シミュレーションは所詮「近似解」？
実際の確からしさは何がよりどころか？

「アナログ回路シミュレーション」なんて、どうせ近似計算なんだから、どのシミュレータを使っても大差はないと思っていませんか？

まず、シミュレーションは「シミュレータ(回路方程式を連立して解を求める部分)」と、「モデル(シミュレータが使う部品の特性を近似的に表現したもの)」から成り立っている。また、モデルも「ネイティブSPICEモデル(ディスクリート部品のパラメータをIEEEなどで決められたパラメータで表したトランジスタやダイオードなど)」と「マクロモデル(サブサーキット:ICなどを回路要素などを使って等価的に近似したもの)」の2通りがある。＜次ページの図を参照＞

SANKYOSHA FAE : Michio Shibuya

アナログ回路シミュレーション

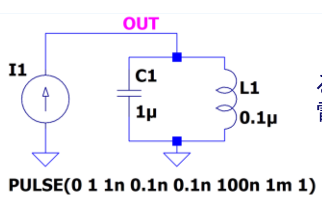
まず、モデルについて概観すると、トランジスタにせよICにせよ動作の主要部分を近似して作られているので、必ずしも全ての動作特性を近似できているわけではない。例えば、スイッチング用のトランジスタは、トランジェント解析でシミュレーションしたスイッチ動作は、データ・シートとよく一致するが、コレクタ電流のベース電流依存性を見る静特性のシミュレーションではデータ・シートとの一致は良くないことがある。

また受動部品のコイルでも、空芯コイルは物理現象そのものを再現できるが、コア入りのものでは非線形インダクタの近似手法や、サブサーキットによる近似を使うなどのいくつかの方法が用いられる。
コンデンサについても同様で、空気コンデンサとして扱う場合にはモデルは物理現象そのものを表しているが、アルミ電解やタンタル・コンデンサなどでは、やはりサブサーキットによるモデルで近似精度を上げる試みもある。

一方、シミュレータ（プログラム）の近似精度はどのように確かめることができるだろうか？　シミュレーションのアルゴリズム（たとえば、連立方程式を解くときの行列の対角化には「ヤコビの対角化」を使い、収束計算の繰り返しには「ニュートン・ラフソン法」を使うなど）がたとえ同じ手法を使っていたとしても、実際のアプリケーション・プログラムのオブジェクト・コードとして実装される段階で、そのプログラミングの思想にかかわる差が出てくるようである。

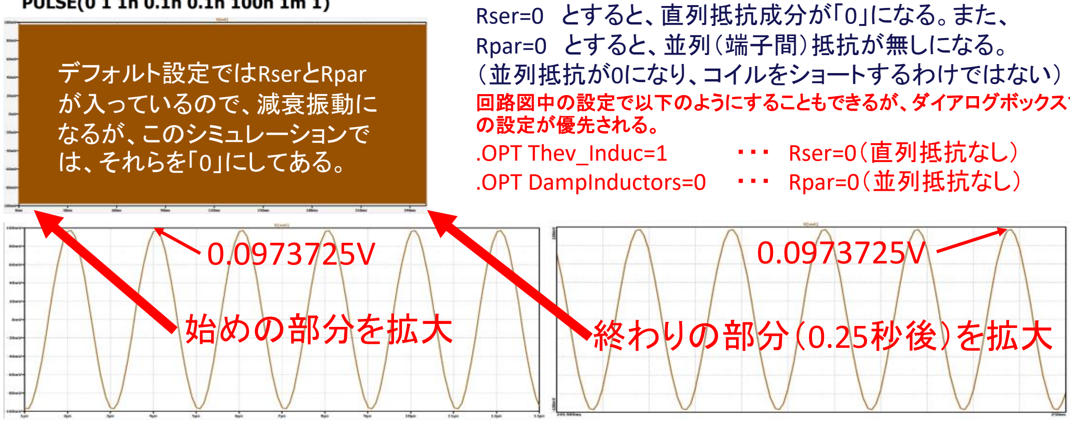
そこで、電子回路部品を用いて物理現象がどれほど厳密に再現できるかをシミュレーションで確かめることで、そのシミュレータを使う上での安心感が高まるのではないだろうか？

3



LCの並列共振回路（左図）に一瞬パルス電流を印加すると、この共振回路中に抵抗成分が存在しなければ、振動電流は永久に流れ続けるはずである。

インダクタのパラメータ設定ダイアログボックスで
Rser=0　とすると、直列抵抗成分が「0」になる。また、
Rpar=0　とすると、並列（端子間）抵抗が無しになる。
（並列抵抗が0になり、コイルをショートするわけではない）
回路図中の設定で以下のようにすることもできるが、ダイアログボックスでの設定が優先される。
.OPT Thev_Induc=1　　・・・　Rser=0（直列抵抗なし）
.OPT DampInductors=0　・・・　Rpar=0（並列抵抗なし）



LTspiceでは（減衰振動にならず）物理現象を正しく再現できる
インダクタ（コイル）に関する詳細設置は、以下の項目で示す。

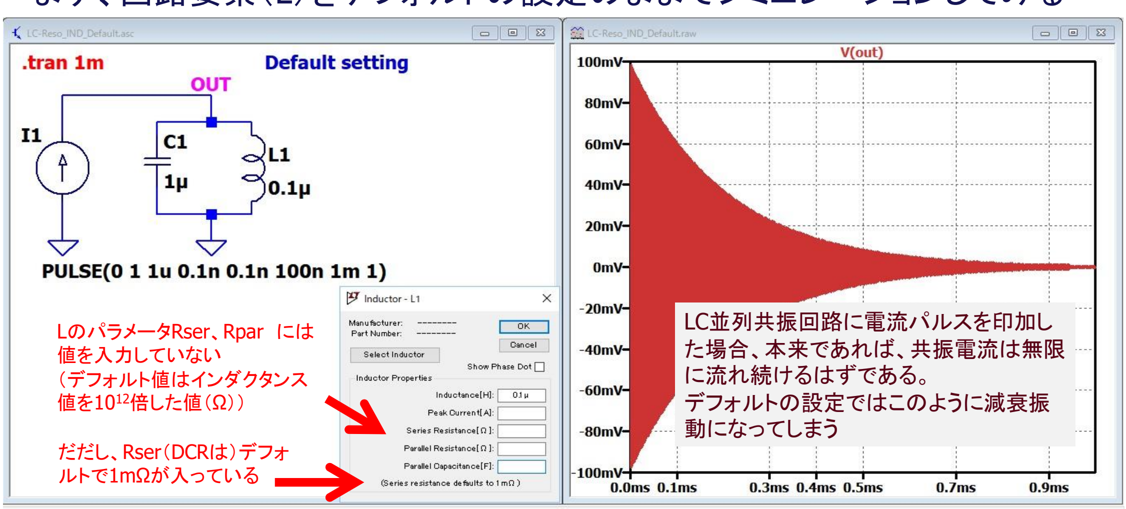
4

インダクタに関連するパラメータとそれらを制御する .OPTIONS

インダクタのSPICEパラメータには、デフォルトで、実際のインダクタにも存在するDCRのほかに、シミュレーションの収束を補助するためのダンピング抵抗も挿入される。シミュレーションの収束には、時として非常に重要だが、厳密に物理現象を再現しようとすると、不都合なこともある。これらをコントロールするためのパラメータについて解説する。

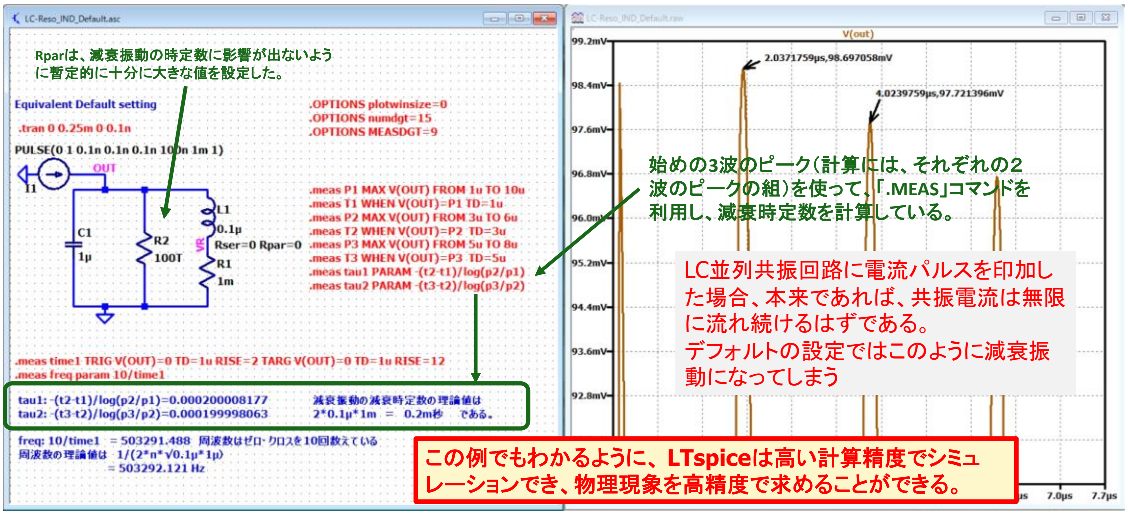
LC 並列共振回路に電流パルスを印加する（1）

まず、回路要素（L）をデフォルトの設定のままでシミュレーションしてみる



LC 並列共振回路に電流パルスを印加する（2）

デフォルト時、自動的に組み込まれるRserとRparを外部に追加し、インダクタそのものにはRser=0、Rpar=0を設定し、等価の動作であることを確認する。

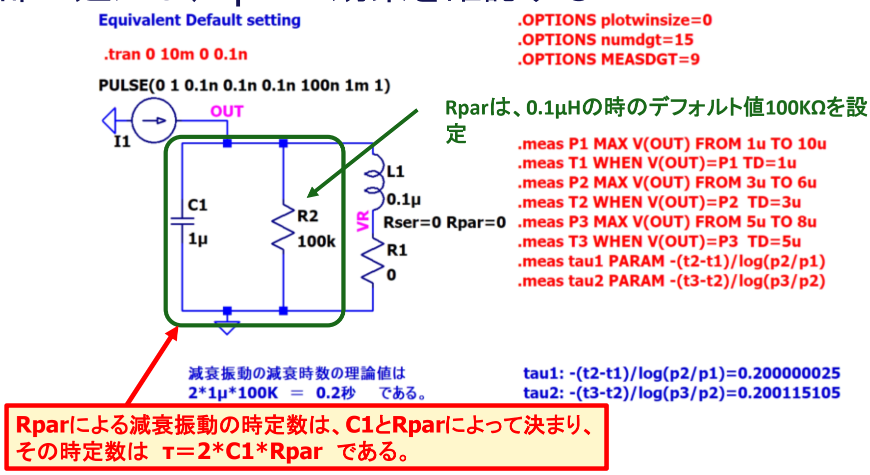


上記の回路図に使った「.OPTIONS 」と「.MEAS 」の解説

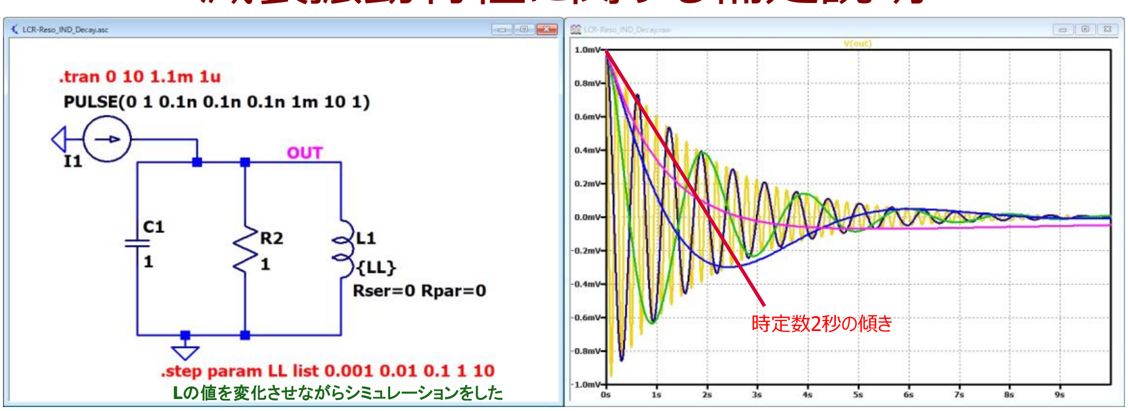
.OPTIONS plotwinsize=0　･･･　グラフ表示におけるデータを圧縮をしない。
これにより、波形からのデータ読み取りの精度が上がる。
.OPTIONS numdgt=15　･･･　倍精度計算をする（LTspiceはデフォルトで倍精度計算をしているので、おまじないのレベル）
.OPTIONS measdgt=9　･･･　.measの計算結果をerror log 中で表示する有効桁数。末尾に0がくるときには表示されない。
＝＝＝
.meas P1 MAX V(OUT) FROM 1u TO 10u　･･･変数名「P1」に時間軸の1µsから10µsの間で、V(OUT)の最大値を求める。
.meas T1 WHEN V(OUT)=P1 TD=1u　･････TD（ディレイ時間1µs以降で、V(OUT)の値が「P1」になる時刻を変数名「T1」に格納。
.meas P2 MAX V(OUT) FROM 3u TO 6u　･･･「P1」と同様に、3µsと6µsの間でV(OUT）の最大値を求め、変数名「P2」に格納。
以下同様･･･
＝＝＝
.meas tau1 PARAM -(t2-t1)/log(p2/p1)　･･･上で求めたP1,T1,P2,T2を使って、減衰が指数関数的に起こるという仮定で時定数（変数名「tau1」）を計算する。 .measの中で「PARAM」は数式の「＝」記号に相当すると解釈できる。
.meas tau2 PARAM -(t3-t2)/log(p3/p2)　･･･変数名「tau1」と同様に次のピークの組を利用して、時定数を計算している。
＝＝＝
.meas time1 TRIG V(OUT)=0 TD=1u RISE=2 TARG V(OUT)=0 TD=1u RISE=12
･･･変数名「time1」はV(OUT)=0を上向きに横切る（RISE）する間隔（TRIGとTARGの間の時間）
（ただし、ディレイ時間（TD）=1µs以降で、2回目から12回目の区間（10回0を立ち上がりで横切る）
.meas freq param 10/time1　･･･　変数名「freq」に、上で求めた10回の周期の逆数を10倍し、平均周波数を格納する。

LC 並列共振回路に電流パルスを印加する(3)

デフォルト時、自動的に組み込まれるRser=0ΩとRpar=100K を外部に追加し、Rparの効果を確認する



減衰振動特性に関する補足説明



C、L、Rが並列になった回路に、電流パルスを印加した後の各要素の端子間電圧(この回路図中でOUTノード)の挙動を考えると、減衰時定数＝2*C*Rで決定されているように見える。DCパルスを印加した場合の減衰特性はC*Rの時定数で指数関数的に減衰する。これに共振が加わると、振動項成分は正弦波として考えることができ、この電圧の実効値はDCのピークに対し、√2/2(約0.707倍)である。しかし、抵抗によって消費する電力はV^2/R(またはI^2R)であるので、消費電力はDCの減衰に比べ半分でしかないので、これを減衰時定数に読み替えれば、時定数が2倍になったと等価である。

では減衰項にL/Rの時定数の項が含まれていないかというと、$2\pi\sqrt{LC}$(振動項の1周期)>>L/Rでは振動を繰り返すよりも急速に減衰してしまうので、この項を無視しても十分に良い近似になっている。

また、LにDCR(Rpar)が含まれる場合には(かつコイルの端子間をショートするダンピング抵抗が十分に大きい場合には)、振動を減衰させる要素は2*L/Rの時定数を持つ指数関数的減衰である。この式の「2」も抵抗の消費電力をRMSで考慮した結果である。