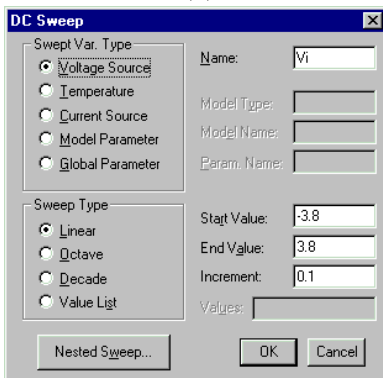
NAME X\_U1.hlim  
V-SOURCE 2.481E-04  
I-SOURCE -4.963E-16

\*\*\*\* BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS (биполярни транзистори – постояннотоков режим и малосигнални параметри)

NAME MODEL	X_U1.q1 X_U1.qx	X_U1.q2 X_U1.qx
IB	7.98E-08	7.97E-08
IC	7.48E-06	7.48E-06
VBE	5.94E-01	5.94E-01
VBC	-1.50E+01	-1.50E+01
VCE	1.56E+01	1.56E+01
BETADC	9.38E+01	9.38E+01
GM	2.89E-04	2.89E-04
RPI	3.24E+05	3.24E+05
RX	0.00E+00	0.00E+00
RO	1.00E+12	1.00E+12
CBE	0.00E+00	0.00E+00
CBC	0.00E+00	0.00E+00
CJS	0.00E+00	0.00E+00
BETAAC	9.38E+01	9.38E+01
CBX	0.00E+00	0.00E+00
FT	4.60E+15	4.60E+15

### 3. Постояннотоков анализ (DC Sweep)

3.1. Изследването на областта, в която предавателната характеристика



фигура 6

$I(R_t)/V_i$  запазва линейния си характер при дадено товарно съпротивление (в случая  $R_t=1K$ ) най-добре може да се направи с помощта на постояннотокова развивка по отношение на входния източник на напрежение  $V_i$ . За целта първоначално е необходимо да дефинирате параметрите на развивката:

- От меню *Analysis* изберете *Setup*
- В диалоговия прозорец на *Analysis Setup* натиснете бутон *DC Sweep*
- В диалоговия прозорец на *DC Sweep* въведете

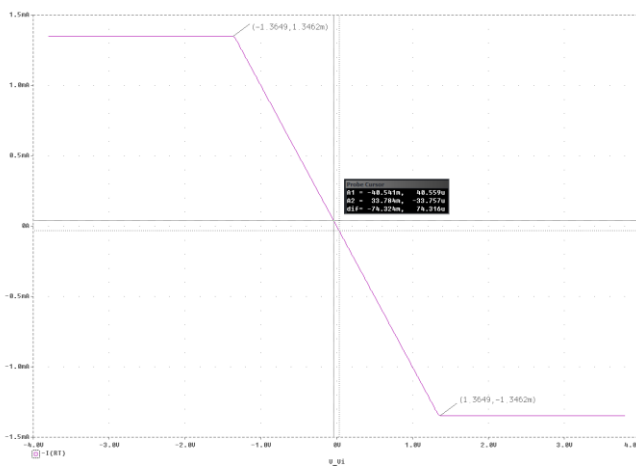
информацията, както е показано на фигурата (фиг. 6). Тя означава, че развивката е спрямо независимия източник на напрежение с име  $V_i$ ; изменението на променливата е линейно: например от  $-3.8V$  до  $+3.8V$  със стъпка  $0.1V$  (единиците за  $V$  са подразбираеми)

- Натиснете *OK*
- В менюто *Analysis Setup* изберете кутийката за *Enabled* пред бутон *DC Sweep*
- Натиснете *Close*.
- За да стартирате симулацията, от меню *Analysis* изберете *Simulate*.

### 3.2. Визуализиране на резултатите

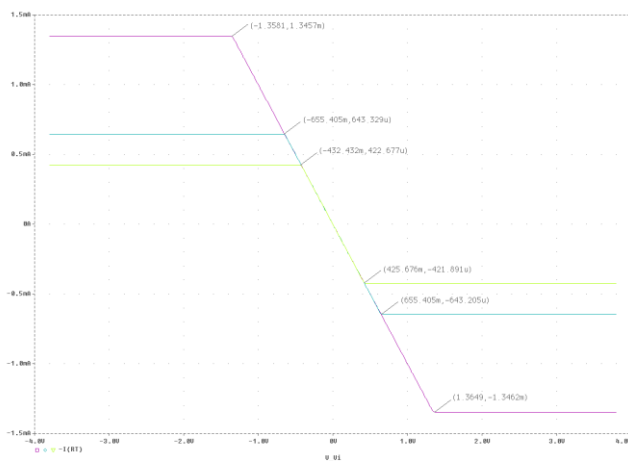
Резултатите от анализа са записани във файл за графичния постпроцесор *Probe*. Той се стартира веднага след успешното завършване на симулациите, но ако тази опция не е зададена, можете да го извикате от *Analysis-Run Probe*. За проектираната схема на преобразувателя напрежение-ток е необходимо да анализирате изходния ток през товарния резистор. За тази цел:

- Поставете маркер, който ще осигури автоматично с отварянето на *Probe*, построяване на зададената графика



фигура 1

че при други стойности на  $R_t$ , например  $3k\Omega$  и  $5k\Omega$ , работната област, в която



- За да намерите минималната и максималната стойност на изведената графика, можете да използвате курсорите.

- От меню *Tools-Cursor* изберете *Display*
- От меню *Tools-Cursor* изберете *MAX (MIN)* съответно).

За да оцените влиянието на  $R_t$  върху работната област на схемата, можете да използвате параметричен анализ с параметър  $R_t$ . В *Probe* ще видите,

характеристиките  $I(R_t)=f(V_i)$

съвпадат се стеснява, както е показано на фигурата. За целта:

- Дефинирайте име на параметъра (стойността на резистора  $R_t$ ) -  $\{Rvar\}$

- разположете елемента **PARAMETERS** и дефинирайте неговите атрибути (**NAME1** -  $Rvar$ , **VALUE1** -  $1k$ )

- От меню *Setup-Analysis* изберете *Parametric*

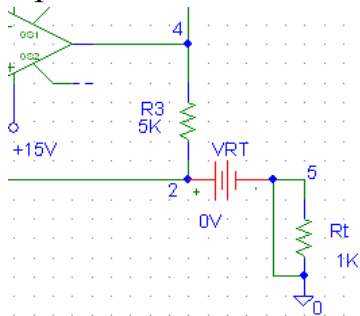
- В диалоговия прозорец на *Parametric* въведете развивката да е спрямо

глобалния параметър  $R_{var}$ , а изменението на променливата да се осъществява от списък със стойности - **1k**, **3k** и **5k**

– Натиснете *OK*

#### 4. Задаване на анализа на малосигналната предавателната функция (*Small Signal Transfer Function*)

С този анализ можете да изследвате схемата като четириполусник и да определите стойностите на:



- ◆ проводимостта на правото предаване  $Y_{21}$
- ◆ входното съпротивление
- ◆ изходното съпротивление.

4.1. За да зададете този анализ, трябва да изпълните следната последователност от стъпки:

- Свържете изхода на схемата към земя и разположете последователно в изхода независим източник на напрежение **VRT** със стойност  $DC=0V$ . Това не променя електрическото състояние, но подготвя схемата за анализа, тъй като **изходният ток може да се специфицира единствено като ток през независим източник на напрежение.**

- Дефинирайте подходящ стимул (единично възбуждане на входа)
- Кликнете два пъти бързо върху източника на входно напрежение **Vi**
- В диалоговото меню на *Stimulus Attributes* изберете *DC* и въведете стойност **1V**
- Натиснете **Enter** или бутон от менюто *Save Attr*
- Натиснете *OK*.
- От меню *Setup-Analysis* изберете *Transfer Function*
- Въведете името на входния източник **Vi** и изходната променлива **I(VRT)**
- Натиснете *OK*.

4.2. Стартирайте симулацията

4.3. Анализирайте резултатите

Резултатите от симулацията са записани в изходния текстов файл, който има следната структура:

➤ Списък с елементите и връзките в схемата

\*\* Schematics Netlist \*

```

R_R2  4 3 5K
R_R1  3 1 1K
V_V-  0 -15V 15V
V_V+  +15V 0 15V
R_R4  0 2 1K
R_R3  2 4 5K
X_U1  2 3 +15V -15V 4 uA741
V_Vi  1 0 DC 0V AC 0V 0
V_VRT 2 0 0V
R_RT  0 0 1k
    
```

➤ Команди в синтаксиса на PSpice за симулациите

**\*\* Analysis setup \*\***

```
.TF I(V_VRT) V_Vi  
.LIB „nom.lib“  
.END
```

➤ Резултати от симулациите

**\*\*\*\* SMALL SIGNAL TRANSFER FUNCTION \*\*\*\***

**I(V\_VRT)/V\_Vi = -1.000E-03** (стойност на Y21 ,т.е. отношението между изходния ток I(V\_VRT) и управляващото входно напрежение V\_Vi)

**INPUT RESISTANCE AT V\_Vi = 1.000E+03** (стойност на входното съпротивление)

**OUTPUT RESISTANCE AT I(V\_VRT) = 1.314E+07** (стойност на изходното съпротивление)

## 5. Задаване на анализа на чувствителност

С този анализ можете да установите какво е влиянието на отклонението на параметрите на елементите в схемата на преобразувателя на напрежение в ток върху **изходния ток**.

5.1. За да зададете този анализ трябва първо да подготвите принципната схема:

- Свържете изхода на схемата към земя и разположете независим източник на напрежение **VRT** със стойност  $DC=0V$ . Това не променя електрическото състояние на схемата, **но е необходимо за дефиниране на изходния ток като ток през независим източник на напрежение**.

5.2. За да изпълните анализа на чувствителност, трябва да дефинирате подходящ стимул (единично възбуждане на входа):

- Кликнете два пъти бързо върху източника на входно напрежение **Vi**
- В диалоговото меню на *Stimulus Attributes* изберете *DC* и въведете стойност **1V**
- Натиснете **Enter** или бутон от менюто *Save Attr*
- Натиснете **OK**.

5.3. За да зададете анализа:

- От меню *Analysis* изберете *Setup*
- В диалоговия прозорец на *Analysis Setup* натиснете бутон *DC Sensitivity*
- Въведете информацията за изходната променлива **I(VRT)**
- Натиснете **OK**.

5.4. Стартирайте симулацията

5.5. Визуализиране на резултатите

Резултатите от анализа са записани в изходния текстов файл, който има следната структура:

➤ Списък с елементите и връзките в схемата

**\*\* Schematics Netlist \***

```
R_R2 4 3 5K  
R_R1 3 1 1K  
V_V- 0 -15V 15V  
V_V+ +15V 0 15V
```



```

R_R4 0 2 1K
R_R3 2 4 5K
X_U1 2 3 +15V -15V 4 uA741
V_VRT 2 5 0V
R_Rt 0 5 1k
V_Vi 1 0 DC 1V AC 0V 0

```

➤ Команди в синтаксиса на PSpice за симулациите

\*\* Analysis setup \*\*

```

.SENS I(V_VRT)
.LIB "nom.lib"
.END

```

➤ Резултати от симулациите

Коефициенти и полунормирана функция на постояннотоковата чувствителност на изходния ток

\*\*\* DC SENSITIVITIES OF OUTPUT I(V\_VRT)

ELEMENT NAME	ELEMENT VALUE	ELEMENT SENSITIVITY (AMPS/UNIT)	NORMALIZED SENSITIVITY (AMPS/PERCENT)
R_R2	5.000E+03	-2.000E-07	-9.998E-06
R_R1	1.000E+03	9.999E-07	9.999E-06
R_R4	1.000E+03	0.000E+00	0.000E+00
R_R3	5.000E+03	2.000E-07	9.999E-06
R_RT	1.000E+03	0.000E+00	0.000E+00
X_U1.r2	1.000E+05	6.386E-20	6.386E-17
X_U1.rc1	5.305E+03	-9.009E-09	-4.779E-07
X_U1.rc2	5.305E+03	8.998E-09	4.774E-07
X_U1.re1	1.836E+03	9.073E-09	1.666E-07
X_U1.re2	1.836E+03	-9.063E-09	-1.664E-07
X_U1.ree	1.319E+07	-7.918E-18	-1.044E-12
X_U1.ro1	5.000E+01	1.204E-11	6.020E-12
X_U1.ro2	1.000E+02	-3.070E-10	-3.070E-10
X_U1.rp	1.816E+04	0.000E+00	0.000E+00
V_V-	1.500E+01	-2.214E-08	-3.320E-09
V_V+	1.500E+01	2.214E-08	3.320E-09
V_VRT	0.000E+00	-7.621E-08	0.000E+00
V_Vi	1.000E+00	-1.000E-03	-1.000E-05
X_U1.vb	0.000E+00	1.278E-11	0.000E+00
X_U1.vc	1.000E+00	-6.030E-16	-6.030E-18
X_U1.ve	1.000E+00	6.661E-16	6.661E-18
X_U1.vlim	0.000E+00	-6.021E-09	0.000E+00
X_U1.vlp	4.000E+01	6.021E-12	2.408E-12
X_U1.vln	4.000E+01	-6.021E-12	-2.408E-12
X_U1.iee	1.516E-05	-2.267E-03	-3.437E-10
...	...	...	...



**Начертайте, анализирайте и оптимизирайте електронни схеми по ваш избор, за да се уверите, че можете да използвате постояннотокови и параметрични анализи.**