

LTspice を用いたアナログ回路 II の再現

第 2 日目の内容

電通大・先進理工

坂本克好

[目的と内容について]

この文章の目的は、電気通信大学・先進理工学科におけるアナログ回路 II の第 2 日目の実験内容を LTspice を用いて再現することである。LTspice を用いることで、これまでは、動作の理解が困難であった波形観察の動作確認が PC 上で確認できる。LTspice を用いることで、動作の理解と実験の考察の助けになると期待される。

LTspice の使用方法などの詳細は、各自で調査する必要がある。また、実効値、最大値の計算や電圧制御電源などの SPICE 命令も多用しているので、ある程度の SPICE 知識は必要である。

この文章は、以下の 3 章からなる。

- 1-1) ヒステリシスコンパレータの入出力特性
- 1-2) ヒステリシスコンパレータの入出力波形観察
- 1-3) 模擬ノイズ重畳波形とヒステリシスコンパレータ回路について
- 2-1) 絶対値回路の入出力特性
- 2-2) 絶対値回路の入出力波形観察

課題について

付録 A、B

実験内容の詳細については、電気通信大学発行の実験テキストを参照すること。

最後に、

LTspice を公開している linear technology 社には、このような有用なソフトを無料で公開していることに感謝いたします。

また、Web 上で LTspice を用いた回路の情報を公開しているサイトの皆様にも感謝いたします。有難うございました。

1-1) ヒステリシスコンパレータの入出力特性

[目的] ヒステリシスコンパレータ回路の入出力特性の動作を確認する

[手順と方法] 回路図の Fig.22 を作成する。

OP アンプには、TL074 を使用する。

さらに、

ダイオードは、1S1588 を用いるために、

Model 命令でダイオードの

デバイスパラメータを指定する。

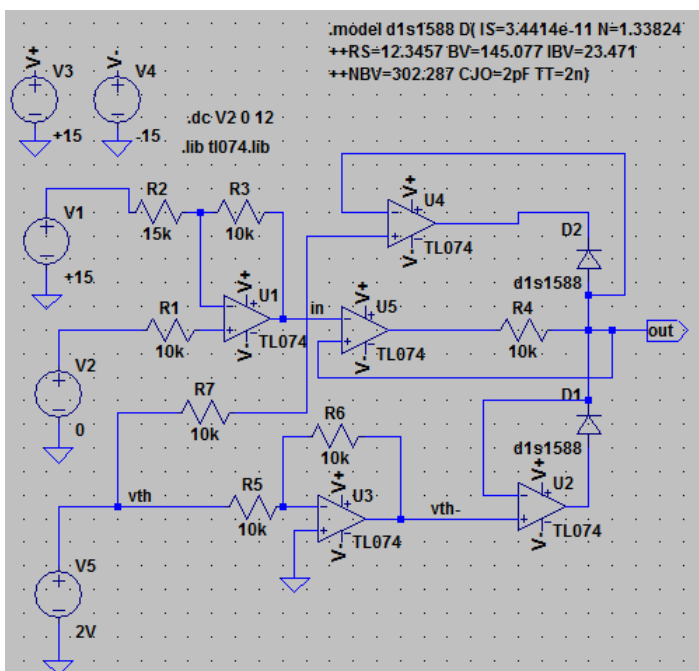


Fig.1 回路図

[解析結果]

初めに、閾値電圧 $V_{th}=2V$ とする。

信号電圧源：V2 を上昇させる変化を設定する。

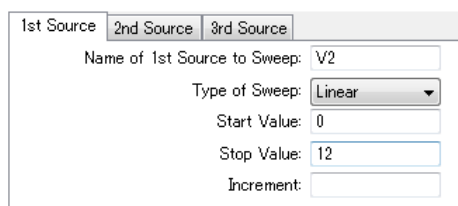


Fig.2 Sweep 設定

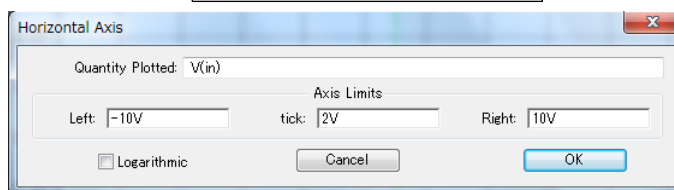


Fig.3 軸の設定

((注意))この計算には、時間が掛かります！

Out 端子をクリックしてグラフを表示する。

このグラフの横軸をクリックする。

表示されたウインドの Quantity Plotted 欄に $V(in)$ を入力する。

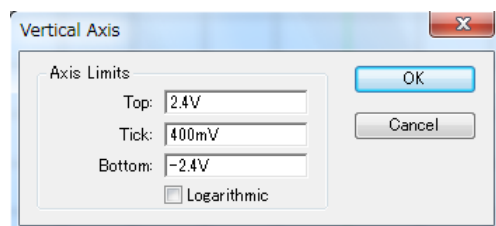


Fig.4 縦軸設定

表示される縦軸の範囲を変更する。

右のグラフが得られる。

入力 $V(in)$ が $2V$ で、出力が反転する。

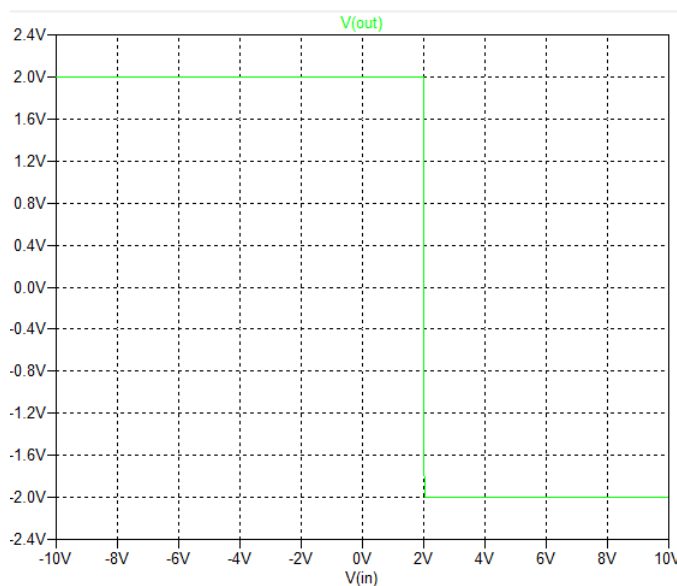


Fig.5 入出力のグラフ

次に、

信号電圧源：V2 を減少させる変化を設定する。

+12V から 0V まで減少させる設定に変更する。

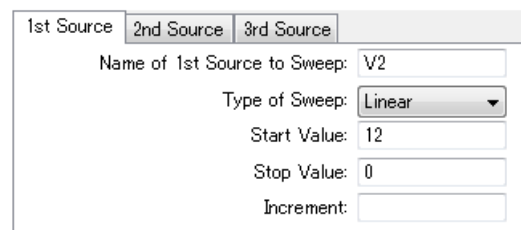


Fig.6 Sweep 設定

Out 端子をクリックしてグラフを表示する。

このグラフの横軸をクリックする。

表示されたウインドの **Quantity Plotted** 欄に
V(in)を入力する。

範囲については変更しない。

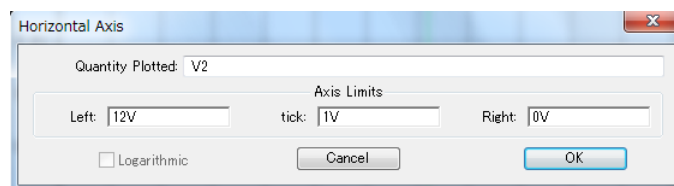


Fig.7 軸の設定

表示される縦軸の範囲を変更する。

右のグラフが得られる。

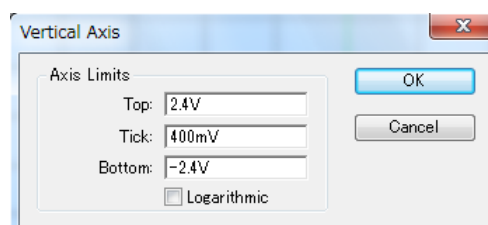
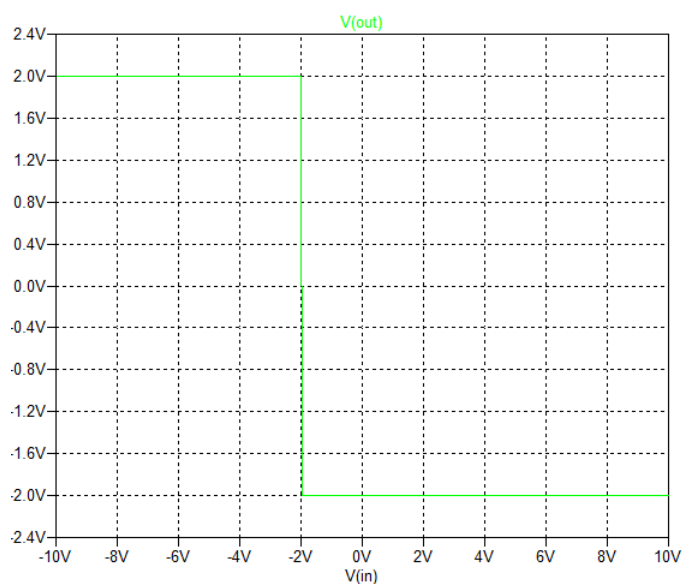


Fig.8 縦軸設定

右のグラフが表示される。

Vth=-2V の時、出力が反転することが
わかる。



最後に

上昇と下降を同時表示させることにする。

Fig.9 入出力のグラフ

-10 から+10V まで変化させ、
そして、+10V から-10V まで変化
させることで、ヒステリシスを明確に
確認するために、上昇と下降を
同時に観察する。

この解析には、任意電圧制御電圧源 Bv
を使用する。

信号源の電源 : V2 の電圧により
出力電圧が変化する電源 B1 を定義する。
出力には、If 構文を使用する。
以下の様に設定する。

$\text{If}(V(V2) < 12, V(V2), 24 - V(V2))$

解析には、DC sweep を実行する。
Sweep 範囲は、0 から 24V にする。
(注意)

Step が小さいと時間が掛かります

横軸が V2 の電圧である。
青色が出力電圧 V(out)を示し、
緑色が入力電圧 V(in)を示す。

上昇時には、入力 V(in)が 2V で
出力 V(out)が-2V に変化して、
下降時には、入力 V(in)が-2V で、
出力 V(out)が反転して、2V になる
ことがわかる。

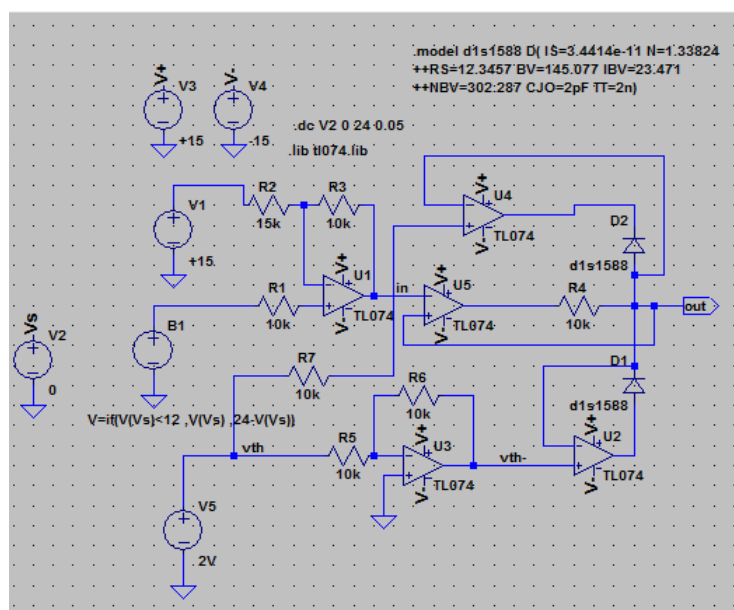


Fig.10 回路図

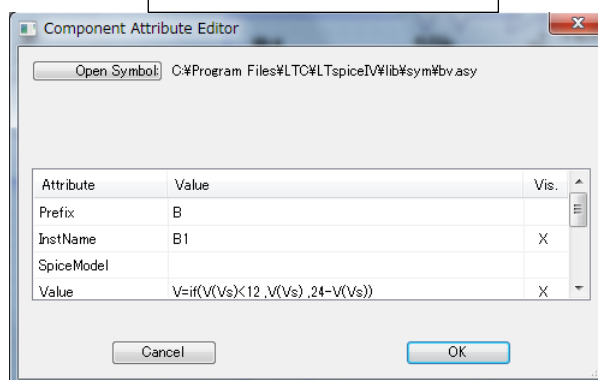


Fig.11 Bv の設定

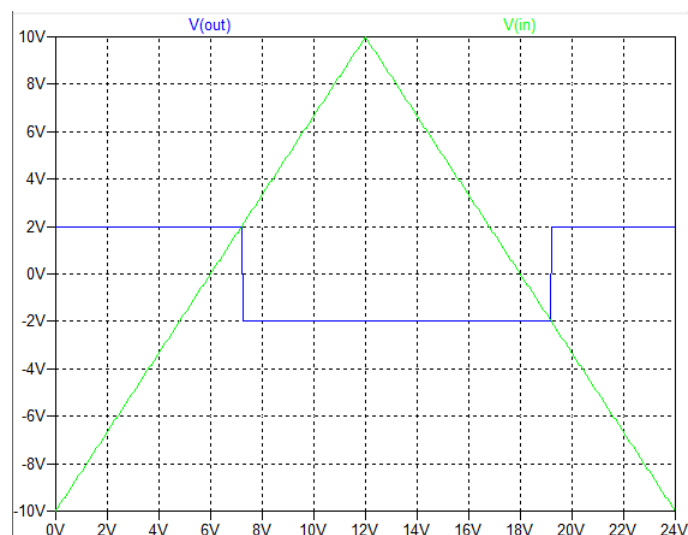


Fig.12 入出力のグラフ

1-2) ヒステリシスコンパレータの入出力波形観察

[目的]

ヒステリシスコンパレータ回路の

入出力波形の観察をする

[手順と方法]

回路図の Fig.23 を作成する。

OP アンプには、TL074 を使用する。

さらに、

ダイオード 1S1588 を用いるために、

Model 命令でダイオードの

デバイスパラメータを指定する。

信号源には、V2 を用いる。

V2 に直列接続した電源 V1 は、

Offset 電圧用である。

閾値電圧は、電源 V5 で設定する。

信号源 V2 の設定について、

右クリックして Attribute Editor

を開く。Value 欄に以下の命令を

記述する。

PWL 電源として、

Value_scale_factor で大きさを設定する。

この例では、3 倍する。

Time_Scale_factor で、時間の縮尺を変える。

この例では、時間を 0.1m 倍する。

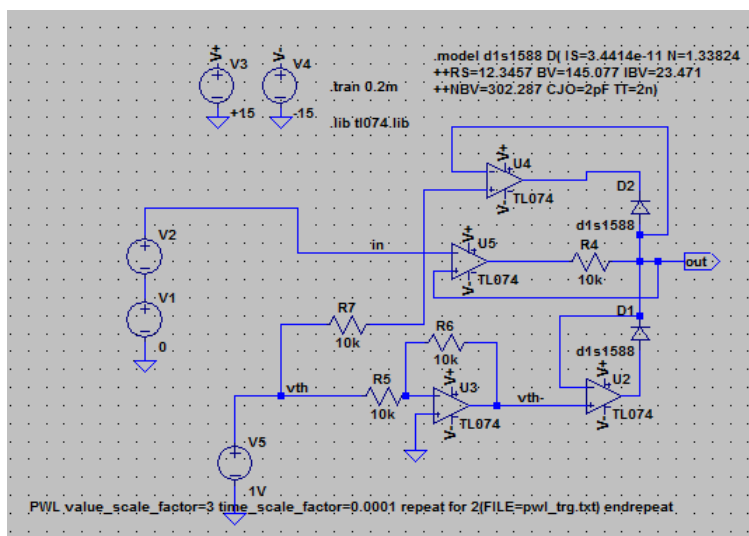


Fig.1 回路図

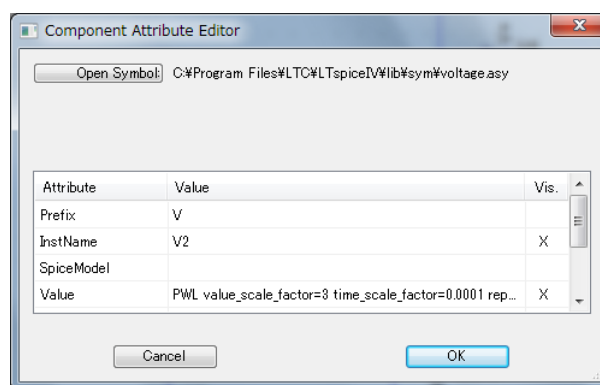


Fig.2 電源設定ウインド

PWL value_scale_factor=3 time_scale_factor=0.0001 repeat for 2(FILE=pwl_trg.txt) endrepeat

Fig.3 設定内容

repeat for～ endrepeat で繰り返し数を設定する。

また、FILE で設定ファイルを読み込む。

FILE の pwl_trg.txt の内容を右に示す。

このファイルでは、正負と変化する三角波を設定している。

周期が 1 秒で、最大値が 1 V になるように設定する。

このように設定することで、ファイル内容を変更せずに、

オプションの Scale_factor で大きさや周期を命令で変更できる。

このファイルは、回路と同じフォルダに保存する。

The screenshot shows the content of the pwl_trg.txt file. It contains a table with two columns: 'ファイル(F)' and '編集(E)'. The data is as follows:

ファイル(F)	編集(E)
0	0
0.25	1
0.5	0
0.75	-1
1	0

Fig.4 pwl_trg の内容

解析方法には、過渡解析を実行する。
計算範囲は、
周期を考慮して設定しなければならない。

[解析結果]

解析を実行して、出力 $V(out)$ と
入力 $V(in)$ をクリックする。
右のグラフが表示される。

ヒステリシスの閾値電圧 $V_{th}=1V$
なので、入力が $\pm 1V$ のときに、
出力が反転することが確認できる。
さらに、反転時にスパイクノイズが
発生することが確認できる。

1 秒の 0.0001 倍の 100us の周期で
変化していることが確認できる。

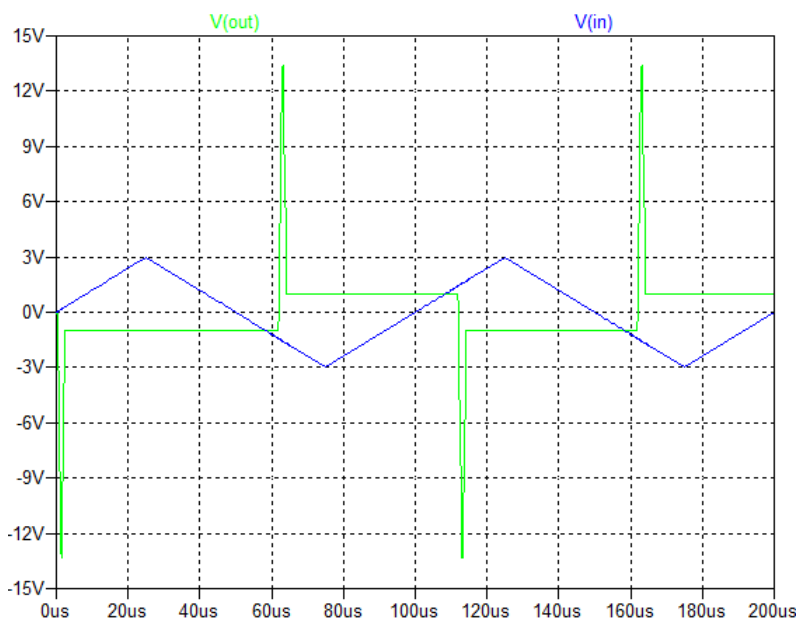


Fig.5 入出力波形

実験でも同様に、
スパイクノイズが発生することが確認できる。
実験で確認せよ。

注意点として、
実験では、オシロスコープのタイミングにより正負のノイズが確認できない場合がある。
また、最大値と最小値の値が正確に得られないことがある。

実験課題により、
信号源と offset の値を変化させることで実験は再現できます。

1-3) 模擬ノイズ重畳波形とヒステリシスコンパレータ回路について

[目的] 模擬ノイズ重畳波形(Sin 波+三角波)を用いたコンパレータ動作検証する。

動作の検証により理解を深めて、考察のヒントにする。

[方法] 三角波をノイズと見なしてコンパレータ動作を確認する。

基本回路となる Fig22 を使用する。

Sine 波を 20Hz で $V_{pp}=6V$ にする。

この信号に、ノイズとして三角波を加算する。

三角波を 2V で、 $f=1kHz$ とする。

大きさは、変化させる。

この 2 個の信号を反転加算回路で合成する。

[手順]

回路図を右に

示す。

加算回路を用い
合成波形を作る。

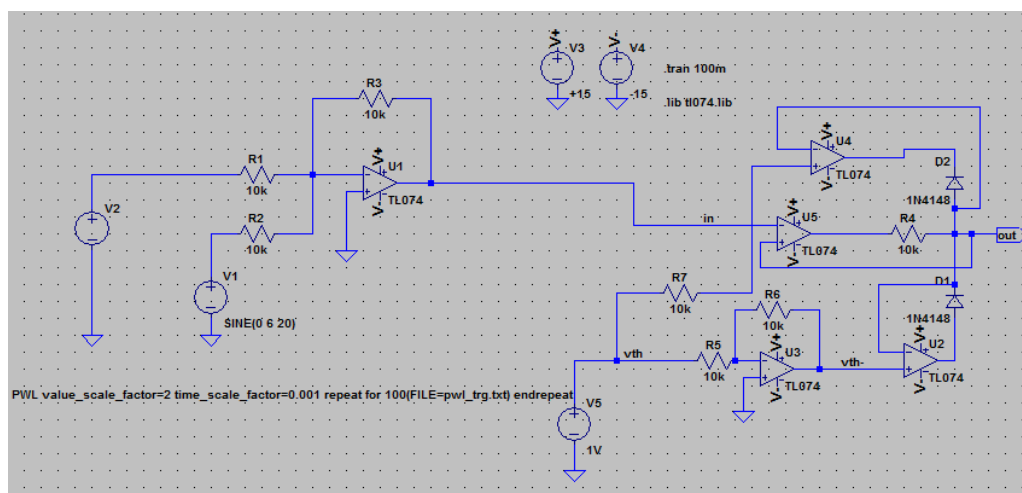


Fig.1 回路図

電源 : V1 が

メインの Sine 波を発生する。

さらに、電源 : V2 で三角波を定義する。

三角波は、ファイルから読み出す。

PWL value_scale_factor=2 time_scale_factor=0.001 repeat for 100(FILE=pwl_trg.txt) endrepeat

Fig.2 PWL 設定

解析方法には、Transient 解析を実行する。

Sine 波は、

20Hz なので 2 周期分表示するために 100msec まで計算する。

[結果]

計算結果を以下に示す。

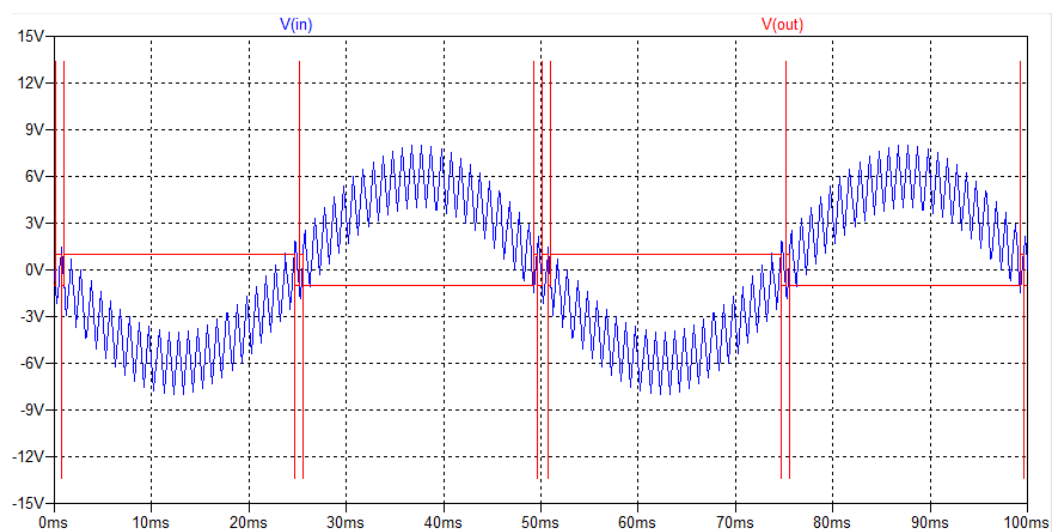


Fig.3 $V(in), V(out)$ のグラフの関係

$t = 50\text{msec}$ 近辺を拡大する。

ヒステリシスが存在していることが確認できる。

出力が反転する入力レベルが異なることが、グラフから確認できる。

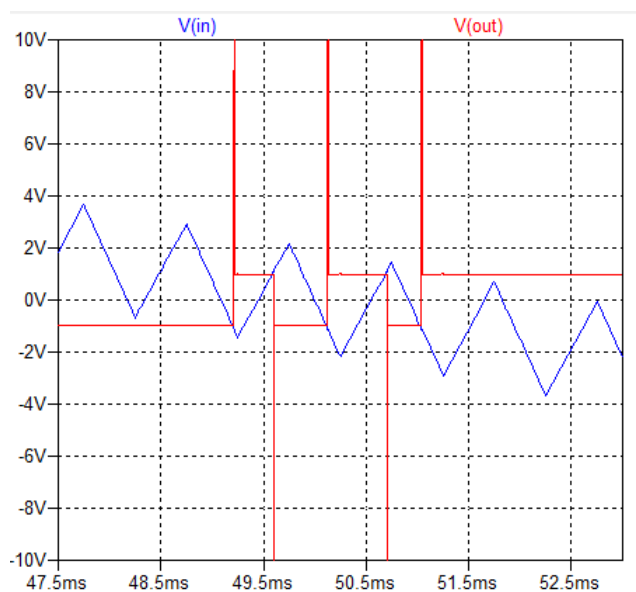


Fig.4 拡大したグラフ

出力の OP アンプ: U5 の feedback を
GND に接続する。

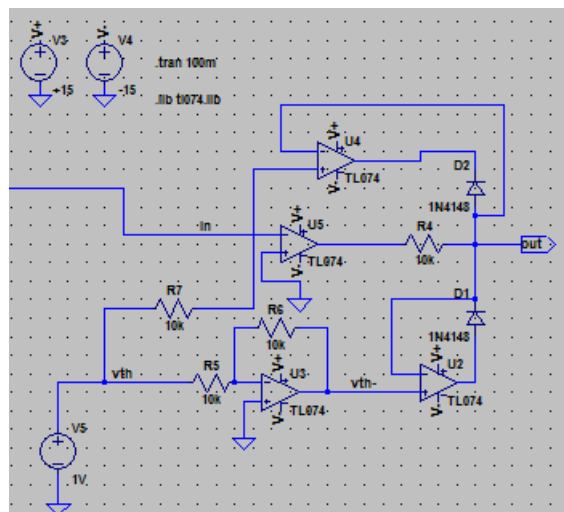


Fig.5 回路図

同様に、過渡解析を実行する。

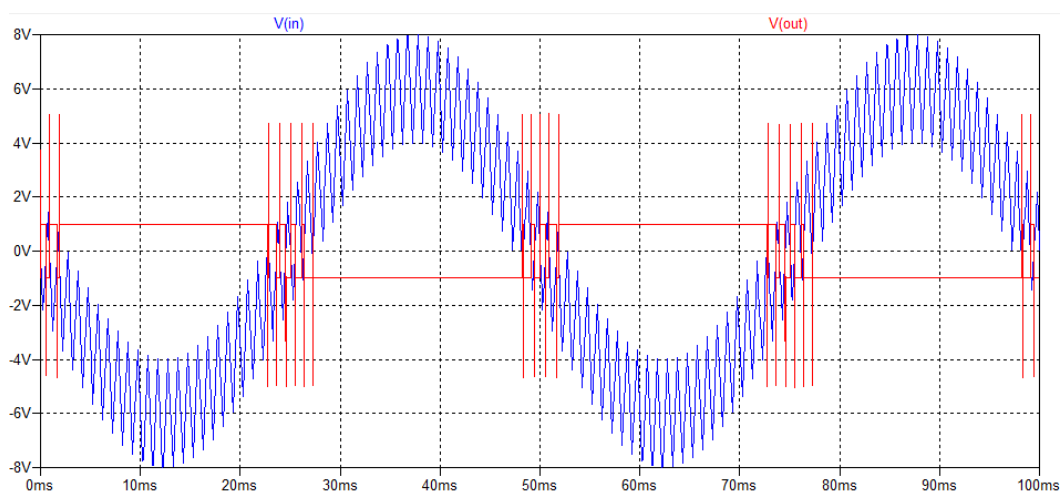


Fig.6 V(in),V(out)のグラフの関係

$t = 50\text{msec}$ 近辺を拡大する。

閾値の 0V を横切るときに、
出力が反転していることが確認できる。

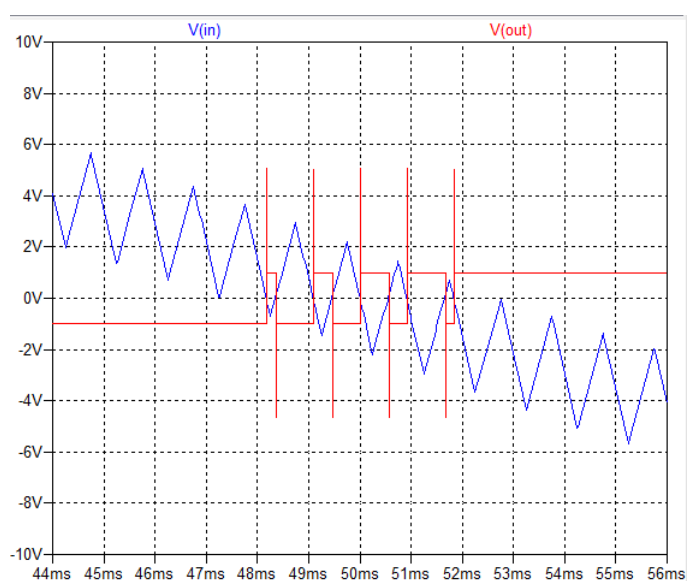


Fig.7 拡大したグラフ

次に、ノイズの大きさを 0.5V にする。

```
PWL value_scale_factor=0.5 time_scale_factor=0.001 repeat for 100(FILE=pwl_trg.txt) endrepeat
```

Fig.8 PWL 設定

Feedback 回路なしのときの
計算結果を示す。

閾値の 0V を横切るときに
出力が反転している。

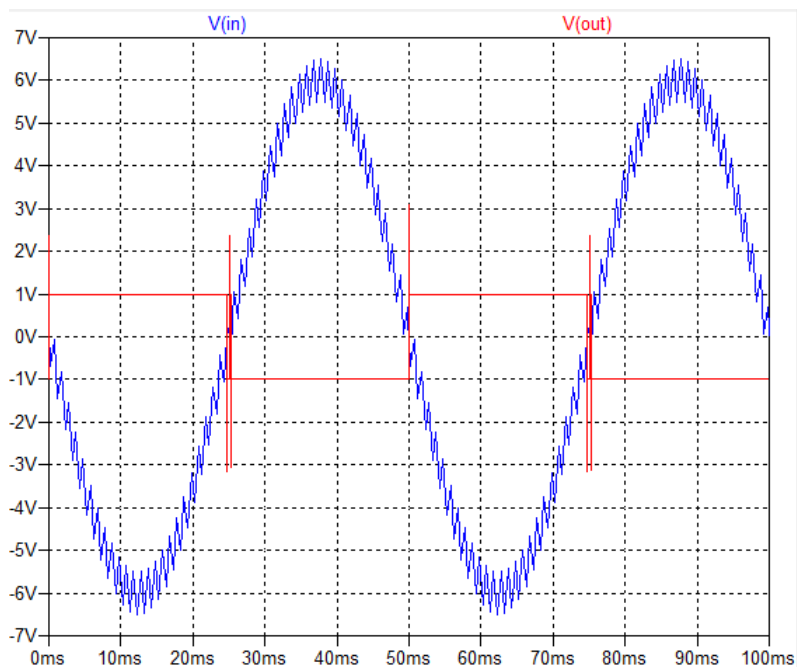


Fig.9 V(in),V(out)のグラフの関係

次に、

Feedback 回路ありの
解析結果を示す。

このときは、出力のノイズが
減少していることがわかる。

しかし、
スパイクノイズは発生する。

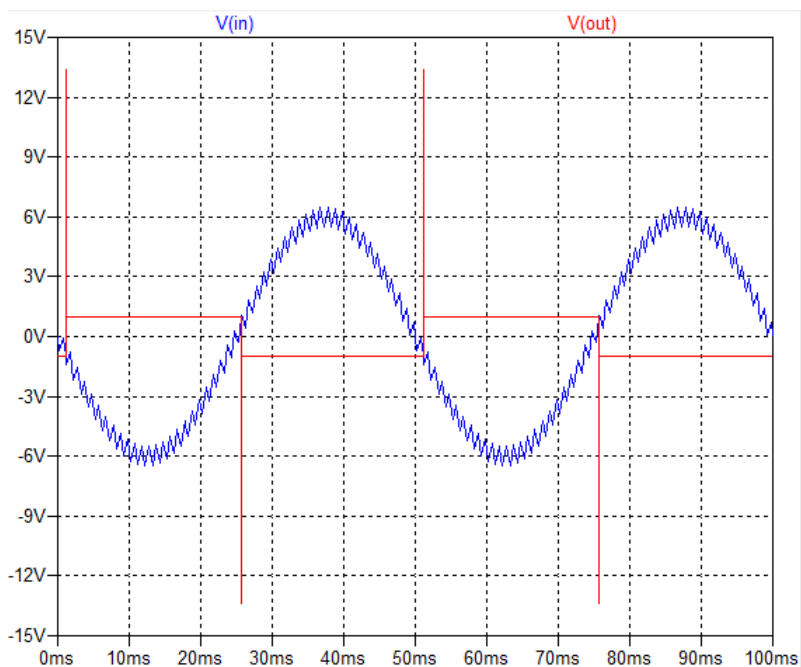


Fig.10 V(in),V(out)のグラフの関係

2-1) 絶対値回路の入出力特性

[目的]

絶対値回路の入出力特性の動作を確認する。

[手順と方法]

指導書の回路図 Fig.26 を作成する。

OP アンプには、TL074 を使用する。

さらに、

ダイオードは、1S1588 を用いるために、

Model 命令でダイオードの

デバイスパラメータを指定する。

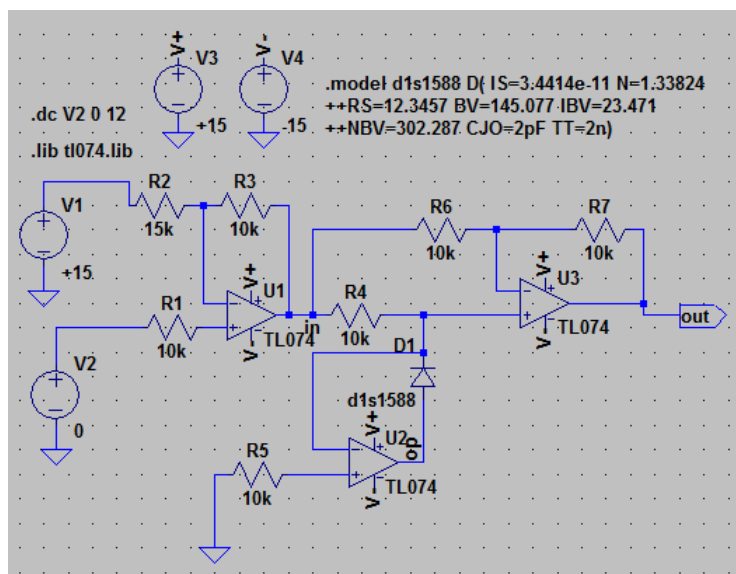


Fig.1 回路図

閾値電圧の値を 0V(GND)にする。

((注意)) 抵抗 R5 と GND 間に閾値電源が接続されます。

解析は、DC 解析を実行する。

[解析結果]

解析を実行する。

入力 V(in)と出力 V(out)をクリックすると、右のグラフが得られる。

横軸は、電源 V2 の値である。

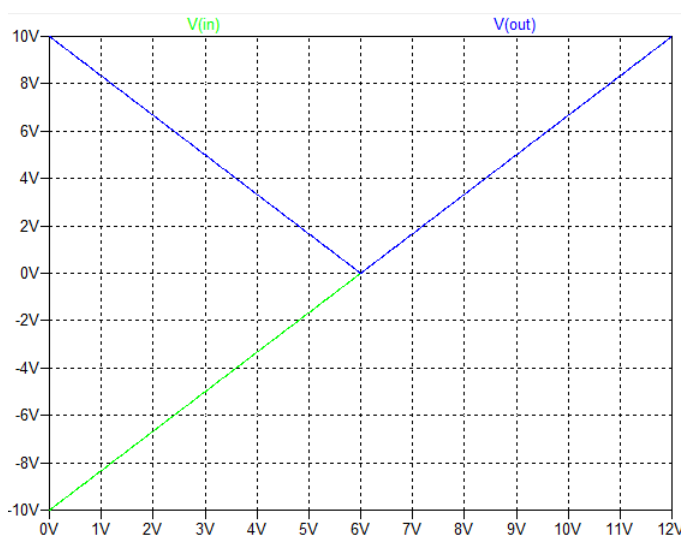


Fig.2 V2 と V(in)V(out)のグラフ

横軸を入力に変更するために、

横軸をクリックして、右のウインドを開く。このウインドで QuantityPlotted 欄

に V(in)を入力する。

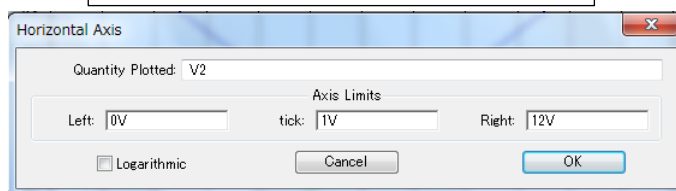


Fig.3 横軸設定ウインド

OK ボタンをクリックすると、

次のグラフが表示される。

右のような横軸が入力 $V(in)$ で、縦軸が $V(out)$ のグラフが表示されます。

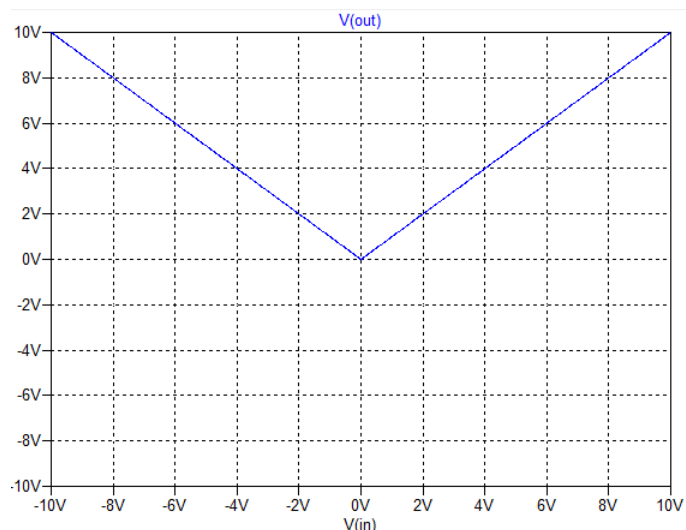


Fig.4 $V(in)$ と $V(out)$ のグラフ

次に、閾値電圧 $Vth(NodeV5)=1V$ に変更したときの入出力特性を計算する。

右図の様に、 $V5$ を $1V$ に変更する。

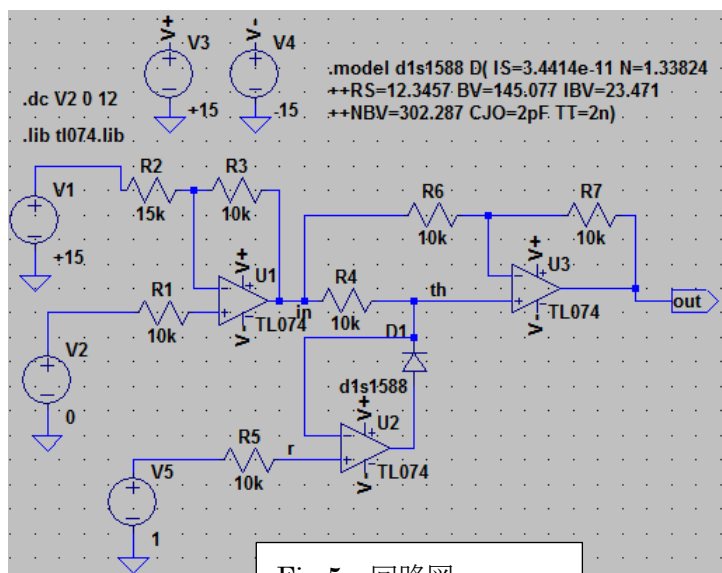


Fig.5 回路図

DC 解析を実行する。

前の計算と同様に、入出力のグラフを表示させる。

出力 $v(out)$ をクリックして、グラフ表示させ、横軸の表示を $V(in)$ に変更する。

入力 $V(in)$ が $1V$ 以下で、出力 $V(out)$ が反転していることがわかる。

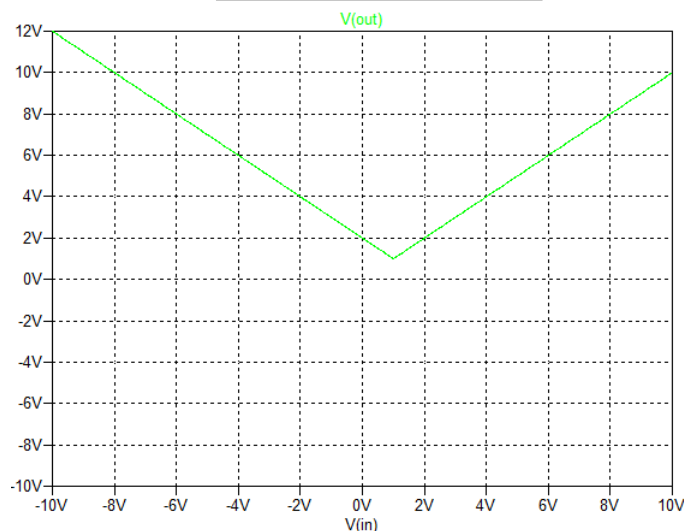


Fig.6 $V(in)$ と $V(out)$ のグラフ

2-2) 絶対値回路の入出力波形観察

[目的]

絶対値回路の入出力波形観察を確認する。

[手順と方法]

指導書の回路図 Fig.27 を作成する。

OP アンプには、TL074 を使用する。

さらに、

ダイオードは、1S1588 を用いるために、

Model 命令でダイオードの

デバイスパラメータを指定する。

閾値電圧：Vth の値を 0V にする。

入力信号源：V2 には、1kHz の正弦波を

設定する。振幅を変数 ampl と定義する。

この振幅を step 命令で 1V,2V,4V とリスト変化させる。

また、meas 命令を用いて、

出力 v(out) の平均値を計算する。

解析方法には、過渡解析を実行して波形の時間変化を観察する。

[解析結果]

解析を実行する。

V(out) をクリックすると、右のグラフが表示される。

入力 V(in) の負の部分が反転して、絶対値回路として動作していることが確認できる。

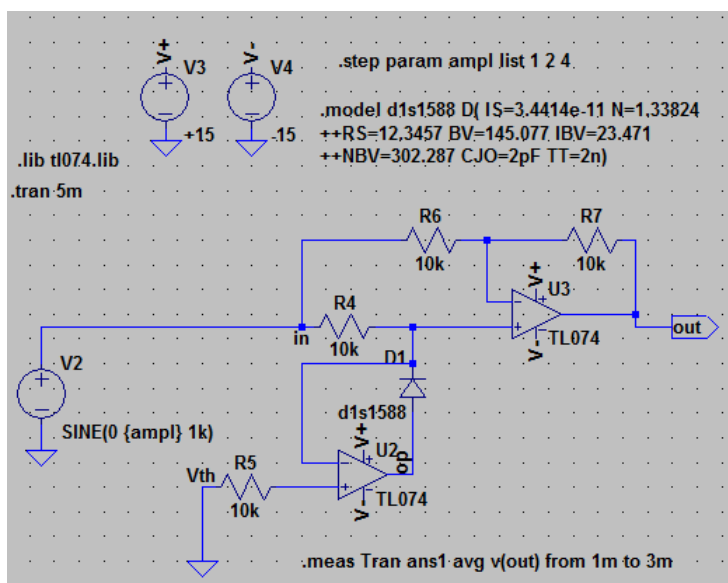


Fig.1 回路図

`.step param ampl list 1 2 4`

Fig.2 step 命令

`.meas Tran ans1 avg v(out) from 1m to 3m`

Fig.3 meas 命令

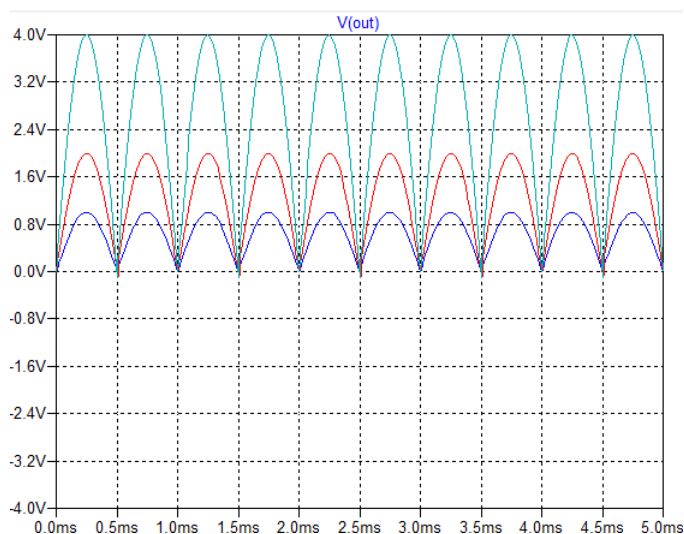


Fig.4 V(out)のグラフ

2msec から 2.5msec 辺りを拡大する。
 右図において、正から負に変化する部分に
 波形の乱れが確認できる。

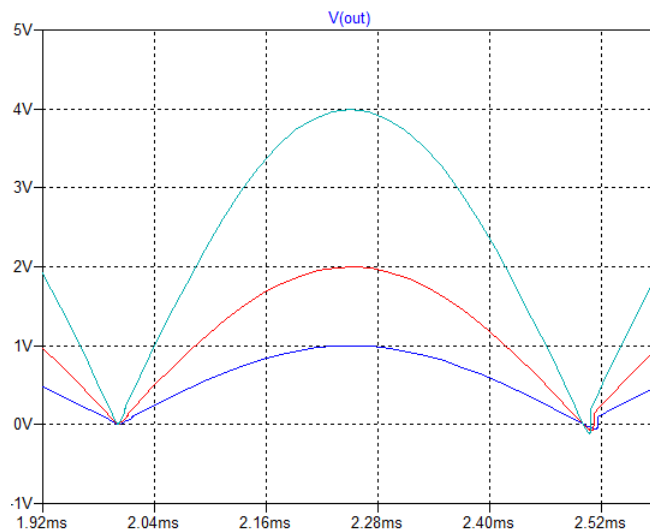


Fig.5 V(out)の拡大

次に、横軸を step 変化した ampl として、
 縦軸を平均値 avg(V(out))のグラフを表示する。
 回路図のメニューの VIEW 中の
 SPICE ErrorLog を選択する。

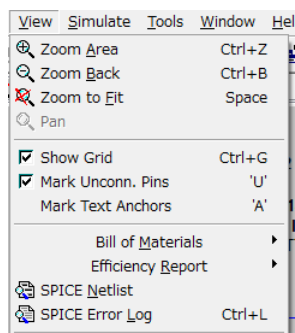


Fig.6 View メニュー

```
.step ampl=1
.step ampl=2
.step ampl=4
```

Measurement: ans1
 step
 1
 2
 3

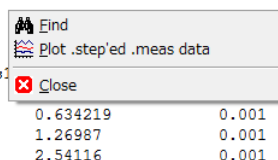


Fig.7 右クリックメニュー

SPICE Error Log ファイルが開くので、
 このファイル上で右クリックして、メニューを開く。
 このメニューの”Plot .step'ed .meas data”を選択する。

右のグラフが表示されます。
 横軸が ampl になり、縦軸が出力 V(out)の
 平均値になります。

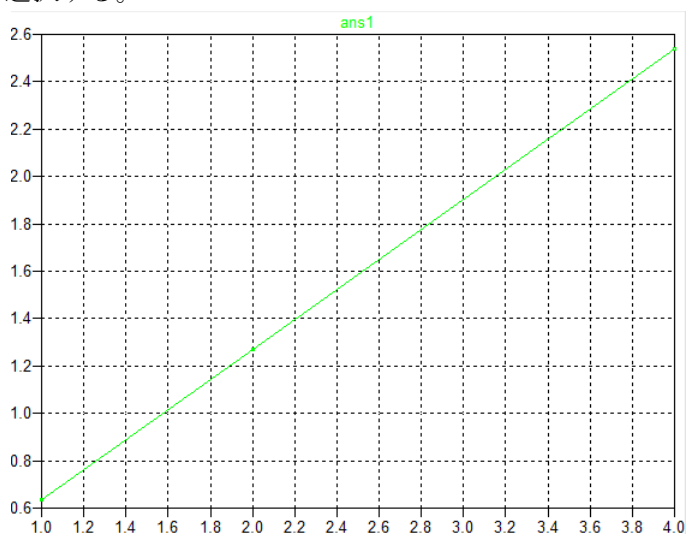


Fig.8 ampl と平均値のグラフ

次に、

閾値電圧は **V5** で設定する。

その電圧 **V5(Vth)=1V** に設定する。

残りの部分の変更なしで再計算する。

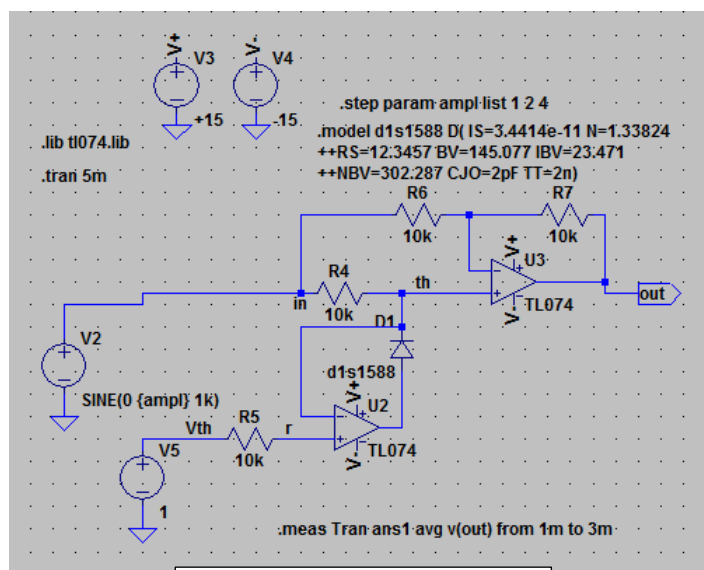


Fig.9 回路図

解析を実行する。

出力 **V(out)** をクリックすると、

右のグラフが表示される。

全体が **2V** シフトしていることがわかり、

さらに、**1V** で絶対値回路動作している。

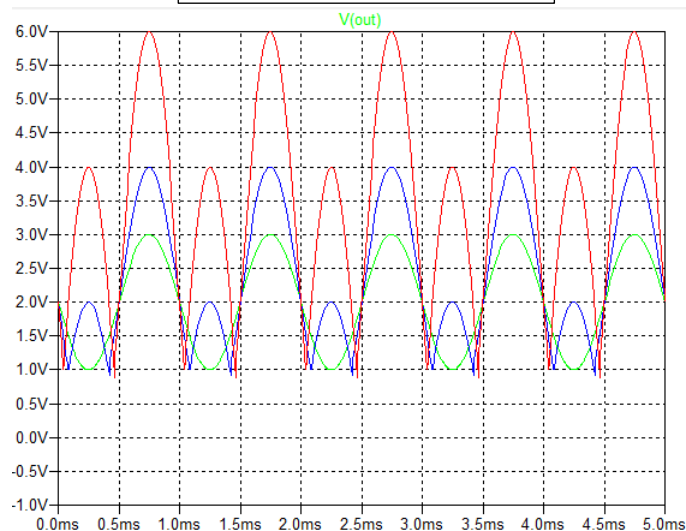


Fig.10 **V(out)** のグラフ

直前に実行した同様の手続きで、

横軸が **ampl** で、縦軸が出力 **V(out)** の

平均電圧を表示するグラフを作成する。

入力 **V(in)** が **1V** の時が直性からの

ズレが大きいことがわかる。

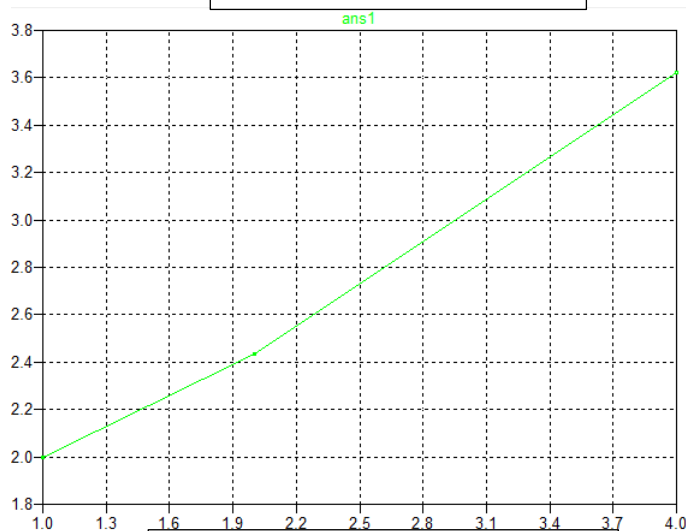


Fig.11 **ampl** と平均値のグラフ

次に、入力 V2 を三角波に変更する。

信号源を V2 に設定する。

閾値電圧は、電源 V1 で設定する。

この回路では、V1(Vth)=1V に設定する。

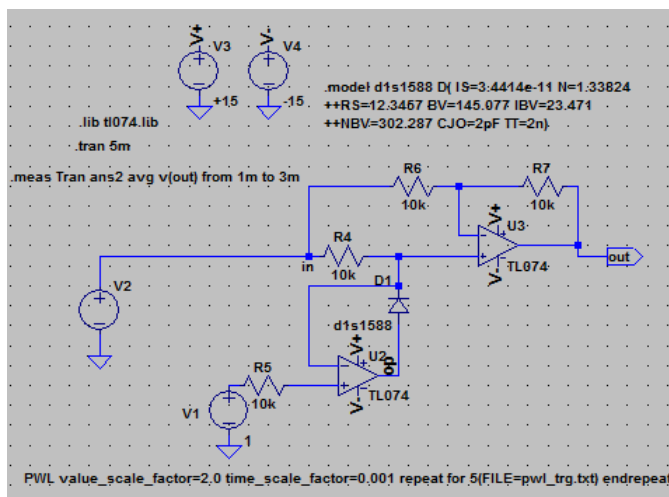


Fig.12 回路図

信号源 V2 の設定について、

右クリックして Attribute Editor

を開く。Value 欄に以下の命令を記述する。

PWL 電源として、

Value_scale_factor で大きさを設定する。

この例では、2 倍する。

Time_Scale_factor で、時間の縮尺を変える。

この例では、時間を 1m 倍する。

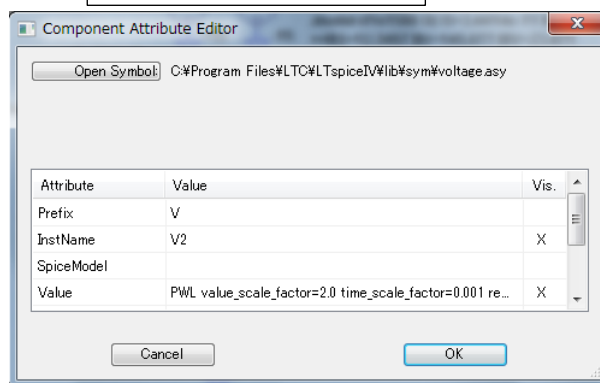


Fig.13 V2 電源の設定

PWL value_scale_factor=2.0 time_scale_factor=0.001 repeat for 5(FILE=pwl_trg.txt) endrepeat

Fig.14 Value 欄の内容

repeat for～ endrepeat で繰り返し数を設定する。

また、FILE で設定ファイルを読み込む。

FILE の pwl_trg.txt の内容を右に示す。

このファイルでは、正負と変化する三角波を設定している。

周期が 1 秒で、最大値が 1 V 最小値が-1V になるように設定する。

このように設定することで、ファイル内容を変更せずに、

オプションの Scale_factor で大きさや周期を命令で変更できる。

このファイルは、回路と同じフォルダに保存する。

pwl_trg - メモ帳	
ファイル(F) 編集(E)	
0	0
0.25	1
0.5	0
0.75	-1
1	0

Fig.15 pwl_trg.txt ファイル内容

解析を実行する。

V(out)をクリックすると、
右のグラフが得られる。

出力 V(out)は $V_{th}=1V$ で絶対値回路
動作していることが確認できる。

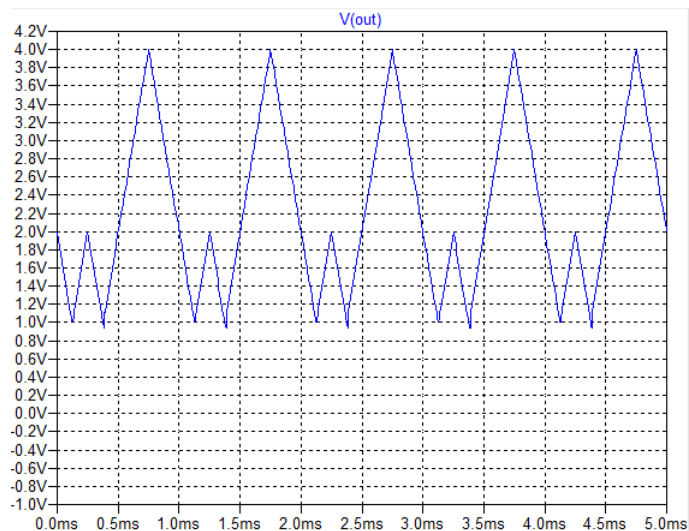


Fig.16 V(out)のグラフ

出力 V(out)を拡大する。

信号が負から正への折り返す部分で、
波形が歪んでいることがわかる。

回路図のおける

メニューの VIEW の内容を示す。

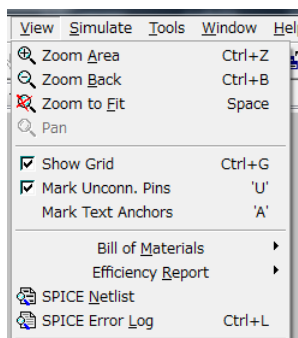


Fig.18 VIEW メニュー内容

SPICE Error Log を選択する。

Error Log ファイルが開くので、
計算結果が出力されている行を
右に示す。

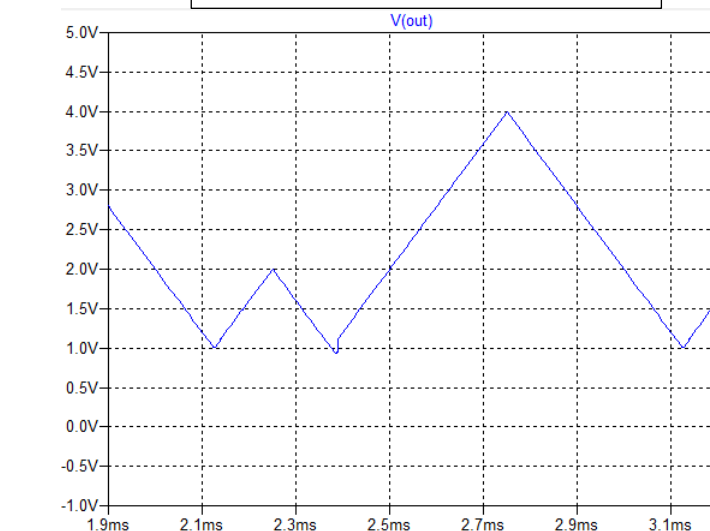


Fig.17 V(out)グラフの拡大

ans2: AVG(v(out))=2.24829 FROM 0.001 TO 0.003

Fig.19 ErrorLog ファイルの内容

課題について

テキストの課題の目的は、実験考察を深めるためのヒントである。
注意として、課題の解答は、実験の考察をまとめたものになるべきです。

以下に、テキスト中の課題のヒントを示す。

- a) 反転型レベルシフタを LTspice で動作確認する。
- b) 仮想ダイオードと理想ダイオードの定義
- c) 半波整流回路において、理論値と実験値を定量的に比較・考察する。
- d) オペアンプを用いないリミッタの波形観測から理想的なリミッタと異なる点
理想的には、どうなるのか？
- e) オペアンプを用いたリミッタの波形観測から理想的なリミッタと異なる点
理想的には、どうなるのか？
- f) ヒステリシスコンパレータの波形観測から理想的なヒステリシスコンパレータと異なる点
理想的には、どうなるのか？
- g) ヒステリシスコンパレータはノイズが含まれている波形の閾値処理に用いる場合について、
ヒステリシス幅を大きくする場合の利点と欠点
- h) 全波整流回路において、理論値と実験値を定量的に比較・考察する。

[参考文献]

第1日目の参考文献を参照してください。

付録 A 時間平均電圧について

[目的]

課題 h)の内容に関係した絶対値回路の実験での信号波形の時間平均電圧について Maxima を用い計算する。

Maxima のインストールと使用方法については、他の文献、サイトを参照してください。

以下は、wxMaxima を用いて計算した結果を html 出力して、加工したものです。

[手順と結果]

はじめに、関数の記述のテストをする。

範囲を指定した関数を定義する。

```
(%i1) g(x) := if x < 2 then x^2 else sqrt(x);
```

```
(%o1) g(x):=if x<2 then x^2 else  $\sqrt{x}$ 
```

定義した関数の動作を確認する。

```
(%i2) transpose( matrix([g(0), g(2.5), g(4.999), g(5), g(5.0)]) );
```

```
(%o2) 
$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1.58113883008419 \\ 2.235844359520582 \\ \sqrt{5} \\ 2.23606797749979 \end{bmatrix}$$

```

はじめに、半波整流した正弦波について、計算する。

関数を定義する。

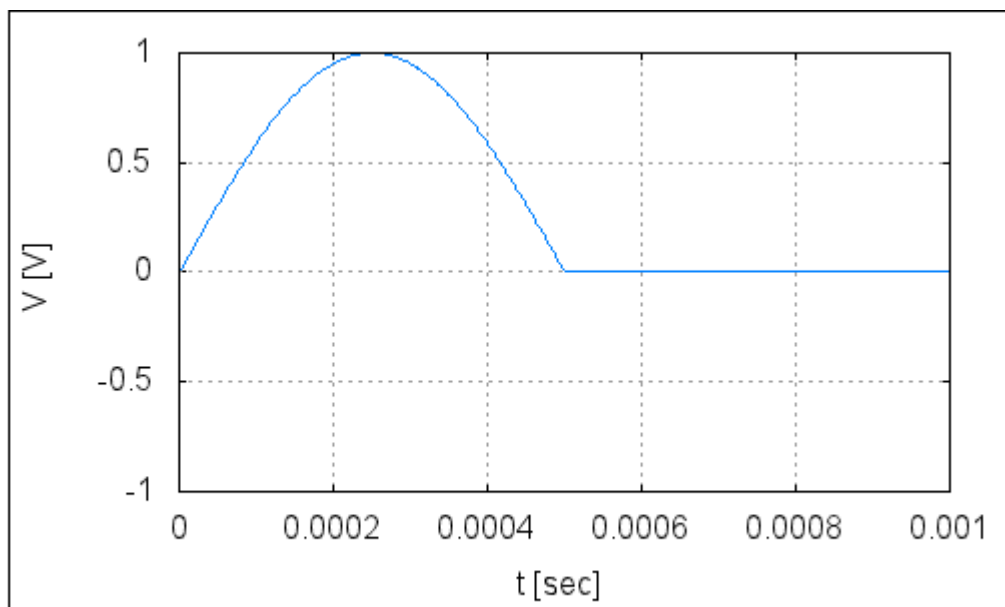
```
(%i3) v(t) := if x <= 1/2*(1*10^-3) then sin(2*%pi*(1*10^3)*x) else 0;
```

```
(%o3) v(t):=if x<= $\frac{1}{2}(1\ 10^{-3})$  then sin(2  $\pi$  (1 103) x) else 0
```

定義した関数を表示して確認する。

```
(%i4) wxplot2d(v(x),  
[x,0,10^-3],  
[y,-1,1],  
[xlabel,"t [sec]"],  
[ylabel,"V [V]"],  
[gnuplot_preamble,"set grid"]  
);
```

(%t4)



(%o4)

定義した関数を直接、積分関数を用いて積分を実行する。

しかし、計算できません。

((注意)) 以下の参考文献に掲載されている。

[1]p14, Ch.7: Symbolic Integration ,Edwin L. Woollett

(%i5) `integrate(v(x),x,0,1*10^-3);`

(%o5)
$$\int_0^{\frac{1}{1000}} \text{if } x \leq \frac{1}{2000} \text{ then } \sin(2000 \pi x) \text{ else } 0 dx$$

周期: $T_p=1\text{msec}$ と定義する。

(%i6) `Tp:1*10^-3;`

(%o6)
$$\frac{1}{1000}$$

半分の周期の積分を計算する。

(%i7) `S:integrate(sin(2*%pi*(1*10^3)*x),x,0,1/2*Tp);`

(%o7)
$$\frac{1}{1000 \pi}$$

得られた積分値を一周期で割ることで、時間平均電圧が得られる。

(%i8) `Vave:S/Tp;`

(%o8)
$$\frac{1}{\pi}$$

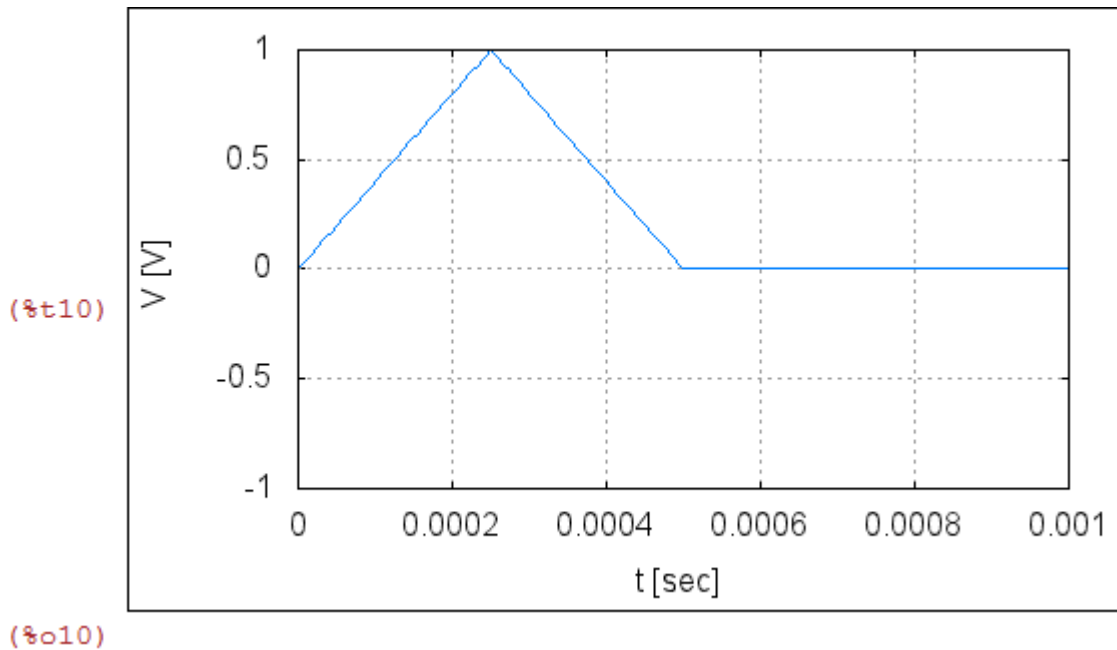
次に、半波整流後の三角波について計算する。

```
(%i9) vtr(t) := if x <= 1/4*(1*10^-3) then 4*10^3*x  
      else if x <= 1/2*(1*10^-3) then 2-4*10^3*x  
      else 0;
```

```
(%o9) vtr(t) := if x <=  $\frac{1}{4}(1 \cdot 10^{-3})$  then  $4 \cdot 10^3 x$  else if  $x <= \frac{1}{2}(1 \cdot 10^{-3})$  then  $2 - 4 \cdot 10^3$   
x else 0
```

定義した関数をグラフ表示する。

```
(%i10) wxplot2d(vtr(x),  
      [x,0,10^-3],  
      [y,-1,1],  
      [xlabel,"t [sec]"],  
      [ylabel,"V [V]"],  
      [gnuplot_preamble,"set grid"]  
      );
```



周期: $T_p=1\text{msec}$ として、 $0 < t < 1/4 \cdot T_p$ までの区間での積分を計算する。

```
(%i11) S1:integrate(4*10^3*x,x,0,1/4*Tp);
```

```
(%o11)  $\frac{1}{8000}$ 
```

つぎに、 $1/4 \cdot T_p < t < 2/4 \cdot T_p$ までの区間での積分を計算する。

```
(%i12) S2:integrate(2-4*10^3*x,x,1/4*Tp,1/2*Tp);
```

```
(%o12)  $\frac{1}{8000}$ 
```

平均電圧を計算する。

```
(%i13) Vavr1:(S1+S2)/Tp;
```

```
(%o13)  $\frac{1}{4}$ 
```

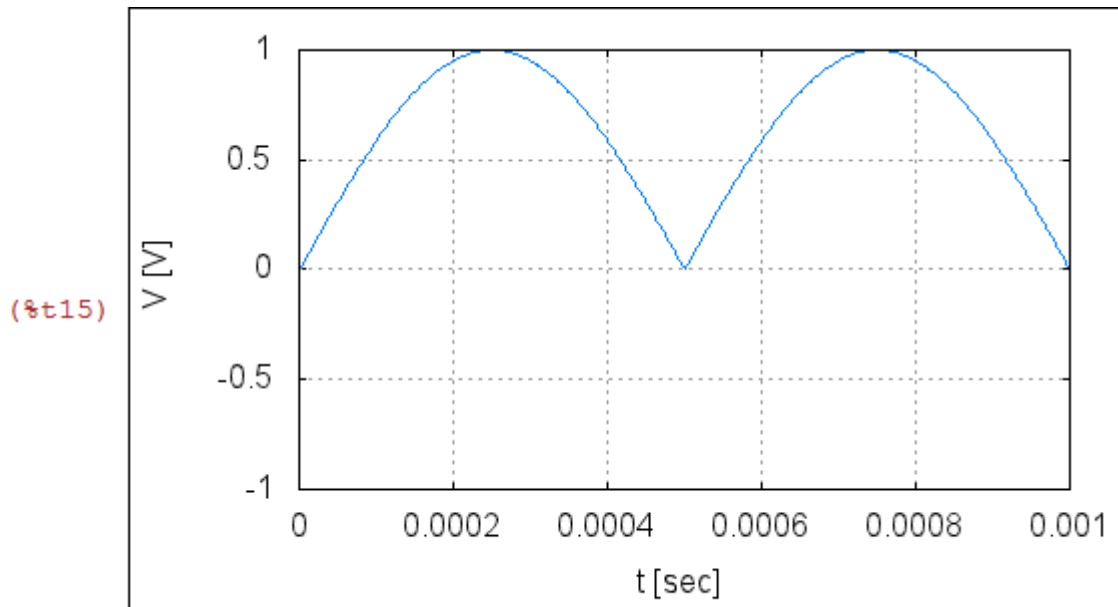
絶対値回路の出力は、両波整流される。正弦波の関数を定義する。

```
(%i14) vref(t) := if x <= 1/2*(1*10^-3) then sin(2*%pi*(1*10^3)*x)
           else -sin(2*%pi*(1*10^3)*x);
```

```
(%o14) vref(t):=if x<= $\frac{1}{2}(1\ 10^{-3})$  then sin(2  $\pi$ (1 103)x) else -sin(2  $\pi$ (1 103)x)
```

定義した関数をグラフ表示する。

```
(%i15) wxplot2d(vref(x),
[x,0,10^-3],
[y,-1,1],
[xlabel,"t [sec]"],
[ylabel,"V [V]"],
[gnuplot_preamble,"set grid"]
);
```



(%o15)

つぎに、三角波の出力について、両波整流後の関数を定義する。

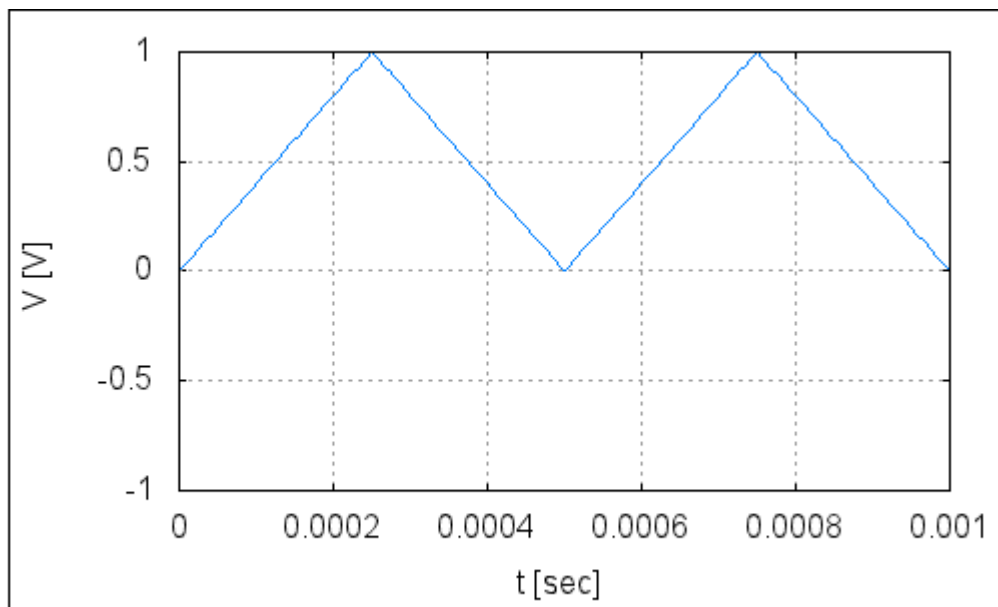
```
(%i16) vtrref(t) := if x <= 1/4*(1*10^-3) then 4*10^3*x
                    else if x <= 1/2*(1*10^-3) then 2-4*10^3*x
                    else if x <= 3/4*(1*10^-3) then -2+4*10^3*x
                    else 4-4*10^3*x;
```

```
(%o16) vtrref(t):=if x<= $\frac{1}{4}(1\ 10^{-3})$  then 4 103 x else if x<= $\frac{1}{2}(1\ 10^{-3})$  then 2-4
103 x else if x<= $\frac{3}{4}(1\ 10^{-3})$  then -2+4 103 x else 4-4 103 x
```

定義した関数をグラフに表示して確認する。

```
(%i17) wxplot2d(vtrref(x),  
[x,0,10^-3],  
[y,-1,1],  
[xlabel,"t [sec]"],  
[ylabel,"V [V]"],  
[gnuplot_preamble,"set grid"]  
);
```

(%t17)



(%o17)

つぎに、実験結果のグラフについて計算する。

First Step:

関数を定義する。

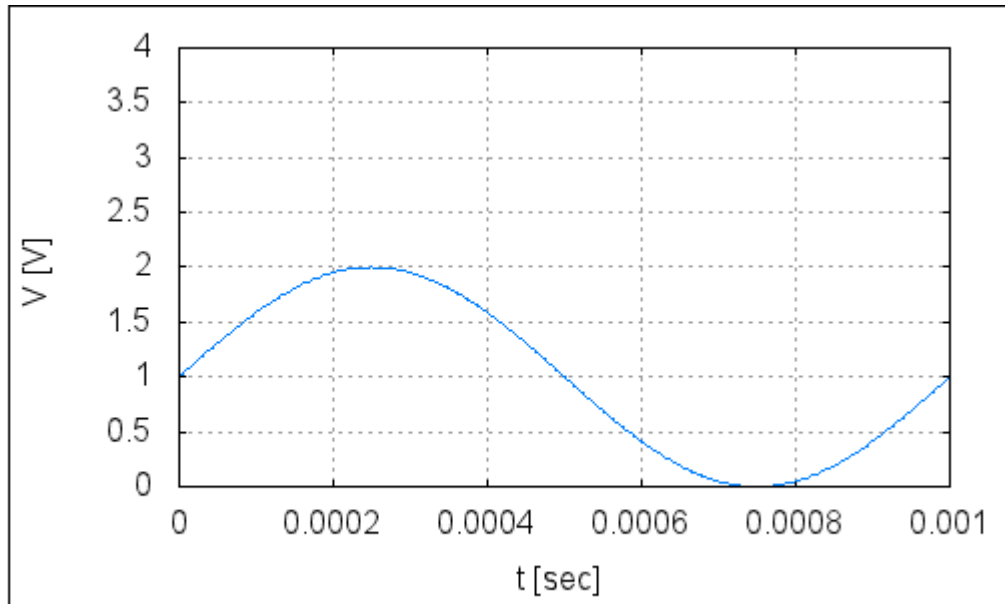
```
(%i18) vth2(t) := if x <= 1/2*(1*10^-3) then 1+sin(2*%pi*(1*10^3)*x)  
else 1+sin(2*%pi*(1*10^3)*x);
```

```
(%o18) vth2(t):=if x<=1/2(1 10^-3) then 1+sin(2 pi(1 10^3)x) else 1+sin(2 pi(1 10^3)x)
```

定義した関数をグラフ表示する。

```
(%i19) wxplot2d(vth2(x),  
[x,0,10^-3],  
[y,0,4],  
[xlabel,"t [sec]"],  
  
[ylabel,"V [V]"],  
[gnuplot_preamble,"set grid"]  
);
```

(%t19)



(%o19)

Second Step:

交点を求める別の関数を定義する。

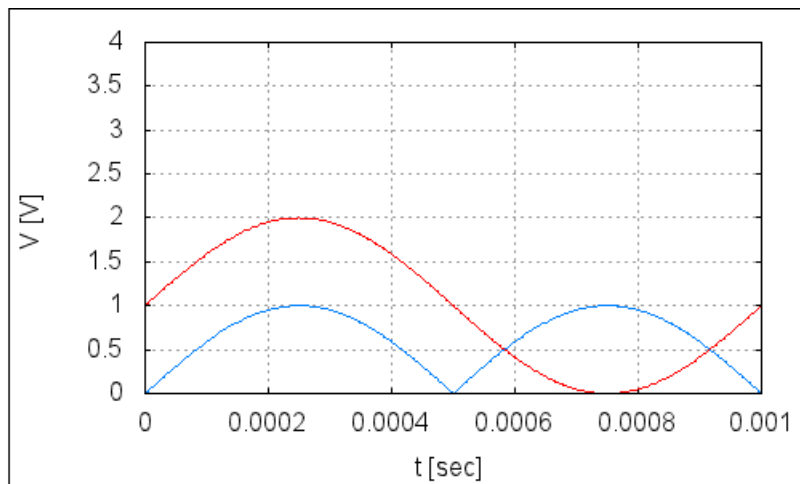
```
(%i20) vth1(t) := if x <= 1/2*(1*10^-3) then sin(2*%pi*(1*10^3)*x)
           else -sin(2*%pi*(1*10^3)*x);
```

```
(%o20) vth1(t):=if x<=1/2(1 10^-3) then sin(2 pi(1 10^3)x) else -sin(2 pi(1 10^3)x)
```

定義した2個の関数を同時に表示する。

```
(%i21) wxplot2d([vth1(1),vth2(x)],
[x,0,10^-3],
[y,0,4],
[xlabel,"t [sec]"],
[ylabel,"V [V]"],
[legend,""],
[gnuplot_preamble,"set grid"]
);
```


(%t21)



(%o21)

3rd Step:

交点を計算する。正の値を仮定する。

(%i22) `assume(tkai>0);`

(%o22) `[tkai>0]`

Solve 関数を用いて、交点を計算する。原点に一番近い解が計算される。

(%i23) `solve(1+sin(2*%pi*(1*10^3)*tkai)=-sin(2*%pi*(1*10^3)*tkai),tkai);`

*solve: using arc-trig functions to get a solution.
Some solutions will be lost.*

(%o23) `[tkai=- $\frac{1}{12000}$]`

グラフから、求める解の範囲が判るので、範囲を指定して解が計算可能な関数: `find_root` を用いる。参考文献 [2]p21, Ch.4: Solving Equations, Edwin L. Woollett

$1/2 \cdot T_p < t < 3/4 \cdot T_p$ の間にある交点を求める。

(%i24) `tkai1:find_root(1+sin(2*%pi*(1*10^3)*t)+sin(2*%pi*(1*10^3)*t),t,1/2*Tp,3/4*Tp);`

(%o24) $5.8333333333333338 \cdot 10^{-4}$

$3/4 \cdot T_p < t < 4/4 \cdot T_p$ の間にある交点を求める。

(%i25) `tkai2:find_root(1+sin(2*%pi*(1*10^3)*t)+sin(2*%pi*(1*10^3)*t),t,3/4*Tp,4/4*Tp);`

(%o25) $9.1666666666666676 \cdot 10^{-4}$

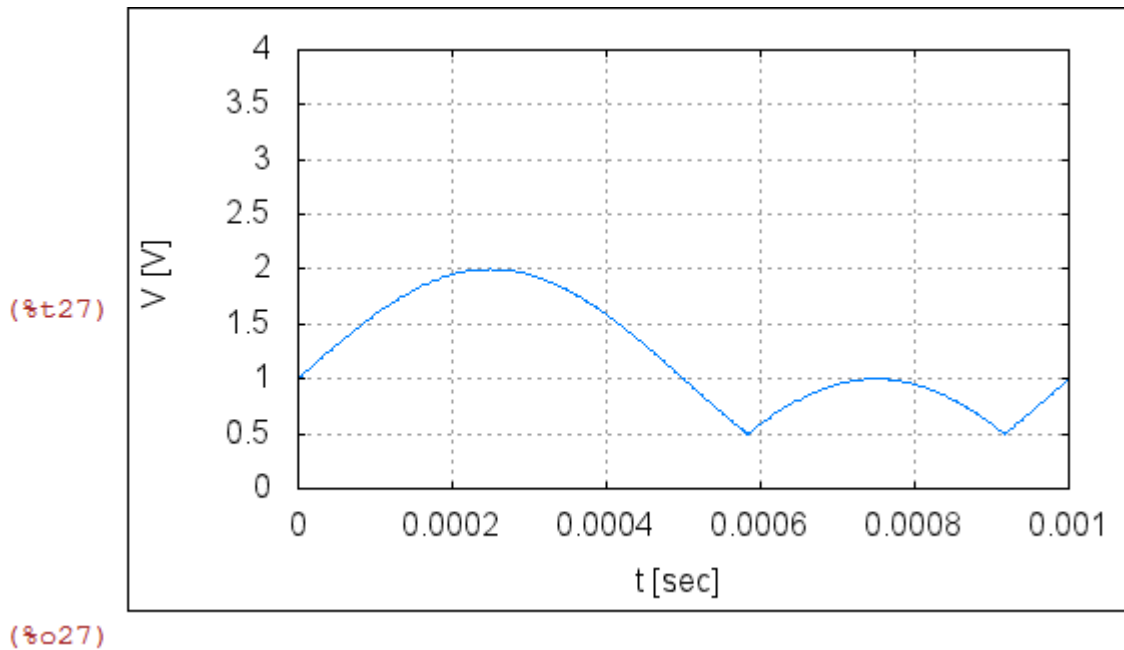
交点が得られたので、関数を定義する。

(%i26) `vth3(t) := if x <= tkai1 then 1+sin(2*%pi*(1*10^3)*x)
 else if x <= tkai2 then -sin(2*%pi*(1*10^3)*x)
 else 1+sin(2*%pi*(1*10^3)*x)
 ;`

(%o26) `vth3(t):=if x<=tkai1 then 1+sin(2 π(1 103)x) else if x<=tkai2 then -
sin(2 π(1 103)x) else 1+sin(2 π(1 103)x)`

以上で関数を定義できたので、実験結果の信号をグラフ表示する。

```
(%i27) wxplot2d(vth3(x),  
[x,0,10^-3],  
[y,0,4],  
[xlabel,"t [sec]"],  
[ylabel,"V [V]"],  
[gnuplot_preamble,"set grid"]  
);
```



4th Step:

以上で、信号関数が再現できたので、以下の範囲に分割して計算する。

SS1: $0 < t < t_{kai1}$

SS2: $t_{kai1} < t < t_{kai2}$

SS3: $t_{kai2} < t < T_d$

順番に計算する。SS1 を求める。

```
(%i28) SS1:integrate(1+sin(2*%pi*(1*10^3)*x),x,0,t_kai1);
```

```

rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4
rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4
rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4
rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4
rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4
rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4
rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4
rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4
rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4
rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4
rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4
rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4
rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4
rat: replaced 1.166666666666667 by 7/6 = 1.166666666666667
rat: replaced 0.833333333333333 by 5/6 = 0.833333333333333
rat: replaced 1.166666666666667 by 7/6 = 1.166666666666667
rat: replaced 1.166666666666667 by 7/6 = 1.166666666666667
rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4

```

$$(\%028) \frac{7\pi + 3^{3/2} + 6}{12000\pi}$$

つぎに、SS2を求める。

(%i29) SS2:integrate(-sin(2*%pi*(1*10^3)*x),x,tkai1,tkai2);

```

rat: replaced 3.333333333333338E-4 by 1/3000 = 3.333333333333332E-4
rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4
rat: replaced 9.166666666666667E-4 by 11/12000 = 9.166666666666665E-4
rat: replaced 3.333333333333338E-4 by 1/3000 = 3.333333333333332E-4
rat: replaced 0.0015 by 3/2000 = 0.0015
rat: replaced 3.333333333333338E-4 by 1/3000 = 3.333333333333332E-4
rat: replaced 5.833333333333338E-4 by 7/12000 = 5.833333333333338E-4
rat: replaced 9.166666666666667E-4 by 11/12000 = 9.166666666666665E-4
rat: replaced 3.333333333333338E-4 by 1/3000 = 3.333333333333332E-4
rat: replaced 1.166666666666667 by 7/6 = 1.166666666666667
rat: replaced 1.833333333333334 by 11/6 = 1.833333333333333
rat: replaced 1.333333333333333 by 4/3 = 1.333333333333333
rat: replaced 0.666666666666667 by 2/3 = 0.666666666666667
rat: replaced 1.166666666666667 by 7/6 = 1.166666666666667
rat: replaced 1.833333333333334 by 11/6 = 1.833333333333333

```

$$(\%029) \frac{\sqrt{3}}{2000\pi}$$

最後に、SS3を求める。

(%i30) SS3:integrate(1+sin(2*%pi*(1*10^3)*x),x,tkai2,Tp);

```

rat: replaced 8.333333333333263E-5 by 1/12000 = 8.333333333333331E-5
rat: replaced 9.166666666666667E-4 by 11/12000 = 9.166666666666665E-4
rat: replaced 8.333333333333263E-5 by 1/12000 = 8.333333333333331E-5
rat: replaced 8.333333333333263E-5 by 1/12000 = 8.333333333333331E-5
rat: replaced 9.166666666666667E-4 by 11/12000 = 9.166666666666665E-4
rat: replaced 8.333333333333263E-5 by 1/12000 = 8.333333333333331E-5
rat: replaced 8.333333333333263E-5 by 1/12000 = 8.333333333333331E-5
rat: replaced 9.166666666666667E-4 by 11/12000 = 9.166666666666665E-4
rat: replaced 8.333333333333263E-5 by 1/12000 = 8.333333333333331E-5
rat: replaced 0.0019166666666667 by 23/12000 = 0.0019166666666667
rat: replaced 8.333333333333263E-5 by 1/12000 = 8.333333333333331E-5
rat: replaced 9.166666666666667E-4 by 11/12000 = 9.166666666666665E-4
rat: replaced 8.333333333333263E-5 by 1/12000 = 8.333333333333331E-5
rat: replaced 1.833333333333334 by 11/6 = 1.833333333333333
rat: replaced 1.833333333333334 by 11/6 = 1.833333333333333
rat: replaced 0.166666666666667 by 1/6 = 0.166666666666667
rat: replaced 1.833333333333334 by 11/6 = 1.833333333333333
rat: replaced 2.0 by 2/1 = 2.0
rat: replaced 8.333333333333263E-5 by 1/12000 = 8.333333333333331E-5

```

$$(\%030) \frac{\pi + 3^{3/2} - 6}{12000 \pi}$$

以上で積分できたので、平均電圧を求める。

```
(%i31) VavrSS:(SS1+SS2+SS3)/Tp;
```

$$(\%031) 1000 \left(\frac{7 \pi + 3^{3/2} + 6}{12000 \pi} + \frac{\pi + 3^{3/2} - 6}{12000 \pi} + \frac{\sqrt{3}}{2000 \pi} \right)$$

実数に変換する。

```
(%i32) float(%);
```

```
(%032) 1.217995562088459
```

以上で、実験の波形についての平均電圧を計算できた。