МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ КОМПЛЕКС

«ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНОГО СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ»

Курсова робота

на тему

«Моделі операційних підсилювачів»

Виконав:

студент IV курсу

групи ДА-32

Колінько Анжела

Київ – 2016

Зміст

[1. Принцип роботи операційного підсилювача 3](#_Toc470791209)

[2. Характеристики операційних підсилювачів 4](#_Toc470791210)

[2.1 Ідеальний операційний підсилювач 4](#_Toc470791211)

[2.2 Реальний операційний підсилювач 4](#_Toc470791212)

[3. Макромоделі операційногопідсилювача 6](#_Toc470791213)

[3.1 Гранично ідеалізований ОП 6](#_Toc470791214)

[3.2 Покращена гранична модель 7](#_Toc470791215)

[3.3 Базова модель ОП 8](#_Toc470791216)

[3.4 Лінійна шумова модель 9](#_Toc470791217)

[3.5 Стандартна модель з вхідним диференційним каскадом на біполярних n-p-n транзисторах. 10](#_Toc470791218)

[Додатки 12](#_Toc470791219)

[Додаток 1. Гранично ідеалізований ОП 12](#_Toc470791220)

[Додаток 2. Покращена гранична модель 12](#_Toc470791221)

[Додаток 3. Базова модель 12](#_Toc470791222)

[Додаток 4. Джерело шумової напруги 13](#_Toc470791223)

[Додаток 5. Стандартна модель з вхідним диференційним каскадом на біполярних n-p-n транзисторах. 13](#_Toc470791224)

# 1. Принцип роботи операційного підсилювача

Операційний підсилювач - це електронний підсилювач напруги з високим коефіцієнтом посилення, що має диференційний вхід і зазвичай один вихід. Напруга на виході може перевищувати різницю напруг на входах в сотні або навіть тисячі разів.

Умовні позначення на схемі для операційного підсилювача наступні:

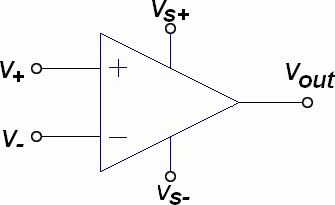
V + - неінвертуючий вхід

V- - інвептуюсий вхід

Vout - вихід

VS + - плюс напруги живлення

VS- - мінус напруги живлення



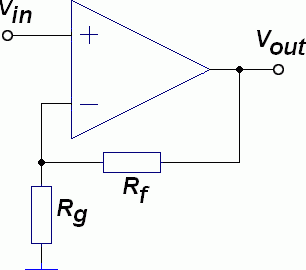
Мал. 1. Умовне позначення ОП

Виводи для подачі напруги живлення (VS + і VS-) можуть позначатися по різному. Незважаючи на різне позначення, їх функція залишається однією і тією ж – забезпечення додаткової енергії для посилення сигналу. Часто на схемах ці виводи не зображують, щоб не захаращувати креслення, і їх наявність або вказується окремо, або має бути ясною зі схеми.

Диференціальні входи підсилювача складаються з двох виводів – V + і V-, ідеальний операційний підсилювач підсилює тільки різницю напруг між двома цими входами, ця різниця називається диференційною напругою на вході. Напруга на виході операційного підсилювача визначається формулою

Vout=AOL(V+ - V-)

де V+ – напруга на неінвертуючому (прямому) вході, V- – напруга на інвертуючому (інверсному) вході, і AOL – коефіцієнт підсилення підсилювача з розімкненою петлею зворотного зв'язку. В випадку наявності від’ємного зворотного зв’язку ACL (коефіцієнт підсилення) = 1+Rf/Rg



Мал. 2. Схема включення ОП з від’ємним зворотнім зв’язком

# 2. Характеристики операційних підсилювачів

## 2.1 Ідеальний операційний підсилювач

Ідеальний операційний підсилювач може працювати при будь-яких вхідних напругах і має наступні властивості:

– коефіцієнт посилення з розімкненою петлею зворотного зв'язку дорівнює нескінченності (при теоретичному аналізі вважають коефіцієнт посилення при розімкнутій петлі зворотного зв'язку AOL прагне до нескінченності).

– діапазон вихідних напруг Vout дорівнює нескінченності (на практиці діапазон вихідних напруг обмежують величиною напруги живленняVs + і Vs-).

– нескінченно широка смуга пропускання (тобто амплітудно-частотна характеристика є ідеально плоскою з нульовим фазовим зрушенням).

– нескінченно великий вхідний опір (Rin = ∞, струм V + в V- не тече).

– нульовий вхідний струм (тобто передбачається відсутність струмів витоку і струмів зміщення).

– нульова напруга зсуву, тобто коли входи з'єднані між собою V + = V-, то на виході присутній віртуальний нуль (Vout = 0).

– нескінченно велика швидкість наростання напруги на виході (тобто швидкість зміни вихідної напруги не обмежена) і нескінченно велика пропускна потужність (напруга і струм не обмежені на всіх частотах).

– нульовий вихідний опір (Rout = 0, так що вихідна напруга не змінюється при зміні вихідного струму).

– відсутність власних шумів.

– нескінченно велика ступінь подавлення синфазних сигналів.

– нескінченно велика ступінь подавлення пульсацій напруги живлення.

## 2.2 Реальний операційний підсилювач

1. Неідеальність параметрів по постійному струму

1.1 Скінченний коефіцієнт підсилення

1.2 Скінченний вхідний опір

1.3 Ненульовий вихідний опір

1.4 Вхідний струм

1.5 Температурна залежність

1.6 Подавлення пульсацій вхідних сигналів

1.7 Дрейф

1.8 Шуми

2. Неідеальність параметрів по змінному струму

2.1 Скінченна полоса пропускання

2.2 Стабільність

2.3 Шуми

2.4 Вхідна ємність

3. Нелінійність параметрів

3.1 Насичення

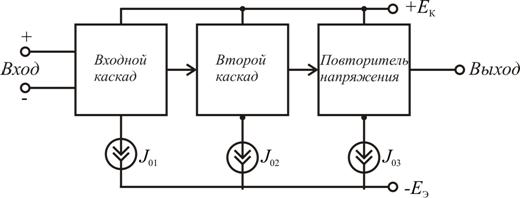
3.2 Обмежена швидкість наростання

4. Обмеження струмів та напруг

4.1 Обмеження вихідного стуму

4.2 Обмеження потужності розсіювання

Типові параметри інтегрального ОП наступні:, коефіцієнт посилення напруги KU = 104-106. Типова структура ОП показана на мал. 3. Як правило, в ОП використовуються розщеплені джерела живлення (напруга живлення становить зазвичай від ± 2 до ± 18 В). За рахунок використання розщеплених джерел вихідна напруга може приймати як позитивні, так і негативні значення.



Мал. 3 Типова структура ОП

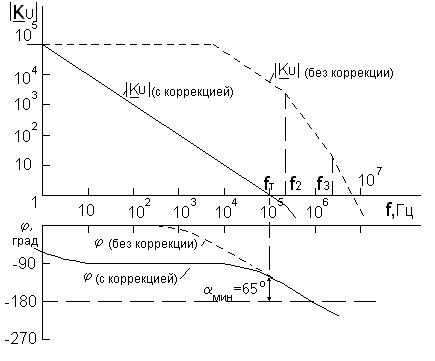
Вхідним каскадом ОП є диференційний підсилювач. Його основне призначення – попереднє посилення диференціального сигналу і ослаблення синфазної складової. Наявність диференціального входу дозволяє легко підключати зовнішні ланцюга зворотного зв'язку. Коефіцієнт посилення вхідного каскаду не перевищує декількох десятків.

Другий каскад реалізується на основі схеми із загальним емітером. Він забезпечує основну частку коефіцієнта посилення напруги. Третій, вихідний каскад – повторювач напруги. Його призначення – посилення потужності вихідного сигналу. Вихідний опір повторювача напруги низький і не перевищує 100 Ом.

В інтегральних підсилювачах для зміщення робочих точок транзисторів використовують джерела струму. Такі джерела реалізують на основі токових дзеркал. Перевага таких ланцюгів зсуву полягає в тому, що токові дзеркала мають більший внутрішній опір і при цьому займають меншу площу, ніж резистори великого номіналу. Одне токове дзеркало може формувати струми зміщення кількох каскадів посилення.

Коефіцієнт посилення напруги операційного підсилювача залежить від частоти вхідного сигналу. Зазвичай його вимірюють в децибелах. На постійному струмі, при ω=0 його значення лежить в межах від 104 до 105 (80 - 100 дБ). З ростом частоти коефіцієнт посилення зменшується і на частотах 1 - 10 МГц приймає значення, рівне одиниці. Цю частоту називають частота одиничного посилення і позначають ω0.

Зазвичай будують графік залежності логарифмічного посилення від частоти. На мал.4 показаний графік ЛАЧХ операційного підсилювача з внутрішньої частотної корекцією. У таких ОП спад посилення з нахилом 6 дБ / октава починається на частоті близько 10 Гц. Така залежність створюється для забезпечення стабільної роботи ОП.



Мал. 4 ЛАЧХ та ЛФЧХ ОП.

Передавальна функція ОУ апроксимується наближеним виразом

http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image026.gif (\*)

Тутhttp://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image028.gif – коефіцієнт посилення ОУ на постійному струмі;

http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image030.gif – частота зрізу («перелому») АЧХ.

У операційних підсилювачів загального застосування типові значення http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image032.gifі http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image034.gif рад/с.

На частотах http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image036.gif рівність (\*) можна замінити наближеним виразом

http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image038.gif (\*\*)

З останньої формули випливає, що коефіцієнт посилення ОП дорівнює одиниці на частотіhttp://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image040.gif. З (\*\*) і виразу для http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image024.gif випливає, що при http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image036.gif

http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image043.gif

Реальні ОП мають невеликий вхідний струм, званий струмом зміщення http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image045.gif. Він дорівнює напівсумі струмів неінвертующого і інвертуючого входів:

http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image047.gif

Величина http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image045.gif визначається базовими струмами транзисторів вхідного каскаду. Для ОП з вхідним каскадом на біполярних транзисторах типове значення струму зміщення дорівнює 100 нА. У деяких ОП для збільшення вхідного опору і зменшення http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image049.gif вхідні каскади реалізують на польових транзисторах з керуючим p-n-переходом. У таких ОП типове значення вхідного струму зміщення становить 50 пА.

Вхідний струм зсуву http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image062.gif дорівнює різниці вхідних струмів зміщення:

http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/5_1/index.files/image064.gif

Його величина обумовлена неузгодженістю параметрів диференційного каскаду на вході ОП. Як правило, вхідний струм зсуву становить приблизно одну десяту від вхідного струму зміщення.

# 3. Макромоделі операційногопідсилювача

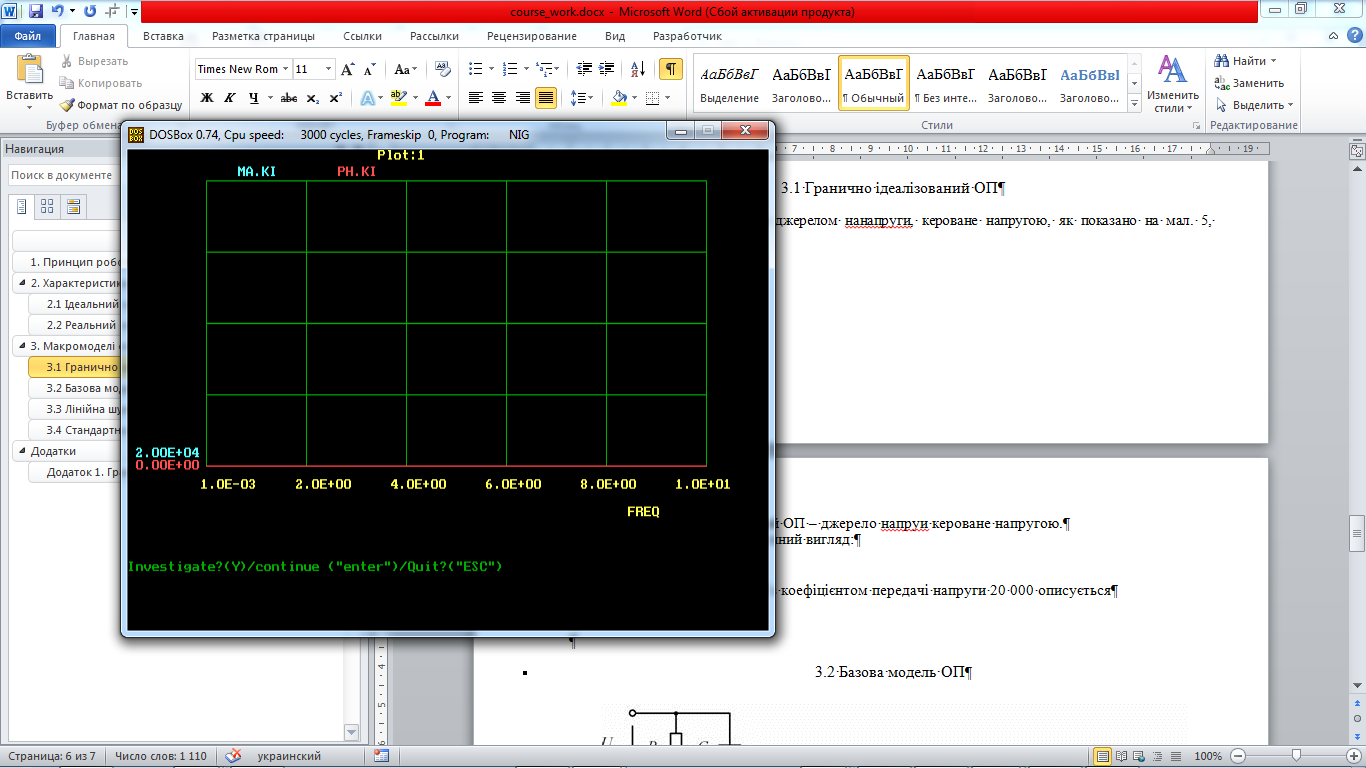
Інтегральні схеми можуть бути проаналізовані на рівні окремих компонентів (транзисторів, діодів і т.д.). Однак на практиці це дуже незручно. Типовий ОУ містить 20-30 транзисторів. Якщо кожен транзистор замінити моделлю Еберса-Молла, що містить більше десятка елементів, аналізуєма модель буде містити кілька сот компонентів. До того ж параметри транзисторів інтегральної схеми в більшості випадків невідомі. Тому набагато зручніше використовувати макромоделі, що характеризують поведінку пристрою щодо його зовнішніх виводів.

## 3.1 Гранично ідеалізований ОП

Гранично ідеалізований ОП є джерелом напруги, кероване напругою, як показано на мал. 5, 

Мал. 5. Гранично ідеалізований ОП – джерело напруи кероване напругою.

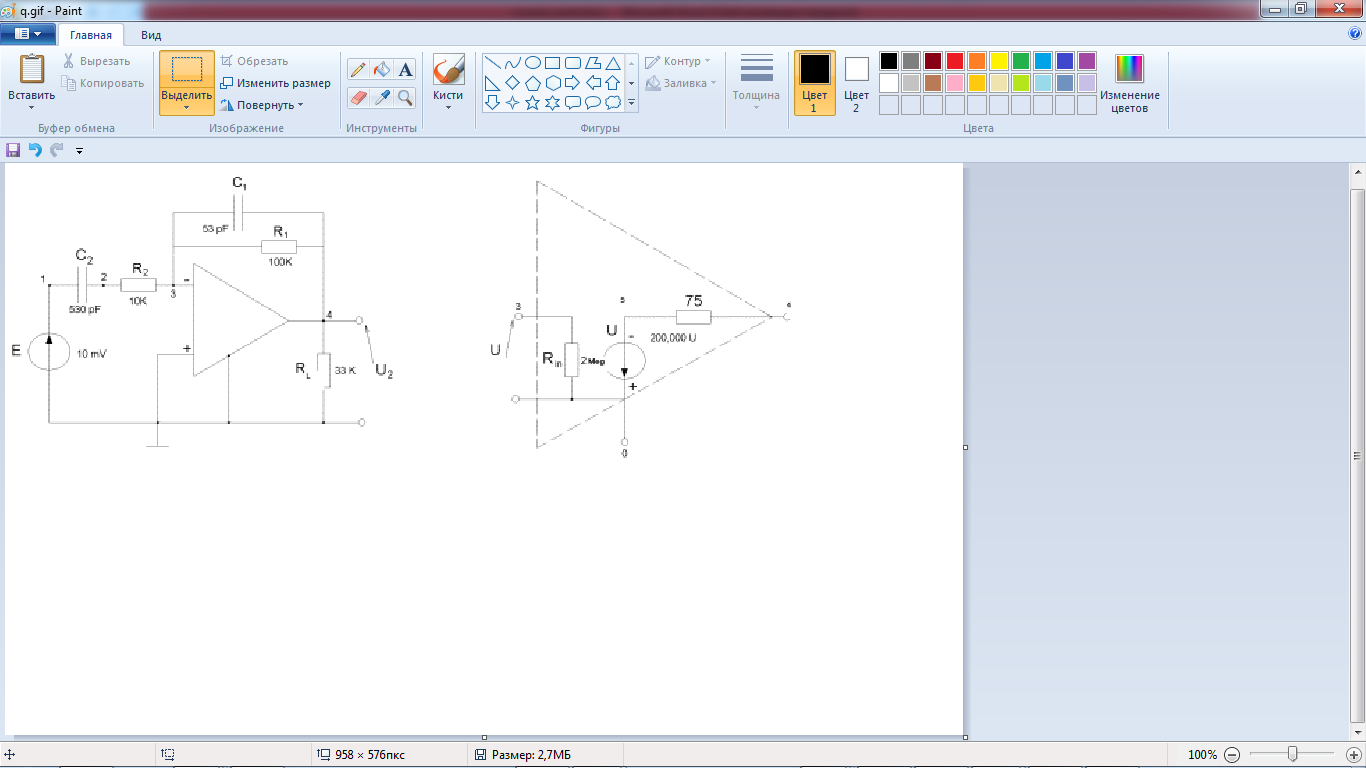
Його АЧХ і ФЧХ мають наступний вигляд:



Наприклад, безінерційний ОП з коефіцієнтом передачі напруги 20 000 описується:

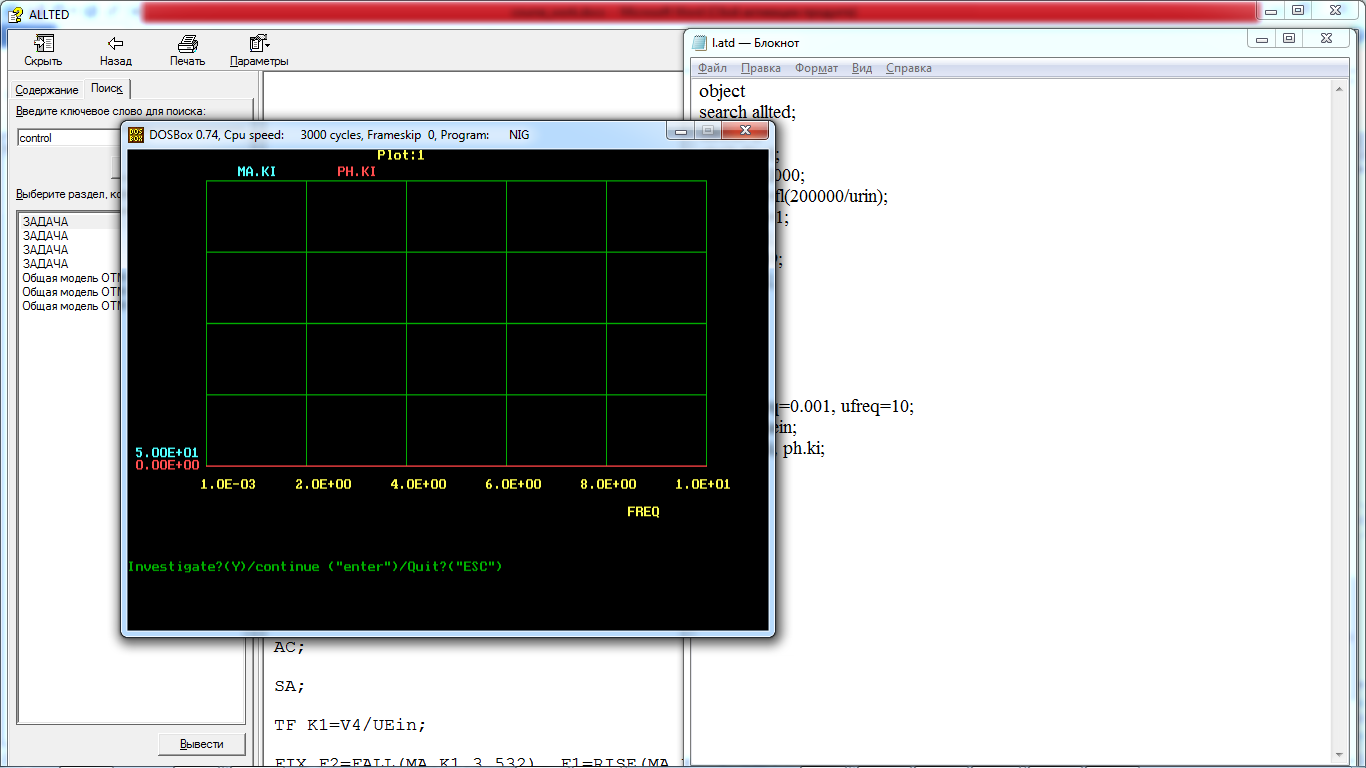
e1(1,0)=fl(20000/urn);

## 3.2 Покращена гранична модель



Мал. 6. Покращена гранична модель ОП.

Його АЧХ і ФЧХ мають наступний вигляд:



(Схема підключення – з від’ємним зворотнім зв’язком, з K=50 (див. додаток 2))

Сам ОП описується:

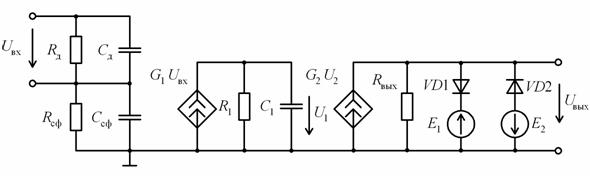
rin(2,1)=2000;

eins(1,5)=fl(200000/urin);

rout(5,3)=1;

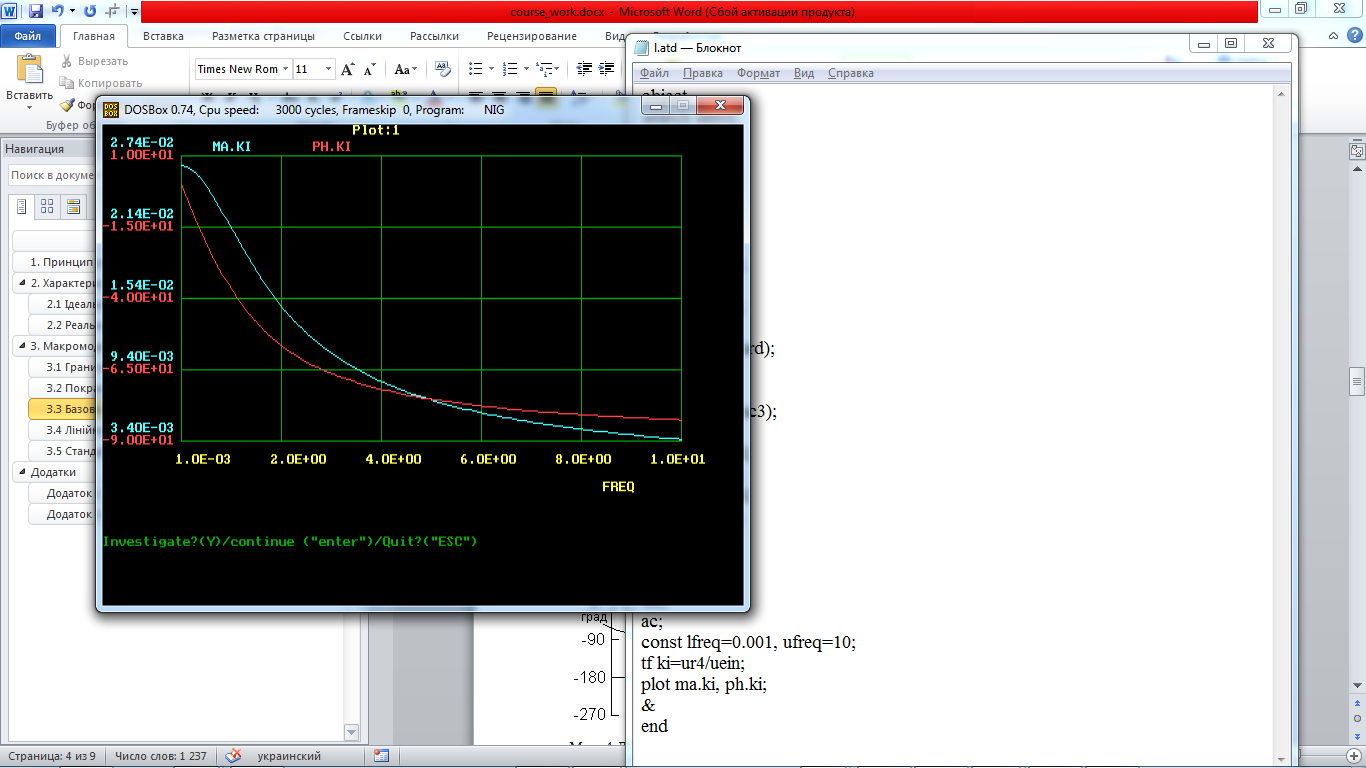
## 3.3 Базова модель ОП

Наскільки більш складніша схема заміщення ОП, в якій враховуються нелінійність перехідної характеристики і наявність одного полюса частотної характеристики, зображена на рис. П.2.8, б. Діоди VD1, VD2, на які подаються запираючі напруги від джерел постійної напруги V1, V2, імітують нелінійність перехідної характеристики ОП. Опори Rвх, Rс рівні вхідним опорам для диференціального і синфазного сигналів, конденсатори Свх, Сс імітують частотні залежності вхідних опорів.



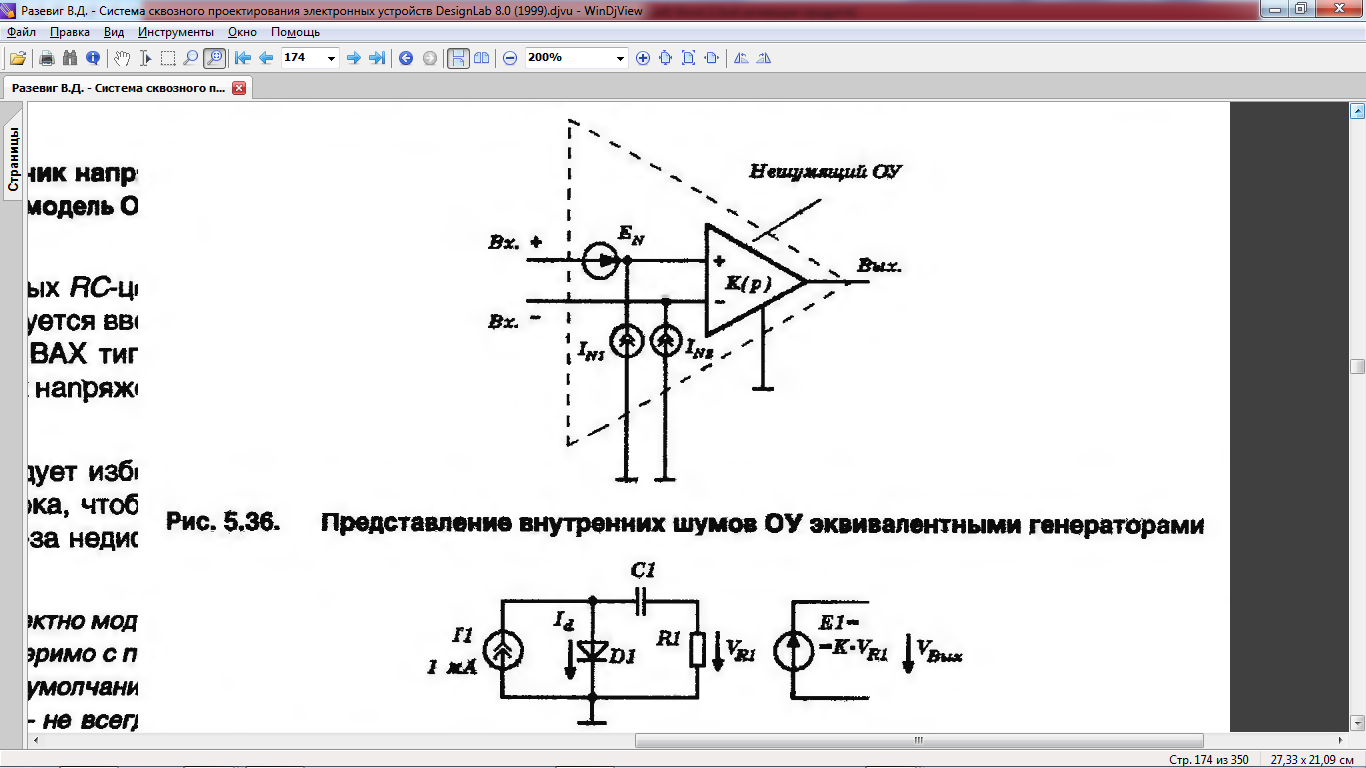
Мал. 7. Базова модель ОП

Його АЧХ і ФЧХ мають наступний вигляд:



(Коефіціент підсилення дуже малий, можливо, внаслідок неправильно підібраних номіналів компонентів моделі (див. додаток 3))

## 3.4 Лінійна шумова модель



Мал. 8 Лінійна шумова модель

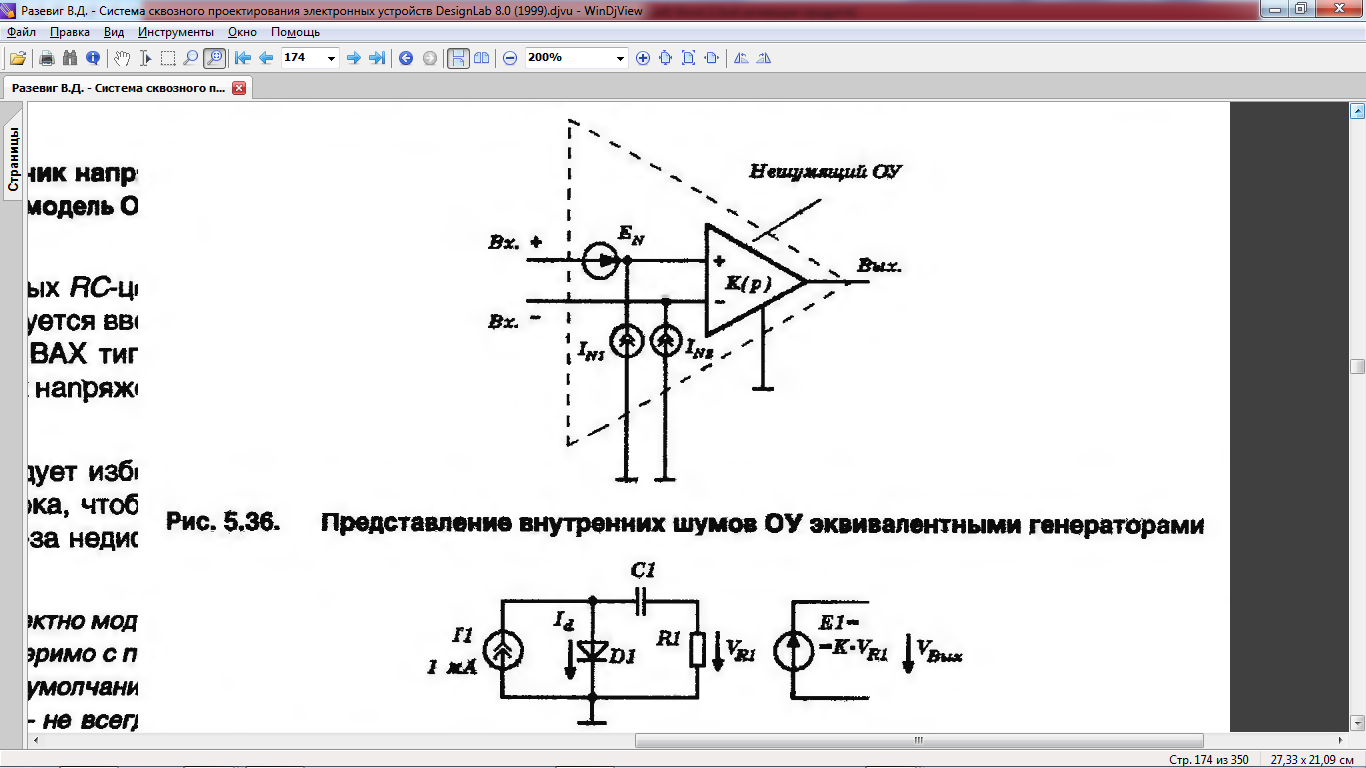
Стандартна макромодель ОП (Див. Рис. П.2.8) не відображає його шумових властивостей. У зв'язку з цим представимо реальний шумлячий ОП у вигляді моделі нешумячого ОП, до входу якого підключені джерела шумової напруги En струмів In1, In2 (мал. 8).

В ОП з першим каскадом на польових транзисторах джерела шумових струмів In1, In2 малоістотні і ними можна знехтувати. Спектральні щільності шумових струмів In1, In2 однакові і описуються такими ж виразами, як спектральна щільність шуму EN:

 де перша складова кожної спектральної щільності має характер широкосмугового «білого» шуму, а друга – низькочастотного флікер-шуму.

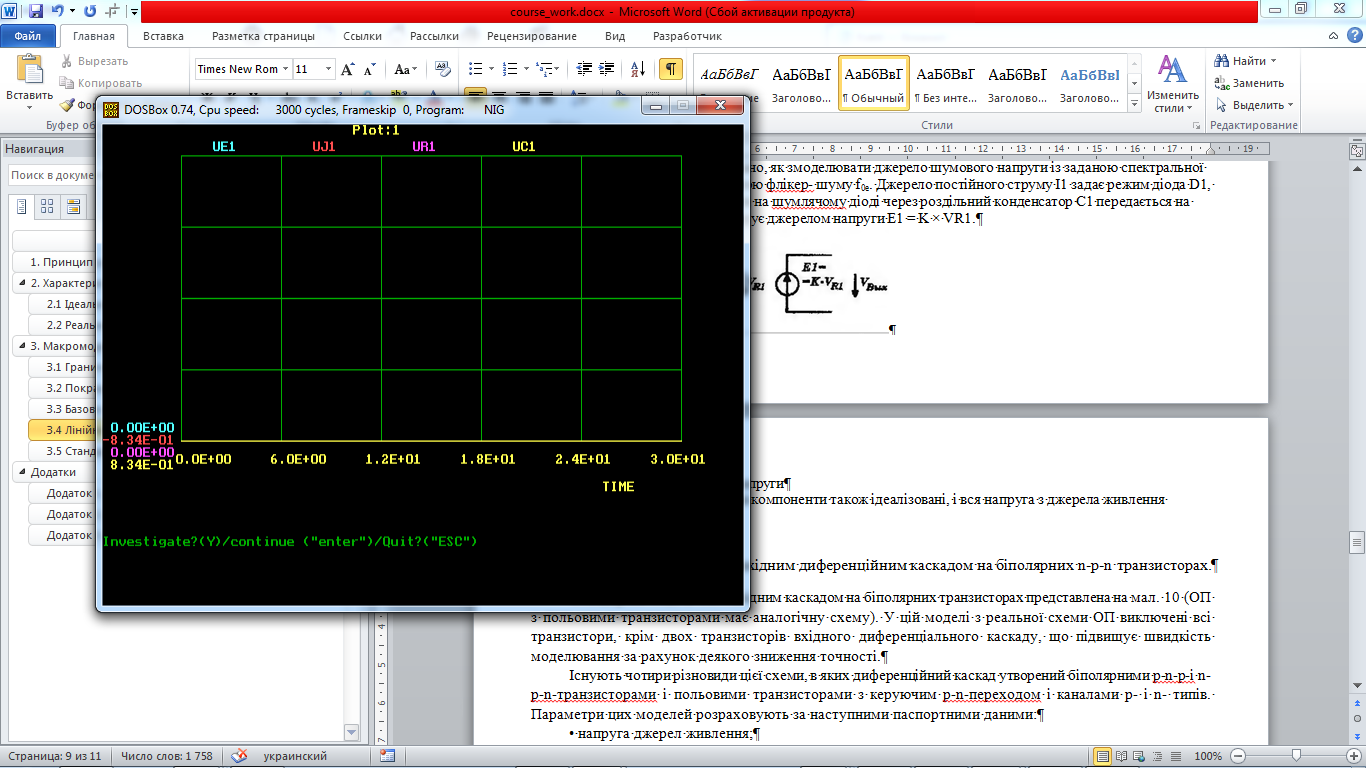
У схемі заміщення на мал..8 в якості моделі нешумячого ОП доцільно використовувати найпростішу лінійну модель типу наведеної на мал. 6.

Як приклад на мал. 9 показано, як змоделювати джерело шумового напруги із заданою спектральної щільністю Se0 і граничною частотою флікер- шуму f0e. Джерело постійного струму I1 задає режим діода D1, флюктуіруююча складова напруги на шумлячому діоді через роздільний конденсатор С1 передається на резистор R7, напруга на якому керує джерелом напруги Е1 = K × VR1.



Мал. 9 Джерело шумової напруги

Проте при описі бібліотечні компоненти також ідеалізовані, і вся напруга з джерела живлення проходить через конденсатор:



(Див. додаток 4)

## 3.5 Стандартна модель з вхідним диференційним каскадом на біполярних n-p-n транзисторах.

Стандартна модель ОП з вхідним каскадом на біполярних транзисторах представлена на мал. 10 (ОП з польовими транзисторами має аналогічну схему). У цій моделі з реальної схеми ОП виключені всі транзистори, крім двох транзисторів вхідного диференціального каскаду, що підвищує швидкість моделювання за рахунок деякого зниження точності.

Існують чотири різновиди цієї схеми, в яких диференційний каскад утворений біполярними р-n-р-і n-р-n-транзисторами і польовими транзисторами з керуючим р-n-переходом і каналами р- і n- типів. Параметри цих моделей розраховують за наступними паспортними даними:

• напруга джерел живлення;

• максимальні значення позитивної і негативної вихідної напруги;

• максимальні швидкості наростання позитивних і негативних вихідних напруг;

• потужність споживання в статичному режимі;

• ємність корекції (внутрішньої або зовнішньої);

• вхідний струм зміщення і напруга зсуву нуля;

• коефіцієнт підсилення диференціального сигналу на низьких частотах;

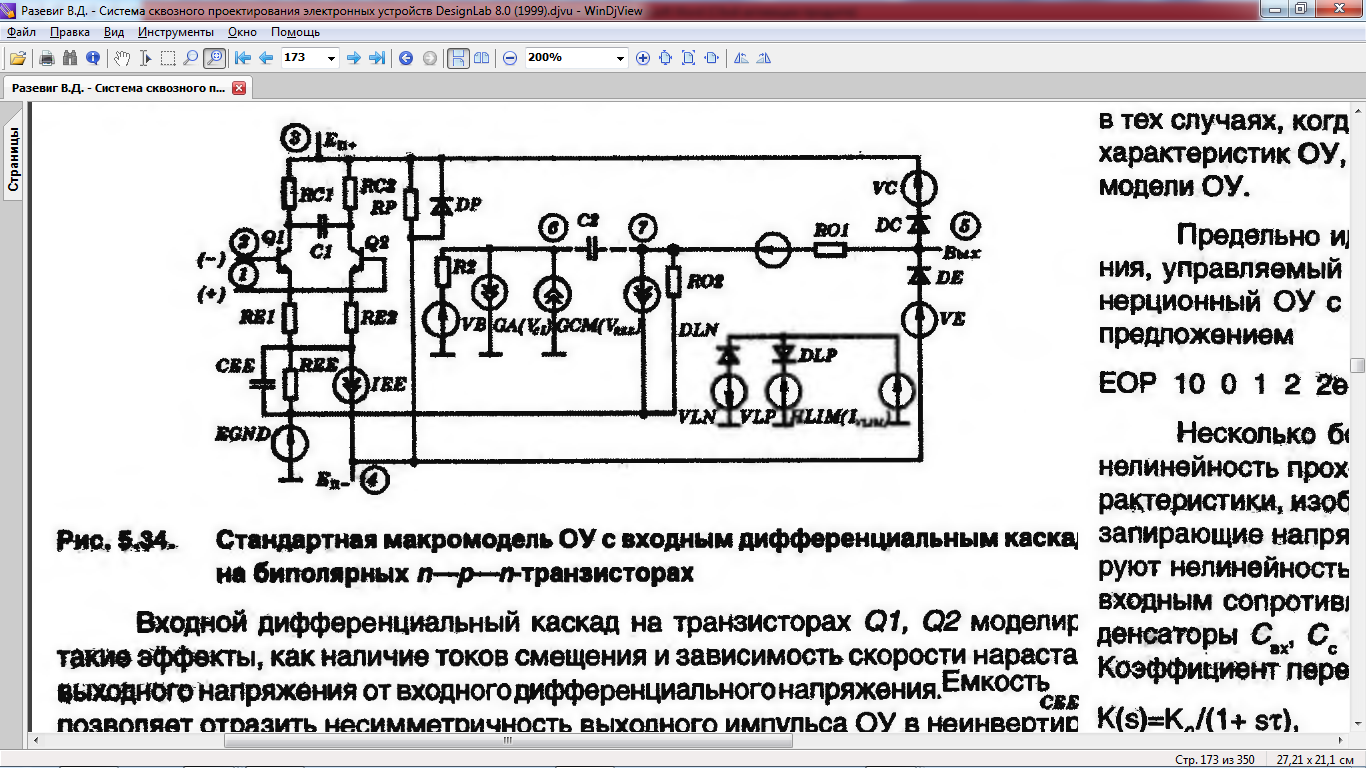
• частота одиничного підсилення;

• коефіцієнт подавлення синфазного сигналу;

• додатковий фазовий зсув на частоті одиничного посилення, що визначається наявністю другого полюса;

• вихідні опори на низьких і високих частотах;

• максимальний вихідний струм короткого замикання.



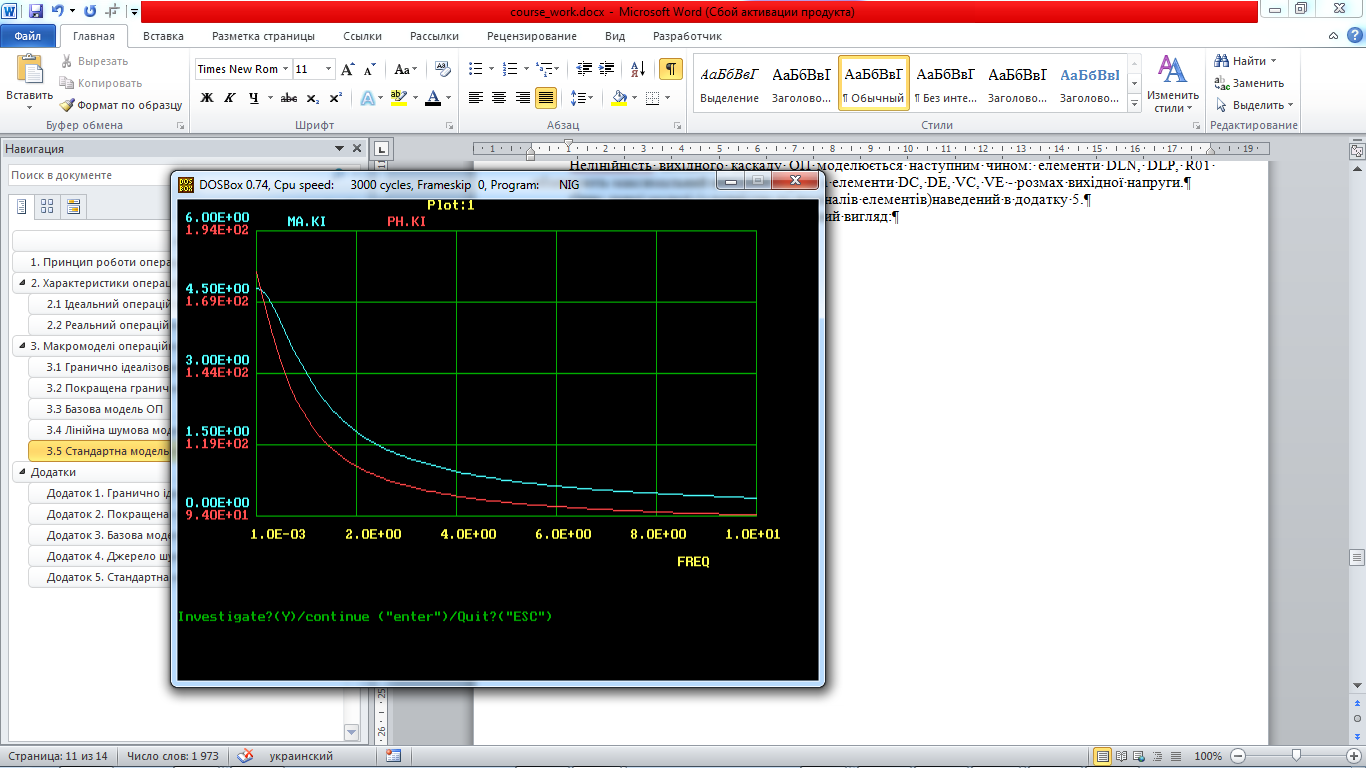
Мал. 10. Стандартна модель ОП

Вхідний диференціальний каскад на транзисторах Q1, Q2 моделює такі ефекти, як наявність струмів зміщення і залежність швидкості наростання вихідної напруги від вхідної диференціальної напруги. Ємність СЕЕ дозволяє відобразити несиметричність вихідного імпульсу ОП в неінвертуючому включенні. Ємність С1 разом з ємностями переходів транзисторів дозволяє імітувати двополюсний характер частотної характеристики ОП. Керовані джерела струму GA, GCM і резистори R2, R02 моделюють диференціальне та синфазне посилення напруги. За допомогою ємності С2, що включається в схему за вибором користувача (на мал. 10 зображена пунктиром), можна імітувати внутрішню або зовнішню корекцію ОП.

Нелінійність вихідного каскаду ОП моделюється наступним чином: елементи DLN, DLP, R01 обмежують максимальний вихідний струм, а елементи DC, DE, VC, VE - розмах вихідної напруги.

Опис даної моделі (з точністю до номіналів елементів)наведений в додатку 5.

АЧХ і ФЧХ цієї моделі мають наступний вигляд:



(Коефіціент підсилення дуже малий, можливо, внаслідок неправильно підібраних номіналів компонентів моделі (див. додаток 5))

# Додатки

## Додаток 1. Гранично ідеалізований ОП

object

search allted;

circuit l;

ein(1,2)=1;

e1(1,0)=fl(20000/urn);

rn(1,2)=2;

r1(2,0)=1;

&

task;

dc;

ac;

const lfreq=0.001, ufreq=10;

tf ki=ue1/urn;

plot ma.ki, ph.ki;

&

End

## Додаток 2. Покращена гранична модель

object

search allted;

circuit l;

ein(1,0)=1;

rin(2,1)=2000;

eins(1,5)=fl(200000/urin);

rout(5,3)=1;

r1(2,0)=1;

r2(2,3)=49;

rn(3,0)=2;

&

task;

dc;

ac;

const lfreq=0.001, ufreq=10;

tf ki=v3/uein;

plot ma.ki, ph.ki;

&

end

## Додаток 3. Базова модель

object

search allted;

circuit l;

ein(1,0)=1;

r1(2,0)=1;

r2(2,3)=49;

#rn(3,0)=2;

rd(1,2)=2000;

rp(2,0)=100;

cd(1,2)=0.02;

cp(2,0)=0.1;

j3(4,0)=fl(20/urd);

r3(4,0)=1;

c3(4,0)=0.1;

j4(3,0)=fl(20/uc3);

r4(3,0)=1;

d1(3,6)=def.d;

ed1(6,0)=0.1;

d2(7,3)=def.d;

ed2(0,7)=0.1;

&

task;

dc;

ac;

const lfreq=0.001, ufreq=10;

tf ki=ur4/uein;

plot ma.ki, ph.ki;

&

end

## Додаток 4. Джерело шумової напруги

object

search allted;

circuit l;

j1(0,1)=1;

d1(1,0)=def.d;

c1(1,2)=0.001;

r1(2,0)=1;

e1(2,0)=fl(10/ur1);

&

task;

dc;

tr;

const tmax=30;

plot ue1, uj1,ur1,uc1;

#plot ue1,uj1,ud1, ur1,uc1;

&

end

## Додаток 5. Стандартна модель з вхідним диференційним каскадом на біполярних n-p-n транзисторах.

object

search allted;

circuit l;

ein(1,0)=1;

r1(2,0)=1;

#r2(2,3)=49;

r2(3,2)=49;

rn(3,0)=2;

ev(4,5)=100;

rc1(4,7)=10;

rc2(4,6)=10;

c1(7,6)=0.01;

q1(7,2,9,0)=def.npn;

q2(6,1,8,0)=def.npn;

re1(9,10)=10;

re2(8,10)=10;

jee(10,5)=1;

ree(10,5)=1;

cee(10,5)=1;

egnd(5,0)=1;

rp(4,5)=1;

dp(5,4)=def.d;

rb(12,13)=1;

eb(13,0)=1;

ja(12,0)=fl(20/uc1);

jb(12,0)=fl(20/uree);

j02(12,5)=1;

r02(12,5)=1;

e01(12,14)=1;

r01(14,3)=1;

dln(16,15)=def.d;

dlp(15,17)=def.d;

eln(0,16)=1;

elp(17,0)=1;

elim(15,0)=1;

ec(4,19)=1;

dc(3,19)=def.d;

ee(18,5)=1;

de(18,3)=def.d;

&

task;

dc;

ac;

const lfreq=0.001, ufreq=10;

tf ki=urn/uein;

plot ma.ki, ph.ki;

&

end