**Университет ИТМО**

Отчет по ПРОЕКТНОМУ ЗАДАНИЮ №4

«Разработка активного фильтра на операционном усилителе»

Выполнил:

Студент 2 курса

дневного отделения

группы №M32111

Акберов Р.Х.

Преподаватель:

Лукичев Дмитрий Вячеславович

**Санкт-Петербург**

**2023**

# Цель и задачи работы:

Исследовать основные принципы работы активных фильтров на ОУ.

**Задачи работы:**

1) Получить экспериментальные характеристики для определения коэффициента усиления и частоты среза схем фильтра ФВЧ на ОУ на заданных частотах;

2) Получить экспериментальные АЧХ схем фильтра ФВЧ на ОУ;

3) Провести расчет коэффициента усиления схем фильтра ФВЧ на ОУ по номиналам элементов;

4) Провести модельное исследования схем фильтра ФВЧ на ОУ и получить характеристики для определения коэффициента усиления схем фильтра ФВЧ на ОУ на заданных частотах и АЧХ схем фильтра ФВЧ на ОУ;

5) Сравнить данные моделирования, эксперимента и расчета.

# Исходные данные

### Заданные параметры:

* **Операционный усилитель:**

LM324N

* **Заданный коэффициент усиления**

1

* **Параметры питания ОУ:**

(В)

* (В)
* **Напряжение источника сигнала**

(В)

(В)

(В)

* **Частота колебаний входного напряжения**

f\_H\_test\_1= 1000 (Гц)

f\_L\_test\_2= 1000 (Гц)

ftest\_AC= 1…1000000 (Гц)

* **Номиналы использованных сопротивлений:**

3,3 (кОм)

0,82 (кОм)

1 (MОм)

* Схема:
  + Многопетлевая ОС: **ФВЧ**

### **Требуемые параметры фильтра**:

Полоса пропускания

# Экспериментальное исследование ФВЧ по схеме с многопетлевой ОС на базе ОУ LM324N

Изображение выглядит как текст, диаграмма, линия, Параллельный

Автоматически созданное описание

Рисунок 3.1 – Принципиальная схема Фильтра с многопетлевой ОС: ФВЧ

Таблица 3.1 Расчетные параметры экспериментальной модели фильтра

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Схема** |  |  | Многопетлевая ОС | |
| Обозначение | Описание элемента | Номинал | ФВЧ | |
| Расчет по номиналу | По измеренному значению |
| R11, кОм |  |  |  |  |
| R12, кОм |  |  |  |  |
| R1, кОм | ФВЧ | 3,3 кОм |  | 3,31 кОм |
| R2, кОм | ФВЧ | 0,82 кОм |  | 0,821 кОм |
| R3, кОм |  |  |  |  |
| R3, кОм |  |  |  |  |
| С1, нФ | ФВЧ | 12 нФ |  | 12,09 нФ |
| С2, нФ | ФВЧ | 12 нФ |  | 11,84 нФ |
| С3, нФ | ФВЧ | 33 нФ |  | 32,79 нФ |
| fc | Заданная полоса пропускания / частота среза | 5 кГц |  |  |
| K | Коэффициент усиления в полосе пропускания (макс) | 1 |  |  |

## Результаты эксперимента

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, диаграмма, линия

Автоматически созданное описание

Рисунок 3.1 – АЧХ фильтра

f0 = 5 [кГц]

Тип фильтра: ФВЧ.

* Изображение выглядит как текст, снимок экрана, программное обеспечение, дисплей

  Автоматически созданное описание

Рисунок 3.2 – Опыт работы фильтра во временной области

# Анализ работы модели

## Анализ процессов во временной области

Изображение выглядит как текст, диаграмма, линия, Шрифт

Автоматически созданное описание

Рисунок 4.1 – схема фильтра ФВЧ с многопетлевой ОС

### (Hz)

Изображение выглядит как линия, График, диаграмма

Автоматически созданное описание

Рисунок 4.2 – результат моделирования на частоте

10000Hz,

### (Hz)

Изображение выглядит как линия, График, диаграмма, текст

Автоматически созданное описание

Рисунок 4.3 – результат моделирования на частоте

(Hz)

Изображение выглядит как линия, График, текст, число

Автоматически созданное описание

Рисунок 4.4 – Сравнение АЧХ идеального и реального фильтра

# Результаты расчета

Изображение выглядит как текст, диаграмма, число, снимок экрана

Автоматически созданное описание

Изображение выглядит как текст, График, линия, диаграмма

Автоматически созданное описание

Рисунок 5.1 – Сравнение АЧХ расчетного и реального фильтра

# Анализ погрешностей

Таблица 6.1 Сводная таблица результатов измерений

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | **Заданная частота, кГц** | fc | K (на fc) |
| ФВЧ | Расчет по измеренному значению | 1 | 4900 Гц | 0,707 |
| Модель LTSpice (Идеал. ОУ) | 4860 Гц | 0,710 |
| Модель LTSpice (Реал. ОУ) | 4860 Гц | 0,710 |
| Эксперимент | 5000 Гц | 0,668 |

Таблица 6.2 Сводная таблица результатов погрешностей

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Погрешность, % | Расчёт-модель | Расчёт-эксперимент | Модель-эксперимент |
| fc | 0,8 | 2 | 2,8 |
| K | 0,4 | 5,8 | 6,3 |

# Выводы (по лабраторной работе)

Были проведены экспериментальное исследование ФВЧ, его моделирование в среде и исследование графиков, полученных из формул. После этого был проведен расчёт основных параметров фильтра с помощью анализа экспериментальных данных, данных модели и анализа расчётных данных. В конце были определены погрешности измерений. Полученные результаты с небольшим отклонением соответствуют друг другу, что говорит о их достоверности.

# Приложение А. Паспортные данные операционного усилителя

Название элемента LM324

|  |
| --- |
|  |
| а) |
| Изображение выглядит как текст, снимок экрана, число, Шрифт  Автоматически созданное описание |
| б)  Изображение выглядит как текст, линия, диаграмма, График  Автоматически созданное описание |

Рисунок А1 – а) параметры LM324 б) его характеристика

|  |
| --- |
|  |

# Приложение Б. Параметры элементов для моделирования

## Параметры модели LTSpice

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, Шрифт, число

Автоматически созданное описание

# Приложение В. Листинг lib-файла Pspice LM324

\* LMX24\_LM2902 - Rev. A

\* Created by Paul Goedeke; November 16, 2018

\* Created with Green-Williams-Lis Op Amp Macro-model Architecture

\* Copyright 2018 by Texas Instruments Corporation

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

\* MACRO-MODEL SIMULATED PARAMETERS:

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

\* OPEN-LOOP GAIN AND PHASE VS. FREQUENCY WITH RL, CL EFFECTS (Aol)

\* UNITY GAIN BANDWIDTH (GBW)

\* INPUT COMMON-MODE REJECTION RATIO VS. FREQUENCY (CMRR)

\* POWER SUPPLY REJECTION RATIO VS. FREQUENCY (PSRR)

\* DIFFERENTIAL INPUT IMPEDANCE (Zid)

\* COMMON-MODE INPUT IMPEDANCE (Zic)

\* OPEN-LOOP OUTPUT IMPEDANCE VS. FREQUENCY (Zo)

\* OUTPUT CURRENT THROUGH THE SUPPLY (Iout)

\* INPUT VOLTAGE NOISE DENSITY VS. FREQUENCY (en)

\* INPUT CURRENT NOISE DENSITY VS. FREQUENCY (in)

\* OUTPUT VOLTAGE SWING vs. OUTPUT CURRENT (Vo)

\* SHORT-CIRCUIT OUTPUT CURRENT (Isc)

\* QUIESCENT CURRENT (Iq)

\* SETTLING TIME VS. CAPACITIVE LOAD (ts)

\* SLEW RATE (SR)

\* SMALL SIGNAL OVERSHOOT VS. CAPACITIVE LOAD

\* LARGE SIGNAL RESPONSE

\* OVERLOAD RECOVERY TIME (tor)

\* INPUT BIAS CURRENT (Ib)

\* INPUT OFFSET CURRENT (Ios)

\* INPUT OFFSET VOLTAGE (Vos)

\* INPUT COMMON-MODE VOLTAGE RANGE (Vcm)

\* INPUT OFFSET VOLTAGE VS. INPUT COMMON-MODE VOLTAGE (Vos vs. Vcm)

\* INPUT/OUTPUT ESD CELLS (ESDin, ESDout)

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

.subckt OPAMP\_VarNo IN+ IN- VCC VEE OUT

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

\* MODEL DEFINITIONS:

.model BB\_SW VSWITCH(Ron=50 Roff=1e12 Von=700e-3 Voff=0)

.model ESD\_SW VSWITCH(Ron=50 Roff=1e12 Von=250e-3 Voff=0)

.model OL\_SW VSWITCH(Ron=1e-3 Roff=1e9 Von=900e-3 Voff=800e-3)

.model OR\_SW VSWITCH(Ron=10e-3 Roff=1e9 Von=1e-3 Voff=0)

.model R\_NOISELESS RES(T\_ABS=-273.15)

\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

I\_OS ESDn MID -18N

I\_B 37 MID -20N

V\_GRp 57 MID 180

V\_GRn 58 MID -180

V\_ISCp 51 MID 40

V\_ISCn 52 MID -40

V\_ORn 45 VCLP -1.2

V11 56 44 0

V\_ORp 43 VCLP 1.2

V12 55 42 0

V4 33 OUT 0

VCM\_MIN 79 VEE\_B 0

VCM\_MAX 80 VCC\_B -1.5

I\_Q VCC VEE 175U

V\_OS 86 37 1.8M

R61 MID 22 R\_NOISELESS 8.001K

C16 22 23 19.89P

R58 23 22 R\_NOISELESS 100MEG

GVCCS2 23 MID VEE\_B MID -992.9M

R57 MID 23 R\_NOISELESS 1

XU3 VCC\_B VEE\_B 24 25 26 27 MID PHASEREV\_0

XU1 VIMON MID CRS CRS\_DIST\_0

C21 28 29 313.8N

C22 30 31 636.6F

R70 31 MID R\_NOISELESS 2.5

R67 31 30 R\_NOISELESS 10K

R66 30 MID R\_NOISELESS 1

XU2 31 MID MID 32 VCCS\_LIM\_ZO\_0

GVCCS4 30 MID 29 MID -4.3

R65 29 MID R\_NOISELESS 3.03K

R64 29 28 R\_NOISELESS 10K

R63 28 MID R\_NOISELESS 1

GVCCS3 28 MID CL\_CLAMP 33 -90

R62 32 MID R\_NOISELESS 1

C29 34 MID 47F

R78 MID 34 R\_NOISELESS 1MEG

GVCCS9 34 MID 35 MID -1U

XU5 36 MID MID CLAMP CRS MID VCCS\_LIM\_2\_EN\_0

C28 38 MID 1P

R77 39 38 R\_NOISELESS 100

C27 40 MID 1P

R76 41 40 R\_NOISELESS 100

R75 MID 42 R\_NOISELESS 1

GVCCS8 42 MID 43 MID -1

R74 44 MID R\_NOISELESS 1

GVCCS7 44 MID 45 MID -1

Xi\_nn ESDn MID FEMT\_0

Xi\_np MID 37 FEMT\_0

Xe\_n ESDp 37 VNSE\_0

C25 35 MID 47F

R69 MID 35 R\_NOISELESS 1MEG

GVCCS6 35 MID VSENSE MID -1U

C20 CLAMP MID 9N

R68 MID CLAMP R\_NOISELESS 1MEG

R44 MID 36 R\_NOISELESS 1MEG

XVCCS\_LIM\_1 46 27 MID 36 VCCS\_LIM\_1\_0

Rdummy MID 33 R\_NOISELESS 25K

Rx 33 32 R\_NOISELESS 250K

R56 MID 47 R\_NOISELESS 1K

C15 47 48 1.592P

R55 48 47 R\_NOISELESS 100MEG

GVCCS1 48 MID VCC\_B MID -100M

R54 MID 48 R\_NOISELESS 1

R49 MID 49 R\_NOISELESS 4.616K

C14 49 50 26.53P

R48 50 49 R\_NOISELESS 100MEG

G\_adjust 50 MID ESDp MID -685.2M

Rsrc MID 50 R\_NOISELESS 1

XIQPos VIMON MID MID VCC VCCS\_LIMIT\_IQ\_0

XIQNeg MID VIMON VEE MID VCCS\_LIMIT\_IQ\_0

C\_DIFF ESDp ESDn 1P

XCL\_AMP 51 52 VIMON MID 53 54 CLAMP\_AMP\_LO\_0

SOR\_SWp CLAMP 55 CLAMP 55 S\_VSWITCH\_1

SOR\_SWn 56 CLAMP 56 CLAMP S\_VSWITCH\_2

XGR\_AMP 57 58 59 MID 60 61 CLAMP\_AMP\_HI\_0

R39 57 MID R\_NOISELESS 1T

R37 58 MID R\_NOISELESS 1T

R42 VSENSE 59 R\_NOISELESS 1M

C19 59 MID 1F

R38 60 MID R\_NOISELESS 1

R36 MID 61 R\_NOISELESS 1

R40 60 62 R\_NOISELESS 1M

R41 61 63 R\_NOISELESS 1M

C17 62 MID 1F

C18 MID 63 1F

XGR\_SRC 62 63 CLAMP MID VCCS\_LIM\_GR\_0

R21 53 MID R\_NOISELESS 1

R20 MID 54 R\_NOISELESS 1

R29 53 64 R\_NOISELESS 1M

R30 54 65 R\_NOISELESS 1M

C9 64 MID 1F

C8 MID 65 1F

XCL\_SRC 64 65 CL\_CLAMP MID VCCS\_LIM\_4\_0

R22 51 MID R\_NOISELESS 1T

R19 MID 52 R\_NOISELESS 1T

XCLAWp VIMON MID 66 VCC\_B VCCS\_LIM\_CLAW+\_0

XCLAWn MID VIMON VEE\_B 67 VCCS\_LIM\_CLAW-\_0

R12 66 VCC\_B R\_NOISELESS 1K

R16 66 68 R\_NOISELESS 1M

R13 VEE\_B 67 R\_NOISELESS 1K

R17 69 67 R\_NOISELESS 1M

C6 69 MID 1F

C5 MID 68 1F

G2 VCC\_CLP MID 68 MID -1M

R15 VCC\_CLP MID R\_NOISELESS 1K

G3 VEE\_CLP MID 69 MID -1M

R14 MID VEE\_CLP R\_NOISELESS 1K

XCLAW\_AMP VCC\_CLP VEE\_CLP VOUT\_S MID 70 71 CLAMP\_AMP\_LO\_0

R26 VCC\_CLP MID R\_NOISELESS 1T

R23 VEE\_CLP MID R\_NOISELESS 1T

R25 70 MID R\_NOISELESS 1

R24 MID 71 R\_NOISELESS 1

R27 70 72 R\_NOISELESS 1M

R28 71 73 R\_NOISELESS 1M

C11 72 MID 1F

C10 MID 73 1F

XCLAW\_SRC 72 73 CLAW\_CLAMP MID VCCS\_LIM\_3\_0

H2 41 MID V11 -1

H3 39 MID V12 1

C12 SW\_OL MID 100P

R32 74 SW\_OL R\_NOISELESS 100

R31 74 MID R\_NOISELESS 1

XOL\_SENSE MID 74 40 38 OL\_SENSE\_0

S1 28 29 SW\_OL MID S\_VSWITCH\_3

H1 75 MID V4 1K

S7 VEE OUT VEE OUT S\_VSWITCH\_4

S6 OUT VCC OUT VCC S\_VSWITCH\_5

R11 MID 76 R\_NOISELESS 1T

R18 76 VOUT\_S R\_NOISELESS 100

C7 VOUT\_S MID 10P

E5 76 MID OUT MID 1

C13 VIMON MID 10P

R33 75 VIMON R\_NOISELESS 100

R10 MID 75 R\_NOISELESS 1T

R47 77 VCLP R\_NOISELESS 100

C24 VCLP MID 100P

E4 77 MID CL\_CLAMP MID 1

R46 MID CL\_CLAMP R\_NOISELESS 1K

G9 CL\_CLAMP MID CLAW\_CLAMP MID -1M

R45 MID CLAW\_CLAMP R\_NOISELESS 1K

G8 CLAW\_CLAMP MID 34 MID -1M

R43 MID VSENSE R\_NOISELESS 1K

G15 VSENSE MID CLAMP MID -1M

C4 46 MID 1F

R9 46 78 R\_NOISELESS 1M

R7 MID 79 R\_NOISELESS 1T

R6 80 MID R\_NOISELESS 1T

R8 MID 78 R\_NOISELESS 1

XVCM\_CLAMP 26 MID 78 MID 80 79 VCCS\_EXT\_LIM\_0

E1 MID 0 81 0 1

R89 VEE\_B 0 R\_NOISELESS 1

R5 82 VEE\_B R\_NOISELESS 1M

C3 82 0 1F

R60 81 82 R\_NOISELESS 1MEG

C1 81 0 1

R3 81 0 R\_NOISELESS 1T

R59 83 81 R\_NOISELESS 1MEG

C2 83 0 1F

R4 VCC\_B 83 R\_NOISELESS 1M

R88 VCC\_B 0 R\_NOISELESS 1

G17 VEE\_B 0 VEE 0 -1

G16 VCC\_B 0 VCC 0 -1

R\_PSR 84 24 R\_NOISELESS 1K

G\_PSR 24 84 47 22 -1M

R2 25 ESDn R\_NOISELESS 1M

R1 84 85 R\_NOISELESS 1M

R\_CMR 86 85 R\_NOISELESS 1K

G\_CMR 85 86 49 MID -1M

C\_CMn ESDn MID 2P

C\_CMp MID ESDp 2P

R53 ESDn MID R\_NOISELESS 1T

R52 MID ESDp R\_NOISELESS 1T

R35 IN- ESDn R\_NOISELESS 10M

R34 IN+ ESDp R\_NOISELESS 10M

.MODEL S\_VSWITCH\_1 VSWITCH (RON=10M ROFF=1T VON=10M VOFF=0)

.MODEL S\_VSWITCH\_2 VSWITCH (RON=10M ROFF=1T VON=10M VOFF=0)

.MODEL S\_VSWITCH\_3 VSWITCH (RON=1M ROFF=1T VON=500M VOFF=100M)

.MODEL S\_VSWITCH\_4 VSWITCH (RON=50 ROFF=1T VON=500M VOFF=450M)

.MODEL S\_VSWITCH\_5 VSWITCH (RON=50 ROFF=1T VON=500M VOFF=450M)

.ENDS LMX24\_LM2902

\*

.SUBCKT PHASEREV\_0 VCC VEE VIN+ VIN- VOUT+ VOUT- MID

E1 VOUT+ MID VALUE={IF(V(VIN+,MID)<V(VEE,MID)-0.3,V(VCC,MID),V(VIN+,MID))}

E2 VOUT- MID VALUE={IF(V(VIN-,MID)<V(VEE,MID)-0.3,V(VCC,MID),V(VIN-,MID))}

.ENDS

\*

.SUBCKT CRS\_DIST\_0 VIMON MID OUT

V1 VREF MID -40M

ESHF VSHF MID VIMON VREF 1

GZC MID ZC VALUE = {SGN(V(VSHF,MID))}

R1 ZC MID 1

C1 ZC MID 2U

GCR MID OUT VALUE = {IF((ABS(V(ZC,MID))<=0.9),0,1)}

R2 OUT MID 1

.ENDS

\*

.SUBCKT VCCS\_LIM\_ZO\_0 VC+ VC- IOUT+ IOUT-

.PARAM GAIN = 4E3

.PARAM IPOS = 1E6

.PARAM INEG = -1E6

G1 IOUT+ IOUT- VALUE={LIMIT(GAIN\*V(VC+,VC-),INEG,IPOS)}

.ENDS

\*

.SUBCKT VCCS\_LIM\_2\_EN\_0 VC+ VC- IOUT+ IOUT- EN MID

.PARAM GAIN = 8.4E-4

.PARAM IPOS = 0.0048

.PARAM INEG = -0.0048

G1 IOUT+ IOUT- VALUE={LIMIT(GAIN\*V(EN,MID)\*V(VC+,VC-),INEG,IPOS)}

.ENDS

\*

.SUBCKT FEMT\_0 1 2

.PARAM FLWF=1E-3

.PARAM NLFF=500

.PARAM NVRF=500

.PARAM GLFF={PWR(FLWF,0.25)\*NLFF/1164}

.PARAM RNVF={1.184\*PWR(NVRF,2)}

.MODEL DVNF D KF={PWR(FLWF,0.5)/1E11} IS=1.0E-16

I1 0 7 10E-3

I2 0 8 10E-3

D1 7 0 DVNF

D2 8 0 DVNF

E1 3 6 7 8 {GLFF}

R1 3 0 1E9

R2 3 0 1E9

R3 3 6 1E9

E2 6 4 5 0 10

R4 5 0 {RNVF}

R5 5 0 {RNVF}

R6 3 4 1E9

R7 4 0 1E9

G1 1 2 3 4 1E-6

.ENDS

\*

.SUBCKT VNSE\_0 1 2

.PARAM FLW=10

.PARAM NLF=80

.PARAM NVR=35

.PARAM GLF={PWR(FLW,0.25)\*NLF/1164}

.PARAM RNV={1.184\*PWR(NVR,2)}

.MODEL DVN D KF={PWR(FLW,0.5)/1E11} IS=1.0E-16

I1 0 7 10E-3

I2 0 8 10E-3

D1 7 0 DVN

D2 8 0 DVN

E1 3 6 7 8 {GLF}

R1 3 0 1E9

R2 3 0 1E9

R3 3 6 1E9

E2 6 4 5 0 10

R4 5 0 {RNV}

R5 5 0 {RNV}

R6 3 4 1E9

R7 4 0 1E9

E3 1 2 3 4 1

.ENDS

\*

.SUBCKT VCCS\_LIM\_1\_0 VC+ VC- IOUT+ IOUT-

.PARAM GAIN = 1E-4

.PARAM IPOS = .5

.PARAM INEG = -.5

G1 IOUT+ IOUT- VALUE={LIMIT(GAIN\*V(VC+,VC-),INEG,IPOS)}

.ENDS

\*

.SUBCKT VCCS\_LIMIT\_IQ\_0 VC+ VC- IOUT+ IOUT-

.PARAM GAIN = 1E-3

G1 IOUT- IOUT+ VALUE={IF( (V(VC+,VC-)<=0),0,GAIN\*V(VC+,VC-) )}

.ENDS

\*

.SUBCKT CLAMP\_AMP\_LO\_0 VC+ VC- VIN COM VO+ VO-

.PARAM G=1

GVO+ COM VO+ VALUE = {IF(V(VIN,COM)>V(VC+,COM),((V(VIN,COM)-V(VC+,COM))\*G),0)}

GVO- COM VO- VALUE = {IF(V(VIN,COM)<V(VC-,COM),((V(VC-,COM)-V(VIN,COM))\*G),0)}

.ENDS

\*

.SUBCKT CLAMP\_AMP\_HI\_0 VC+ VC- VIN COM VO+ VO-

.PARAM G=10

GVO+ COM VO+ VALUE = {IF(V(VIN,COM)>V(VC+,COM),((V(VIN,COM)-V(VC+,COM))\*G),0)}

GVO- COM VO- VALUE = {IF(V(VIN,COM)<V(VC-,COM),((V(VC-,COM)-V(VIN,COM))\*G),0)}

.ENDS

\*

.SUBCKT VCCS\_LIM\_GR\_0 VC+ VC- IOUT+ IOUT-

.PARAM GAIN = 1

.PARAM IPOS = 0.013

.PARAM INEG = -0.013

G1 IOUT+ IOUT- VALUE={LIMIT(GAIN\*V(VC+,VC-),INEG,IPOS)}

.ENDS

\*

.SUBCKT VCCS\_LIM\_4\_0 VC+ VC- IOUT+ IOUT-

.PARAM GAIN = 1

.PARAM IPOS = 1.04

.PARAM INEG = -1.04

G1 IOUT+ IOUT- VALUE={LIMIT(GAIN\*V(VC+,VC-),INEG,IPOS)}

.ENDS

\*

.SUBCKT VCCS\_LIM\_CLAW+\_0 VC+ VC- IOUT+ IOUT-

G1 IOUT+ IOUT- TABLE {ABS(V(VC+,VC-))} =

+(0, 1.17E-03)

+(0.0046251, 1.17E-3)

+(0.15716, 1.21E-3)

+(1.3309, 1.28E-3)

+(35.075, 2.12E-3)

+(35.680, 2.55E-3)

+(36.033, 2.84E-3)

+(37.416, 7.97E-3)

.ENDS

\*

.SUBCKT VCCS\_LIM\_CLAW-\_0 VC+ VC- IOUT+ IOUT-

G1 IOUT+ IOUT- TABLE {ABS(V(VC+,VC-))} =

+(0.010, 2.50E-5)

+(0.070, 2.50E-5)

+(0.090, 5.80E-4)

+(0.100, 6.06E-4)

+(0.760, 7.14E-4)

+(1.440, 7.62E-4)

+(8.000, 1.10E-3)

+(13.60, 1.55E-3)

+(15.45, 1.75E-3)

+(17.26, 2.15E-3)

+(18.87, 2.94E-3)

+(21.58, 4.50E-3)

+(25.53, 1.02E-2)

.ENDS

\*

.SUBCKT VCCS\_LIM\_3\_0 VC+ VC- IOUT+ IOUT-

.PARAM GAIN = 1

.PARAM IPOS = 0.435

.PARAM INEG = -0.435

G1 IOUT+ IOUT- VALUE={LIMIT(GAIN\*V(VC+,VC-),INEG,IPOS)}

.ENDS

\*

.SUBCKT OL\_SENSE\_0 COM SW+ OLN OLP

GSW+ COM SW+ VALUE = {IF((V(OLN,COM)>10E-3 | V(OLP,COM)>10E-3),1,0)}

.ENDS

\*

.SUBCKT VCCS\_EXT\_LIM\_0 VIN+ VIN- IOUT- IOUT+ VP+ VP-

.PARAM GAIN = 1

G1 IOUT+ IOUT- VALUE={LIMIT(GAIN\*V(VIN+,VIN-),V(VP-,VIN-), V(VP+,VIN-))}

.ENDS

\*