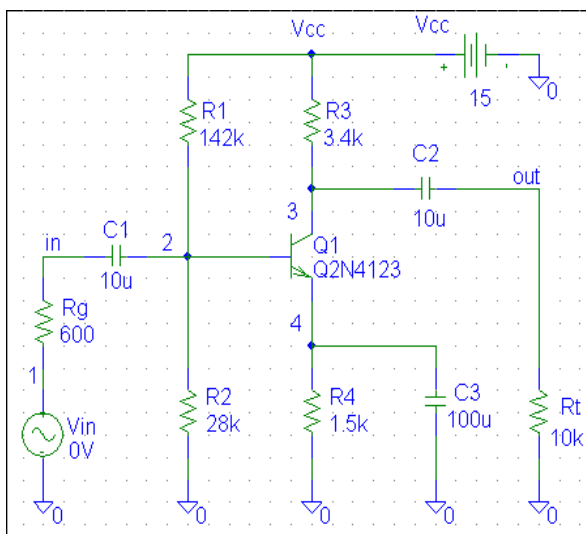


Демонстратор: Честотен анализ на стъпало OE с PSpice

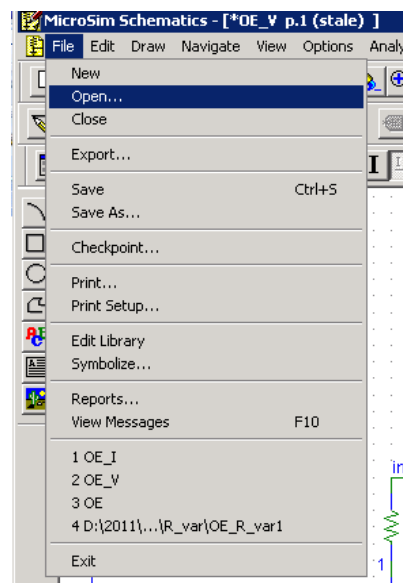
1. Цел

Целта на демонстратора е да ви представи примерна процедура за анализ на честотните характеристики на едностъпален транзисторен усилвател с PSpice (фиг.1). Това ще ви помогне при подготовката и изпълнението както на упражненията по ТЕС, така и при самостоятелната ви работа със студентската версия на OrCAD.

Проследете демонстратора и изпълнете отделните етапи при изследването на честотните характеристики на транзисторния усилвател в схема OE от фиг. 1.



фигура 1



фигура 2

2. Честотен и шумов анализ с PSpice

Променливотоковият (честотният) анализ изчислява реакцията на схемата, линеаризирана около работната точка, при комбинация от входни въздействия с променлива честота. Изчисляването на честотните характеристики се извършва при входни сигнали с достатъчно малка амплитуда, за да се минимизират нелинейните ефекти в схемата. Резултатите от този анализ са стойностите на реалната и имагинерната част (амплитудата и съответните фазови ъгли) на възловите напрежения и токовете през елементите. Анализът винаги започва с определянето на постояннотоковата работна точка. След това схемата се линеаризира около тази работна точка. За всеки електронен елемент PSpice A/D изчислява набор от частни производни в работната точка, които след това се използват при променливотоковия анализ.

Полезните сигнали в електронната апаратура винаги са съпроводени от паразитни сигнали, наречени шум, независимо от техния произход и характер. Когато нивото на този шум стане съизмерим с нивото на полезния сигнал, обработката на сигналите е съпроводено с нежелани ефекти. Така например, когато нивото на собствения шум в нискочестотен усилвател за говор и музика

стане съизмеримо с полезните сигнали вие чувате едновременно с музиката неприятен съскащ звук. Ефектът на шума при телевизионното приемане се изразява с насложен върху картината снеговалеж.

За да преодолеете свързаните с шума проблеми при проектирането на вашите схеми, можете да използвате възможностите на **PSpice** за изчисляване на шумовете, генерирани от електронните компоненти и следващото комбиниране на тези източници на шум в различните предавателни функции в схемата.

❗ Шумовете в схемата зависят от постояннотоковата работна точка и от честотата на сигнала, поради което шумовият анализ се извършва като част от честотния анализ.

За всяка честота от променливотоковия анализ се изчислява шумът, генериран от полупроводниковите елементи, който се разпространява към изходните възли. В изходния възел всички стойности на шума се сумират средноквадратично. Входният източник на променливотоковия анализ определя възела, за който се изчислява еквивалентния входен шум. Той е равен на еквивалентния изходен шум, разделен на коефициента на предаване по напрежение между входния и изходния възел.

3. Визуализиране на файла със схемата

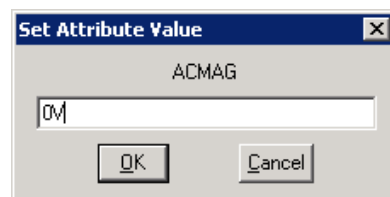
В средата на графичния редактор **Schematics** чрез бутона *Get Open* от менюто *File* (фиг. 2) изберете файла с предварително начертаната схема от фиг. 1.

4. Дефиниране параметрите на входния сигнал

❗ За да извършите честотен анализ на вашата схема, трябва да разположите и свържете един или повече променливотокови независими източници и да зададете съответната спецификация за входното въздействие в общия формат за дефиниране на източниците.



фигура 3



фигура 4



фигура 5

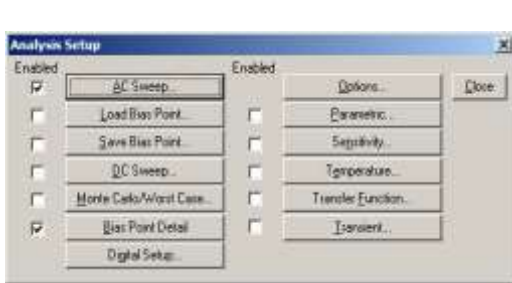
Атрибутите на променливотоковият независим източник на напрежение **VAC** са: име, постояннотокова амплитуда **DC**, променливотокова амплитуда **ACMAG** и променливотокова фаза **ACPHASE**. Присвоете име, например, **Vin** (input - вход), постояннотокова амплитуда равна на нула **DC 0V**, променливотокова амплитуда **ACMAG 10mV** (достатъчно малка амплитуда), а за **ACPHASE** не задавайте стойност (или задайте стойност **0°**), както е показано на фиг. 3, фиг. 4 и фиг. 5.

! За да поставим променливотоков източник **VAC** задължително е да въведем само атрибута **ACMAG** (**DC** и **ACPHASE** се задават или приемат по подразбиране за **0**). Ако сте поставили променливотоков източник **VAC**, може да задавате и извършвате едновременно постояннотоков и честотен анализ.

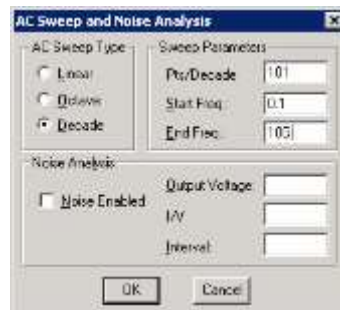
5. Специфициране параметрите на честотните анализи **AC sweep** и **Noise Analysis**

! По принцип **AC Sweep** се използва винаги, когато искаме да построим графика, при която по абсцисната ос се изобразява честота.

За да извършите честотен анализ е необходимо от менюто *Analysis* чрез опцията *Setup* да отворите диалоговия прозорец от фиг. 6 и да изберете **AC Sweep**.



фигура 6



фигура 7



фигура 8

След отваряне на диалоговия прозорец **AC Sweep and Noise Analysis** е необходимо да зададете параметрите на честотния и шумовия анализ (фиг. 7 и фиг. 8). Развивката на честотата задайте, например, чрез начална стойност (**Start value**) **0.1 Hz** (за да можете да отчетете ниската гранична честота на усилвателя) и крайна стойност (**End value**) **10GHz** (за да можете да отчетете високата гранична честота на усилвателя).

! Крайната стойност в случая, ви препоръчваме да избете, например, десет пъти по-голяма от транзитната честота на транзистора **2N4123** $f_t = 311 \text{ MHz}$, а именно - повече от **3,1GHz**. Добре е да зададете края на декадата, в която попада получената стойност (декадата е от **1GHz** до **10GHz**), т.е. задайте **10G**. Това, ще гарантира прегледността на графиката в **Probe**.

! Полученият честотен диапазон е голям, което предполага използването на декаден (**Decade**) мащаб (тип) на развивката (**AC Sweep type**), при което изчисленията е добре да се извършват за не повече от **100** точки в декада (**Pts/Decade**).

! Тъй като шумовият анализ не може да бъде извършен самостоятелно, а само като част от честотния анализ, е добре да се зададат и параметрите на шумовия анализ. Какво трябва да знаем в този случай? При шумов анализ **PSpice A/D** изчислява и отчита следните данни за всяка стойност на честотата,

зададена при дефиниране на честотния анализ:

- Шум, генериран от устройствата (*device noise*), който представлява шумовата съставка, разпространена към даден изход, генерирана от всеки резистор или полупроводников прибор в схемата. При полупроводниковите прибори шумът от устройството се разлага също и на съответните съставки.
- Пълен изходен и еквивалентен входен шум.

Изходният шум (*Output noise*) представлява средно квадратичната сума от шума, генериран от всички източници, разпространен до зададен от потребителя изход. Входният шум (*Input noise*) - е равен на еквивалентния изходен шум, разделен на коефициента на предаване по напрежение между входния и изходния възел.

И така, за изходно напрежение (**Output Voltage:**) задайте напрежението в изходния възел **V(out)**. За входен източник (**I/V**) задайте името на входния източник **Vin**. По този начин, ще се изследва влиянието на всички източници на шум, включени в схемата. Ако зададете интервал (**Interval:**) за изчисление, в изходния файл, ще получите стойностите в текстови вид. В разглеждания случай, интерес представлява само графичният вид на зависимостта, поради което не задавайте интервал.

⚠ Обърнете внимание на това, че изходно напрежение (**Output Voltage:**) се задава със синтаксиса на изходна величина - **V(out)**, а входен източник (**I/V**) – с името на входния източник **Vin**

⚠ Ако не разрешите извършването на шумов анализ (**Noise Enabled** - да бъде разрешен), въпреки че сте задали параметрите му, анализ на шума няма да бъде извършен.

<pre>* Schematics Netlist * C_C1 in 2 10u R_Rg 1 in 600 V_Vcc Vcc 0 15 R_Rt 0 out 10k Q_Q1 3 2 4 Q2N4123 C_C2 3 out 10u C_C3 0 4 100u R_R1 2 Vcc 142k R_R2 0 2 28k R_R3 3 Vcc 3.4k R_R4 0 4 1.5k V_Vin 1 0 DC 0V AC 10m</pre> <p style="text-align: center;">фигура 9</p>	<pre>** Analysis setup ** .ac DEC 101 0.1 1G .noise V([out]) V_Vin .OP - анализ 'Детайли на работната точка'</pre> <p>↑ частотен анализ ↑ мащаб</p> <p>↓ интервал на изменение ↓ начална стойност ↓ крайна стойност</p> <p>↓ шумов анализ ↓ изходно напрежение ↓ входен източник</p> <p style="text-align: center;">фигура 10</p>
---	---

В средата на схемния редактор **Schematics** стартирайте симулациите. *Netlist-a* (фиг. 9) на схемата и командите (фиг. 10), с които се задават анализите, са:

6. Визуализиране на честотните характеристики в Probe

След завършване на изчислителните процеси, графичният постпроцесор **Probe**

се отваря автоматично.



Резултатите от анализа *AC Sweep* са само в графичен вид.

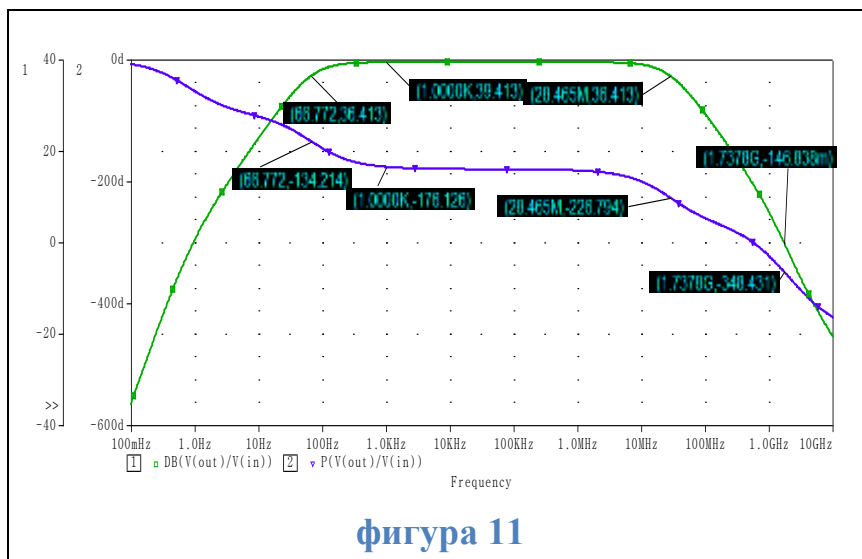


Амплитудно честотната характеристика (**АЧХ**) представлява модулет на коефициента на усилване (предаване) по напрежение. **АЧХ** е безразмерна величина. Поради това, че **АЧХ** се изменя в широки граници, най-често стойността ѝ се измерва в децибели ($1\text{dB}=20\log X$).

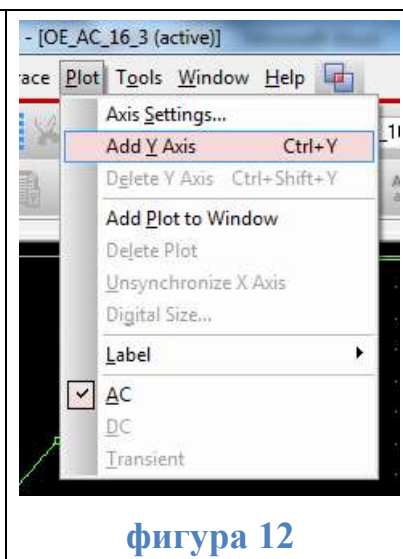
Фазово честотната характеристика (**ФЧХ**) представлява фазата на коефициента на усилване (предаване) по напрежение. Тя се измерва в градуси.



Понеже характеристиките на Бодe (**АЧХ** и **ФЧХ**) се отнасят за една и съща схема, за предпочитане е да бъдат разположени в една и съща работна страница. Тъй като те се изразяват в различни мерни единици, на графиката се изобразяват две различни ординатни оси (фиг. 11).



фигура 11



фигура 12

За да построите **АЧХ** в децибели задайте **dB(V(out)/V(in))** (фиг. 11). За да поставите втората ординатна ос от менюто *Plot* изберете **Add Y Axis (Ctrl+Y)** (фиг. 12). В новата координатна система построите **ФЧХ** чрез **P(V(out)/V(in))** (фиг. 11).

Анализът на **АЧХ** (фиг. 11) ни води до определянето на числените стойности на характерните честотни параметри на усилвателя:

1. Коефициентът на усилване по напрежение в лентата на пропускане при честота $f=1\text{kHz}$ е **39,413 dB** (или **93,47** пъти $\left(10^{\frac{\text{dB}}{20}}\right)$, а дефазирането $\varphi \approx -180^\circ (-176,13)$, т.е. **изходният сигнал е инвертиран спрямо входния**.
2. Ниската гранична честота (при която коефициентът на усилване спада с **3 dB** в областта на ниските честоти) е $f_b=66\text{ Hz}$. При нея дефазирането спрямо дефазирането в лентата на пропускане е $\varphi_b \approx -45^\circ (-176,13 - (-134,21)=41,91^\circ)$.
3. Високата гранична честота (при която коефициентът на усилване спада с **3**

dB в областта на високите честоти) е $f_h=28,465 \text{ MHz}$. При нея дефазирането спрямо дефазирането в лентата на пропускане е $\varphi_h \approx -45^\circ (-226,79 - (-176,13)) = 50,67^\circ$.

4. Лентата на пропускане е от **66 Hz** до **28,465 MHz** (от f_b до f_h).

5. Широчината на лентата на пропускане е $\Delta f=28,5 \text{ MHz}$ ($\Delta f=(f_h - f_b)$).

6. Честотата на единичното усилване е $f_{(K_u=1)}=1,7378 \text{ GHz}$ ($K_u=1$, т.е. $\approx 0\text{dB}$).

Получените данни е полезно да запишете в Таблица 1.

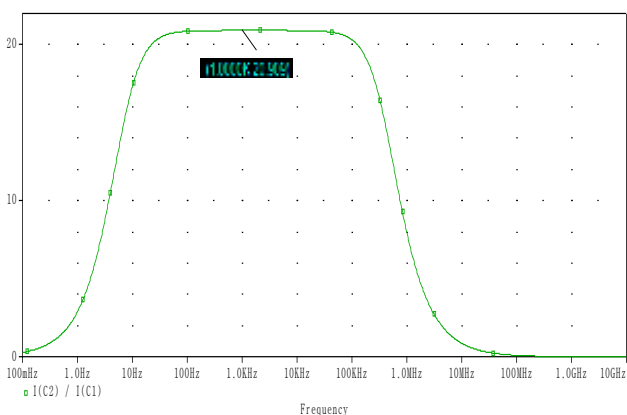
таблица 1

		Ниска гранична честота f_b	Честота в лентата на пропускане	Висока гранична честота f_h	Честота на единичното усилване $f_{(K_u=1)}$
f	Hz	66,772	1k	28,465 М	1,7378 G
K_U	dB	36,413	39,413	36,413	-146,838 m (≈ 0)
φ	°	-134,214	-176,126	-227,374	-348,431

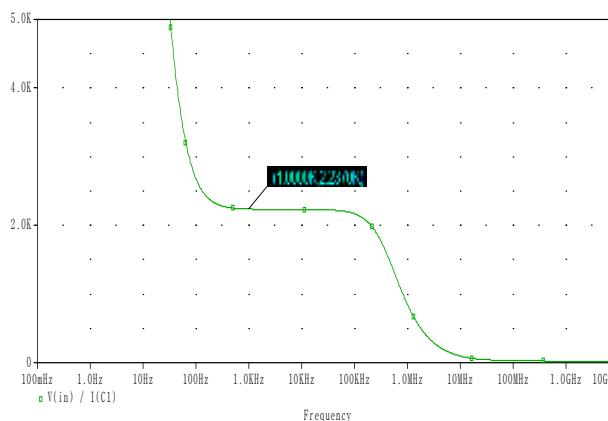
⚠ За да премахнете втората ординатна ос от менюто *Plot* изберете **Delete Y Axis** (**Sift+Ctrl+Y**) (фиг. 12). За да премахнете **AЧХ**, кликнете върху зададеното (оцветява се в червено) и изтрийте (с бутона **Delete** от клавиатурата).

KI

За да построите K_I (коефициент на усилване по ток) задайте **I(C2) / I(C1)** (фиг. 14). С помощта на курсора се отчита коефициента на усилване в лентата на пропускане $K_{I(1\text{kHz})}=20,909$.



фигура 9



фигура 105

⚠ След като кликнете два пъти върху името на построената графика, в отвореното поле задайте новата графика.

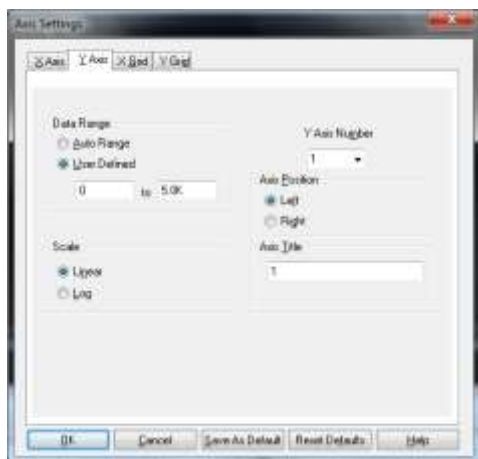
Rvx

Използвайте закона на **Ом** и постройте R_{vx} (входно съпротивление) чрез **V(in)/I(C1)** (фиг. 15).

⚠ За да оцените входното съпротивление е необходимо да промените настройките на ординатната ос. Това ще постигнете като от менюто *Plot*

изберете **Y Axis Settings ...** (фиг. 12) (или кликнете два пъти върху някой от стойностите, изобразени върху ординатната ос). В отворения диалогов прозорец вместо **Auto Range** изберете **User Defined** и задайте, например от **0** до **5k** (фиг. 16).

С помощта на курсора се отчита входното съпротивление в лентата на пропускане $R_{BX} (1\text{kHz}) = 2,237 \text{ k}\Omega$.



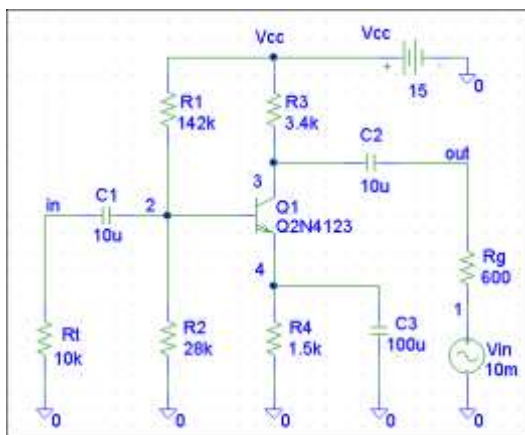
фигура 16



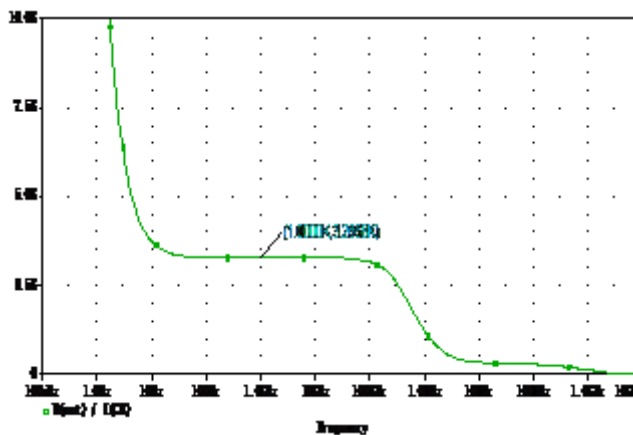
фигура 17

Ризх

За да изследвате зависимостта на изходното съпротивление, е необходимо да промените схемата, т.е. елементите от входната (R_g и V_{in}) и изходната (R_t) верига трябва да сменят местата си (фиг. 18). Съхранете схемата под ново име и извършете зададените анализи без промяна отново.



фигура 18



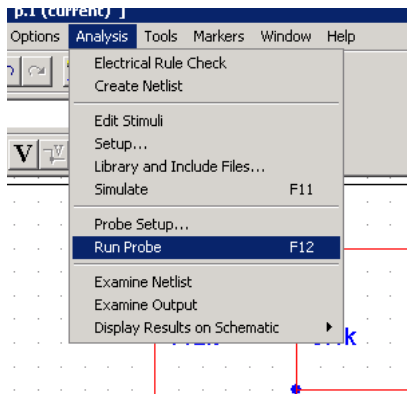
фигура 19

За да построите **Ризх** задайте $V(\text{out}) / I(\text{C2})$ (фиг. 19). Отново променете настройките на ординатната ос (фиг. 17). С помощта на курсора се отчита изходното съпротивление в лентата на пропускане $R_{изх} (1\text{kHz}) = 3,2668 \text{ k}\Omega$.

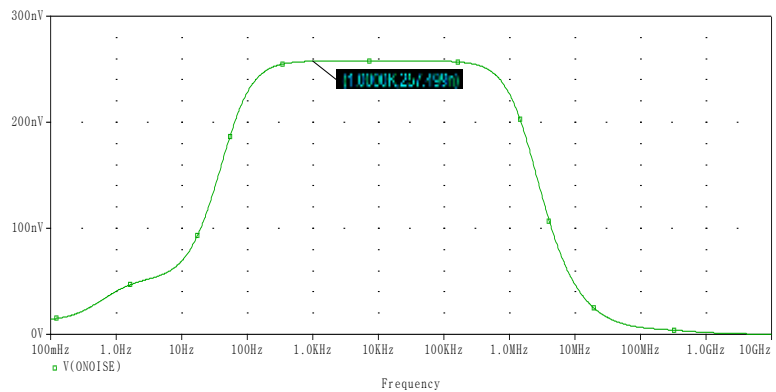
Шум

За да изследвате шумовите характеристики е необходимо да отворите файла на основната схема (преди модифицирането ѝ). Не се налага да стартирате отново

симулациите. От менюто *Analysis* чрез опцията **Run Probe** (или чрез функционалния бутон **F12**) стартирайте графичния постпроцесор (фиг. 20).



фигура 20

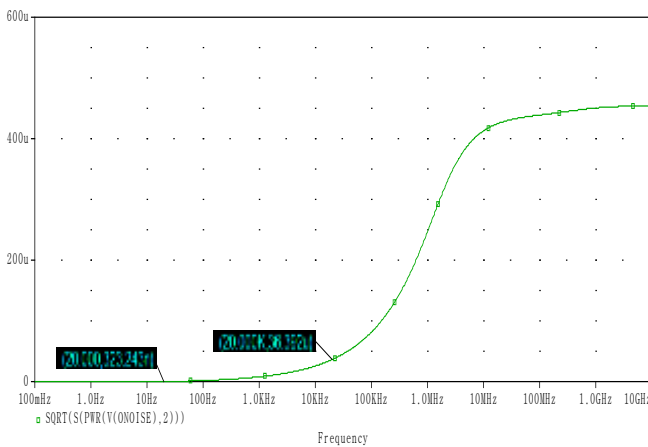


фигура 21

Задавайки **Vonoise**, ще получите спектралната плътност на изходното напрежение. С курсора се отчита, че в лентата на пропускане **Vonoise**

$$(1\text{kHz})=257,499 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$$

За да определите шумовото напрежение се налага да зададете сложния математически израз: **SQRT(S(PWR(V(ONoise),2)))**, където **SQRT(x)** = \sqrt{x} ; **S(x)** - интеграл от **X** в границите на променливата по абсцисната ос; **PWR(x,y)** = $|x|^y$ (фиг. 22).



фигура 22

Trace	Cursor1	Cursor2	Diff	Max	Min	Avg
X Value	20.000K	20.000	19.980K	20.000K	20.000	10.010K
SQRT(S(PWR(V(ONoise),2)))	36.310u	69.716n	36.240u	36.310u	69.716n	18.190u

фигура 23

Measurement Results	
Measurement	Value
YatX(SQRT(S(PWR(V(ONoise),2))),20)	323.22389n
YatX(SQRT(S(PWR(V(ONoise),2))),20k)	36.39129u
YatX(SQRT(S(PWR(V(ONoise),2))),20k)-YatX(SQRT(S(PWR(V(ONoise),2))),20)	36.06807u

фигура 24

При отчитането е уместно да използвате показанията и на двата курсора. Колоната **Diff** в полето със стойности (фиг. 23) представлява разликата между показанията на двата курсора. В такъв случай търсеното шумово напрежение е **U_{шo}=36,24 μV**. До аналогичен резултат може да достигнете и чрез използване на специалните функции (**Measurements**) (фиг. 24). В дадения случай е подходяща функцията **YatX(1,X_value)** (търсене стойност по остта **Y** при зададена стойност на величината от остта **X**) - **YatX(SQRT(S(PWR(V(ONoise),2))),20k)**, **YatX(SQRT(S(PWR(V(ONoise),2))),20)** и разлика между тях.



Начертайте и анализирайте електронни схеми по ваш избор, за да се уверите, че можете да използвате честотните анализи с PSpice.