

*ЛАДОГУБЕЦЬ В.В.,
ФІНОГЕНОВ О.Д.,
БЕЗНОСИК О.Ю.*

ОСОБЛИВОСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ МАКРОМОДЕЛЕЙ МЕХАНІЧНИХ КОМПОНЕНТІВ

В данной статье исследованы особенности целевых функций схемных макромоделей механических компонентов МЭМС, а также проведен анализ существующих средств САПР, которые могут решать задачи параметрической оптимизации. Экспериментально исследовано влияние качества и количества варьируемых параметров, диапазонов их изменения на результаты решения тестовых задач оптимизации схемных макромоделей механических компонентов МЭМС с помощью метода случайного поиска с уменьшением интервала поиска. Разработаны рекомендации по использованию блока оптимизации пакета NetALLTED для уточнения параметров схемных макромоделей.

In the paper presented the features of the objective functions of MEMS mechanical component circuit macromodels are investigated as well as the analysis of the existing CAD tools which can solve parametrical optimization tasks is carried out. The influence of a quality and a quantity of variable parameters, their change range on the results of MEMS mechanical component circuit macromodel optimization test tasks solution by means of the random search method with search interval reduction is investigated experimentally. The recommendations on usage of the NetALLTED optimization block to adjust circuit macromodel parameters are given.

1. Особливості цільових функцій схемних аналогів макромоделей МЕМС

В [1] запропоновано метод формування макромоделей механічних компонентів у вигляді еквівалентних скорочених RLC-схем для моделювання складених електромеханічних пристроїв пакетами схмотехнічного проектування.

У випадку, коли точність отриманої скороченої еквівалентної схеми заміщення не є достатньою при прийнятному для моделювання у пакетах схмотехнічного проектування розмірі, пропонується скористатися стандартними методами оптимізації, характерними для пакетів схмотехнічного проектування, для «підгонки» макромоделі у діапазоні частот, що розглядається [2, 3].

Уточнення параметрів схемних макромоделей МЕМС за допомогою оптимізаційних процедур з метою максимальної відповідності характеристик макромоделі вихідним характеристикам моделі МЕМС, отриманої за допомогою скінченно-елементного програмного забезпечення, неможливе без детального дослідження особливостей цільових функцій макромоделей МЕМС, аналізу існуючих на сьогодні засобів САПР, які можуть вирішувати задачі параметричної оптимізації, та ефективності вбудованих в них математичних алгоритмів. Крім цього, важливе значення має наявність в пакеті схмотехнічного проектування засобів оцінки вторинних параметрів вихідних

характеристик та вибір чисельних параметрів оптимізаційних процедур. До числа найбільш важливих особливостей макромоделей неелектричних об'єктів варто віднести:

1. Великий (до 20 порядків) розкид значень елементів макромоделі неелектричного об'єкту. Це робить досить складним процес визначення величин інкрементів при розрахунку значень градієнтів цільових функцій, що, у свою чергу, може призводити до значних похибок при розрахунках. Тобто, враховуючи велику кількість локальних екстремумів цільових функцій, що застосовуються для оптимізації макромоделей неелектричних об'єктів, найбільш прийнятним методом оптимізації слід вважати метод випадкового пошуку зі зменшенням інтервалу пошуку [4].

2. Великий (до 30 порядків) розкид чутливості вихідних характеристик об'єкту до зміни окремих компонентів макромоделі, що передбачає «яружний» характер ЦФ.

3. Складний багатоекстремальний характер цільових функцій. Найчастіше це приводить до того, що значення ЦФ у знайдений точці локального оптимуму не задовольняє вимогам завдання, і виникає задача визначення координат іншого, більш придатного локального екстремуму. Крім цього, виникає велика залежність результату оптимізації від координат початкової точки оптимізації.

4. Порівняно невелика трудомісткість однократної оцінки цільової функції. Цей факт

також свідчить на користь методів оптимізації, що є найбільш простими з алгоритмічної точки зору, але найменш чутливими до вибору координат початкової точки та точності оцінки складових градієнтів.

Чисельні експерименти показали, що у якості ЦФ найбільш доцільно вибрати ЦФ виду [4]:

$$F8 = \sum_{i=1}^m \left(\frac{PV_i - y_i}{PV_i} \right)^2$$

де PV_i і y_i – задане та підраховане значення АЧХ, m – кількість параметрів, значення яких треба оптимізувати.

2. Можливості пакетів схмотехнічного проектування для рішення задач параметричної оптимізації

У таблиці 1 наведено інформацію, що відображує можливості блоків параметричної оптимізації чотирьох найбільш розповсюджених пакетів схмотехнічного проектування: NetALLTED (НТУУ "КПІ", Україна), HSpice (Synopsys, США), SPECTRE (Cadence, США), Saber (Synopsys, США) [5]. Аналіз цих даних свідчить, що пакет NetALLTED не тільки не поступається за своєю ефективністю, з точки зору можливостей блоку параметричної оптимізації, іншим пакетам, але найчастіше перевершує їх. Таким чином, з урахуванням особливостей цільових функцій схемних реалізацій макромодель MEMC, зроблено вибір пакету NetALLTED у якості засобу оптимізації макромодель MEMC.

Табл. 1. Можливості блоків параметричної оптимізації пакетів схмотехнічного проектування

Вид оптимізації	Кількість методів оптимізації			
	NetALLTED	HSpice	SPECTRE	Saber
Безумовна	8	1	1	-
Умовна	3	-	1	-
Мінімаксна	2	-	-	-

3. Опис тестових задач параметричної оптимізації схемних макромодель механічних складових MEMC

Модель закріпленої однорідної балки з одним ступенем свободи (Схема 1)

На рис. 1 представлено схемну макромодель однорідної балки з одним ступенем свободи, отриману при $\tau_{min}=3 \cdot 10^{-5}$, та її опис на вхідній мові NetALLTED [4].

Для цієї схемної макромоделі необхідно,

змінюючи параметри будь-яких елементів схеми, досягти того, щоб перша та друга резонансні частоти мали значення 1336.3 Гц та 4009.3 Гц відповідно, тобто співпадали з розрахованими за допомогою пакету ANSYS з сумарною похибкою не більше 0,1%. Значення резонансних частот, які є аргументами відповідної цільової функції (ЦФ) типу F8, сама ЦФ та необхідна передаточна функція на вхідній мові NetALLTED наведені на рис. 2.

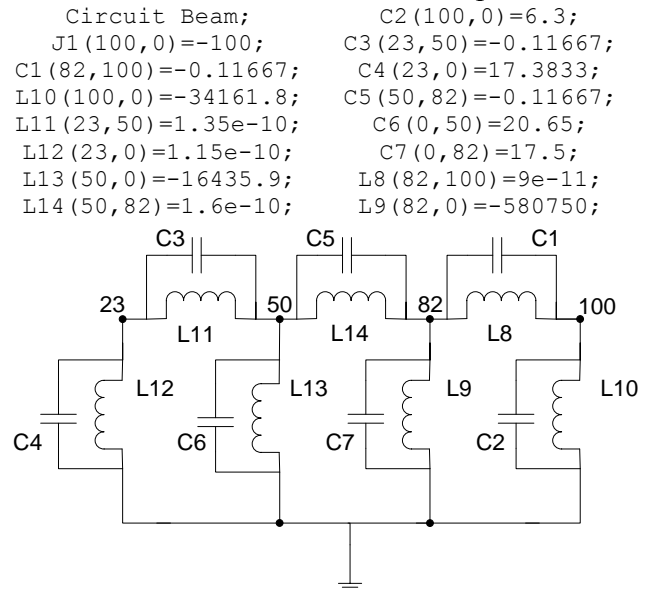


Рис. 1. Схемна макромодель однорідної балки із одним ступенем свободи

```

Circuit Beam;
J1 (100,0)=-100; C2 (100,0)=6.3;
J1 (100,0)=-100; C3 (23,50)=-0.11667;
C1 (82,100)=-0.11667; C4 (23,0)=17.3833;
L10 (100,0)=-34161.8; C5 (50,82)=-0.11667;
L11 (23,50)=1.35e-10; C6 (0,50)=20.65;
L12 (23,0)=1.15e-10; C7 (0,82)=17.5;
L13 (50,0)=-16435.9; L8 (82,100)=9e-11;
L14 (50,82)=1.6e-10; L9 (82,0)=-580750;
    
```

Рис. 2. Фрагмент завдання на моделювання на вхідній мові ППП NetALLTED

Модель закріпленої однорідної мікробалки з трьома ступенями свободи (Схема 2)

На рис. 3 представлено схемну макромодель однорідної мікробалки з трьома ступенями свободи, отриману при $\tau_{min}=8 \cdot 10^{-4}$, а на рис. 4 – її опис на вхідній мові ППП NetALLTED.

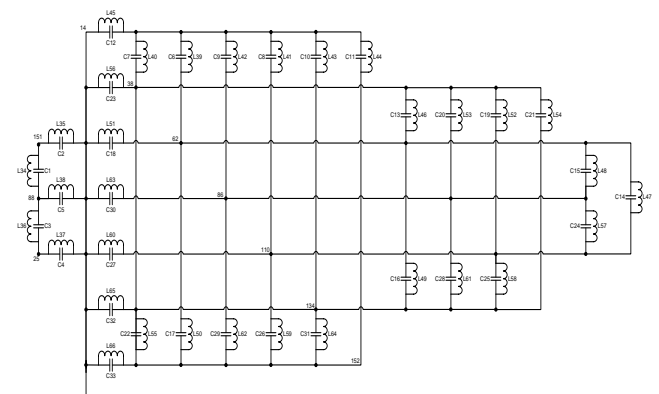


Рис. 3. Схемна макромодель мікробалки з трьома ступенями свободи

Для цієї схемної макромоделі необхідно, змінюючи параметри будь-яких елементів схеми, досягти того, щоб перші чотири резонансні частоти мали значення 18.745, 50.89, 97.859 та 115.49 МГц відповідно, тобто співпадали з розрахованими за допомогою пакету ANSYS з сумарною похибкою не більше 1%. Значення резонансних частот, які є аргументами відповідної цільової функції (ЦФ) типу F8, сама ЦФ та необхідна передаточна функція на вхідній мові NetALLTED наведені на рис. 5.

```
Circuit MICROBALKA_3D; L40(14,38)=10.9703;
J1(152,0)=-250; L41(14,110)=-214.444;
J2(151,0)=-250; L42(14,86)=57.7349;
C1(88,151)=-1.2e-08; L43(14,134)=771.999;
C10(14,134)=-8.62e-12; L44(14,152)=-3377.49;
C11(14,152)=-9.13e-12; L45(14,0)=2.07521e+06;
C12(14,0)=5.82569e-07; L46(62,38)=4.20676;
C13(62,38)=2.084e-08; L47(62,110)=-8.93519;
C14(62,110)=-7.68e-09; L48(62,86)=3.76376;
C15(62,86)=2.4426e-08; L49(62,134)=32.1667;
C16(62,134)=2.593e-09; C5(88,0)=1.512e-06;
C17(62,152)=-8.59e-10; L50(62,152)=-140.729;
C18(62,0)=5.83515e-07; L51(62,0)=1.57424e+07;
C19(38,110)=2.236e-09; L52(38,110)=35.7407;
C2(151,0)=7.56e-07; L53(38,86)=-9.62251;
C20(38,86)=-6.497e-09; L54(38,134)=-128.667;
C21(38,134)=-7.36e-10; L55(38,152)=562.917;
C22(38,152)=2.349e-10; L56(38,0)=-4.2182e+06;
C23(38,0)=5.49237e-07; L57(110,86)=3.70797;
C24(110,86)=2.509e-08; L58(110,134)=3.5059;
C25(110,134)=2.49e-08; L59(110,152)=-10.0521;
C26(110,152)=-8.7e-09; C6(14,62)=3.60298e-09;
C27(110,0)=5.8209e-07; L60(110,0)=2.1814e+08;
C28(86,134)=-7.82e-09; L61(86,134)=-8.57778;
C29(86,152)=2.786e-09; L62(86,152)=37.5278;
C3(25,88)=-1.2e-08; L63(86,0)=-5.873e+07;
C30(86,0)=5.72711e-07; L64(134,152)=6.21245;
C31(134,152)=3.69e-08; L65(134,0)=-7.849e+08;
C32(134,0)=5.5842e-07; L66(152,0)=-3.394e+06;
C33(152,0)=1.7144e-07; C7(14,38)=-1.4409e-08;
L35(151,0)=-2.569e+14; C8(14,110)=1.0005e-10;
L37(25,0)=-2.6187e+14; C9(14,86)=-6.7338e-10;
L38(88,0)=-6.7123e+13; L34(88,151)=2.1875;
L39(14,62)=-15.4753; L36(25,88)=2.1875;
C4(25,0)=1.332e-06;
```

Рис. 4. Опис макромоделі мікробалки з трьома ступенями свободи

```
TF K1=UJ1/IJ1;
TF K2=UJ2/IJ2;
FIX T1=MAXA(db.K1,15,25);
FIX T2=MAXA(db.K1,40,60);
FIX T3=MAXA(db.K1,85,105);
FIX T4=MAXA(db.K2,106,120);
OF
```

```
ERROR1=F8(18.745,50.89,97.859,115.49/T1,
T2,T3,T4);
```

Рис. 5. Фрагмент завдання на моделювання на вхідній мові ППП NetALLTED

Модель пластини

Опис схемної макромоделі пластини (рис. 6), отриманий при $\tau_{\min} = 5 \cdot 10^{-5}$, на вхідній мові ППП NetALLTED наведено на рис. 7.

Для цієї макромоделі необхідно, змінюючи

параметри будь-яких елементів схеми, досягти того, щоб четверта резонансна частота мала значення 3427.8 МГц, тобто співпадала з розрахованою за допомогою пакету ANSYS з сумарною похибкою не більше 0.01%. Значення резонансної частоти, яка є аргументом відповідної цільової функції (ЦФ) типу F8, сама ЦФ та необхідна передаточна функція на вхідній мові NetALLTED наведені на рис. 8.

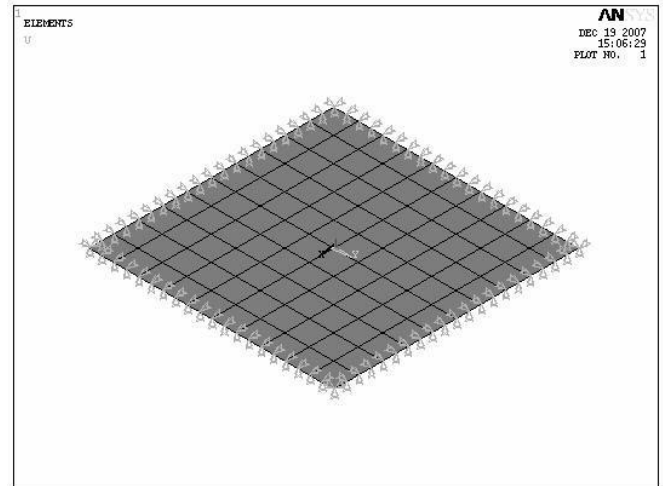


Рис. 6. Скінченноелементна модель пластини акселерометра

```
Circuit membrana; L22(681,0)=1749.7;
J1(827,0)=100; L23(681,827)=81.0134;
C1(749,681)=9.8187e-12; L24(681,1041)=293.884;
C10(1023,0)=9.1175e-11; L25(1023,0)=1748.35;
C11(1023,827)=-1.4e-11; L26(1023,827)=81.0241;
C12(1023,1041)=9.3e-12; L27(1023,1041)=145.914;
C13(0,827)=3.39931e-10; L28(0,827)=-769.548;
C14(0,1041)=9.1135e-11; L29(0,1041)=1779.07;
C15(827,1041)=-1.3e-11; C3(749,0)=9.11471e-11;
L16(749,681)=145.945; L30(827,1041)=81.0423;
L17(749,1023)=293.424; C4(749,827)=-1.450e-11;
L18(749,0)=1743.16; C5(749,1041)=9.051e-12;
L19(749,827)=81.0146; C6(681,1023)=8.851e-12;
C2(749,1023)=-6.76e-12; C7(681,0)=9.11518e-11;
L20(749,1041)=-116.299; C8(681,827)=-1.258e-11;
L21(681,1023)=-116.31; C9(681,1041)=-6.56e-12;
```

Рис. 7. Схемний аналог макромоделі пластини

```
TF K1=UJ1/IJ1;
FIX T1=MAXA(db.k1,3200,3500);
OF ERROR1=F8(3427.8/T1);
```

Рис. 8. Фрагмент завдання на моделювання на вхідній мові ППП NetALLTED

4. Дослідження впливу кількості параметрів, що варіюються, та діапазону їх зміни на результати оптимізації схемних макромоделей механічних складових MEMC

Успіх та витрати на вирішення задач параметричної оптимізації, незалежно від обраного методу оптимізації, в значній мірі залежать від якості та кількості обраних параметрів, що

варіюються. Крім цього, для методу випадкового пошуку зі зменшенням інтервалу пошуку важливим є також визначення інтервалу зміни кожного з таких параметрів.

Для вибору множини параметрів, що варіюються, пропонується використати метод оцінки чутливості цільових функцій до зміни окремих компонентів схеми. Ті компоненти схеми, чутливість цільової функції до зміни значень яких є максимальною серед усіх розрахованих, доцільно включати в множину параметрів, що варіюються.

За допомогою такого підходу для схем, що досліджуються, були вибрані наступні множини параметрів, що варіюються:

для Схеми 1: C5, C3, C4, C7, L8, L11, L12, L14;

для Схеми 2: L53, L61, L62, L64, L36, L34, L39, L40;

для Схеми 3: C1, C11, C12, C10, C15, C14, L16, L26.

Наступним етапом було дослідження впливу кількості параметрів, що варіюються, на результати оптимізації. При цьому для випадків, коли кількість таких параметрів становила менше 8, їх перелік обирався випадково із вказаних вище множин. Щоб нейтралізувати вплив розмірності вибірки для всіх випадків розмір вибірки N обирався рівним 200. Діапазон зміни кожного з параметрів обирався рівним $\pm 20\%$ від їх номінальних значень.

В таблицях 2-4 представлені результати оптимізації тестових задач в залежності від кількості параметрів, що варіюються (в цій та подальших таблицях: КО – кількість оцінок ЦФ, які були витрачені на отримання результату; ПЗЦФ, КЗЦФ – початкове та кінцеве значення ЦФ відповідно; позначка «**» означає, що бажане рішення не отримано).

Табл. 2. Залежність результату оптимізації від кількості параметрів, що варіюються, для Схеми 1 ($N=200$)

Кількість параметрів	ПЗЦФ	Назви параметрів	КО	КЗЦФ
2	$7.3 \cdot 10^{-3}$	L8, L11	818	$7.3 \cdot 10^{-3**}$
4		L8, L11, L12, L14	624	$5.45 \cdot 10^{-7}$
6		L8, L11, L12, L14, C5, C3	494	$5.45 \cdot 10^{-7}$
8		C5, C3, C4, C7, L8, L11, L12, L14	767	$5.45 \cdot 10^{-7}$

Табл. 3. Залежність результату оптимізації від кількості параметрів, що варіюються, для Схеми 2 ($N=200$)

Кількість параметрів	ПЗЦФ	Назви параметрів	КО	КЗЦФ
2	$8.2 \cdot 10^{-3}$	L34, L36	1022	$2.8 \cdot 10^{-3**}$

4		L53, L61, L62, L64	626	$5.5 \cdot 10^{-3**}$
6		L53, L61, L62, L64, L36, L34	850	$5.25 \cdot 10^{-5}$
8		L53, L61, L62, L64, L36, L34, L39, L40	1082	$4.42 \cdot 10^{-5}$

Ці дані свідчать про те, що для вирішення задач параметричної оптимізації схемних аналогів макромоделей механічних складових МЕМС доцільно у якості множини параметрів, що варіюються, обирати 4-6 компонентів з числа можливих.

Табл. 4. Залежність результату оптимізації від кількості параметрів, що варіюються, для Схеми 3 ($N=200$)

Кількість параметрів	ПЗЦФ	Назви параметрів	КО	КЗЦФ
2	$3.5 \cdot 10^{-3}$	C10, C12	618	$9.02 \cdot 10^{-4}$
4		C1, C11, C12, C10	438	$1.36 \cdot 10^{-9}$
6		C1, C11, C12, C10, C15, C14	450	$1.36 \cdot 10^{-9}$
8		C1, C11, C12, C10, C15, C14, L16, L26	454	$1.36 \cdot 10^{-9}$

Наступні дані (таблиці 5-8) дають можливість оцінити вплив розмірів діапазонів можливих значень параметрів, що варіюються, на результати оптимізації. Для цих досліджень у якості множини таких параметрів обирались такі варіанти, які згідно таблиць 2-4 відповідали найкращим варіантам з точки зору як кількості оцінок цільових функцій, які було необхідно витратити для отримання рішення, так і якості отриманого результату (кінцеве значення цільової функції).

Табл. 5. Залежність результату оптимізації від відсоткового діапазону змін параметрів, що варіюються, для Схеми 1 ($N=100$)

Відсотковий діапазон змін параметрів, що варіюються	ПЗЦФ	КО	КЗЦФ
10%	$7.3 \cdot 10^{-3}$	242	$5.45 \cdot 10^{-7}$
20%		326	$8.17 \cdot 10^{-5**}$
30%		434	$5.74 \cdot 10^{-5**}$
40%		434	$3.37 \cdot 10^{-5**}$

Табл. 6. Залежність результату оптимізації від відсоткового діапазону змін параметрів, що варіюються, для Схеми 1 ($N=200$)

Відсотковий діапазон змін параметрів, що варіюються	ПЗЦФ	КО	КЗЦФ
10%	$7.3 \cdot 10^{-3}$	624	$5.45 \cdot 10^{-7}$
20%		834	$9.65 \cdot 10^{-6}$
40%		881	$5.45 \cdot 10^{-7}$

Табл. 7. Залежність результату оптимізації від відсоткового діапазону змін параметрів, що варіюються, для Схеми 2 ($N=200$)

Відсотковий діапазон змін параметрів, що варіюються	ПЗЦФ	КО	КЗЦФ
5%	$8.2 \cdot 10^{-3}$	850	$5.25 \cdot 10^{-5}$
10%		1062	$2.94 \cdot 10^{-5}$
20%		1062	$5.31 \cdot 10^{-4**}$

Табл. 8. Залежність результату оптимізації від відсоткового діапазону змін параметрів, що варіюються, для Схеми 3 ($N = 200$)

Відсотковий діапазон змін параметрів, що варіюються	ПЗЦФ	КО	КЗЦФ
10%	$3.54 \cdot 10^{-3}$	438	$1.36 \cdot 10^{-9}$
20%		438	$1.36 \cdot 10^{-9}$
30%		438	$1.36 \cdot 10^{-9}$

Наведені дані з високим ступенем ймовірності дозволяють зробити висновок, що для вирішення задач параметричної оптимізації схемних аналогів макромоделей механічних складових MEMC найбільш доцільно обирати у якості інтервалів можливої зміни кожного з параметрів, що варіюються, інтервали, які дорівнюють $\pm 10 \div 20\%$ від значень відповідного компонента на початку оптимізації. Окремо слід відзначити, що при малих розмірах вибірки (табл. 5), результат оптимізації виявляється дуже чутливим до розмірів можливих інтервалів зміни параметрів, що варіюються. Навпаки, результати табл. 8 свідчать про те, що в окремих випадках зміна розміру можливих інтервалів значень параметрів, що варіюються, мало впливає на результат оптимізації.

5. Дослідження впливу розміру вибірки на результати оптимізації схемних макромоделей механічних складових MEMC

Успіх вирішення задачі параметричної оптимізації за допомогою методу випадкового пошуку зі зменшенням інтервалу пошуку в значній мірі залежить від розміру вибірки на кожному кроці оптимізації. В таблицях 9-11 наведено результати оптимізації тестових задач за допомогою методу випадкового пошуку зі зменшенням інтервалу пошуку при зміні розміру вибірки.

Табл. 9. Залежність результату оптимізації від розміру вибірки для Схеми 1

Розмір вибірки	ПЗЦФ	КО	КЗЦФ
50	$7.3 \cdot 10^{-3}$	276	$3.9 \cdot 10^{-5**}$
100		242	$5.45 \cdot 10^{-7}$
150		518	$5.45 \cdot 10^{-7}$
200		624	$5.45 \cdot 10^{-7}$
300		719	$5.45 \cdot 10^{-7}$
400		2042	$2.43 \cdot 10^{-7}$

Табл. 10. Залежність результату оптимізації від розміру вибірки для Схеми 2

Розмір вибірки	ПЗЦФ	КО	КЗЦФ
50	$8.2 \cdot 10^{-3}$	250	$1.97 \cdot 10^{-4**}$
100		562	$5.86 \cdot 10^{-5}$
150		812	$9.05 \cdot 10^{-5}$
200		850	$5.25 \cdot 10^{-5}$
300		1250	$8.96 \cdot 10^{-5}$

Табл. 11. Залежність результату оптимізації від розміру вибірки для Схеми 3

Розмір вибірки	ПЗЦФ	КО	КЗЦФ
50	$3.54 \cdot 10^{-3}$	176	$5.34 \cdot 10^{-6**}$
100		434	$3.32 \cdot 10^{-7**}$
150		528	$1.36 \cdot 10^{-9}$
200		669	$1.36 \cdot 10^{-9}$
300		928	$1.36 \cdot 10^{-9}$
400		1235	$1.36 \cdot 10^{-9}$

Ці дані з високим ступенем ймовірності дозволяють зробити висновок, що для вирішення задач параметричної оптимізації схемних аналогів макромоделей механічних складових MEMC за допомогою методу випадкового пошуку зі зменшенням інтервалу пошуку найбільш доцільно обирати розмір вибірки $100 \div 200$.

На рис. 9-11 представлені АЧХ для всіх тестових задач до та після оптимізації.

6. Рекомендації щодо використання параметричної оптимізації для уточнення параметрів схемних макромоделей механічних складових MEMC

Перевагою підходу, заснованого на оптимізації параметрів схеми, є малий розмір скороченої еквівалентної схеми, а також, при вузькому діапазоні робочих частот, можливість одержати необхідні частоти з високою точністю. Недоліком є необхідність проведення додаткового аналізу схеми для виділення найбільш чутливих елементів. При занадто малому розмірі скороченої схеми чутливість до кожного елементу буде зростати, що створює складності як для визначення діапазонів зміни параметрів, що варіюються, так і для роботи методів оптимізації при пошуку глобального оптимуму.

Результати проведених досліджень дають можливість сформулювати такі рекомендації щодо використання параметричної оптимізації для уточнення параметрів схемних аналогів макромоделей механічних складових MEMC за допомогою пакету NetALLTED:

1. За допомогою аналізу чутливості обрати множину параметрів, що варіюються, у кількості 8-12 компонентів.
2. Випадковим чином з цієї множини вибрати 4-6 параметрів.
3. Призначити для кожного параметру, що варіюється, діапазон можливих змін у розмірі $\pm 10 \div 20\%$.
4. Обрати значення максимально допусти-

мої величини цільової функції, виходячи з параметрів необхідної точності (як правило, $1.0E-4 \div 1.0E-6$, що відповідає похибці аргументу цільової функції в $1 \div 0.1\%$).

5. За допомогою методу випадкового пошуку зі зменшенням інтервалу пошуку зробити спробу вирішити завдання, задавши розмір вибірки $100 \div 200$.
6. Якщо у пункті 5 успіху не було досягнуто, змінити множину параметрів, що варіюються, вибравши їх з числа перелічених в пункті 1, і перейти до пункту 3.

7. Висновки

1. Детально досліджено особливості цільових функцій схемних макромоделей МЕМС та проведено аналіз існуючих на

сьогодні засобів САПР, які можуть вирішувати задачі параметричної оптимізації.

2. Експериментально, за допомогою вирішення тестових задач оптимізації схемних макромоделей механічних складових МЕМС, досліджено вплив якості та кількості параметрів, що варіюються, діапазонів їх зміни та розміру вибірки на результати вирішення тестових задач за допомогою методу випадкового пошуку зі зменшенням інтервалу пошуку.
3. Розроблено рекомендації по використанню блоку оптимізації пакету NetALLTED для уточнення параметрів схемних макромоделей механічних складових МЕМС.

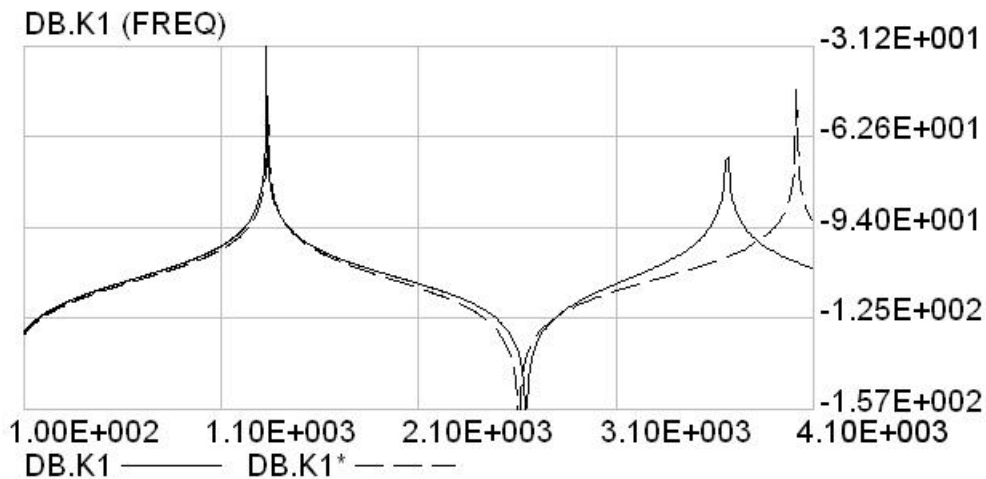


Рис. 9. Вигляд АЧХ Схеми 1 до і після (*) оптимізації

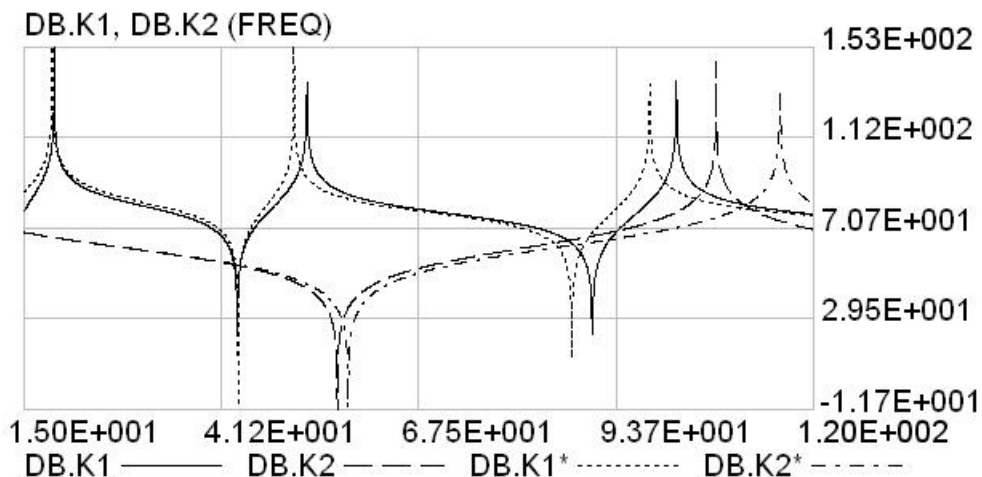


Рис. 10. Вигляд АЧХ Схеми 2 до і після (*) оптимізації

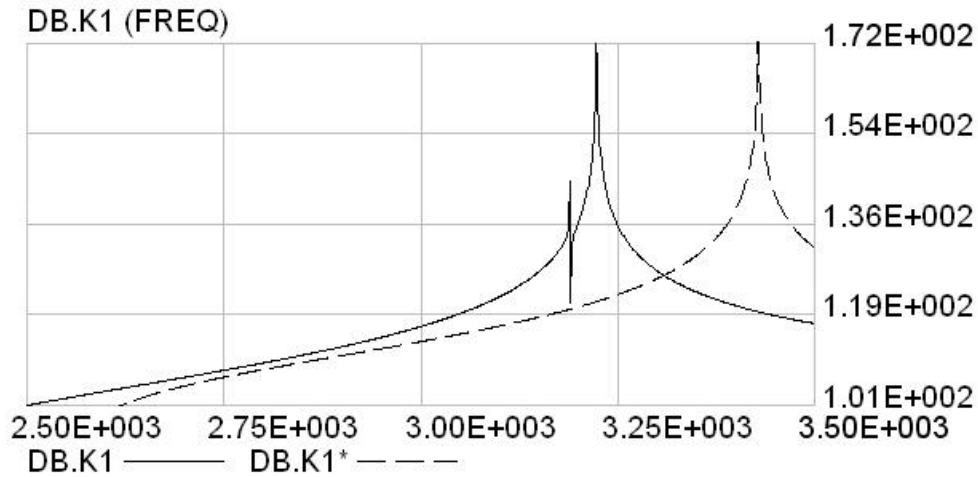


Рис. 11. Вигляд АЧХ Схеми 3 до і після (*) оптимізації

Список літератури

1. Ладогубец В.В. Методика построения моделей механических компонентов МЭМС для пакетов схемотехнического проектирования / Ладогубец В.В., Чкалов А.В., Безносик А.Ю., Финогенов А.Д. // Электроника и связь: тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – 2009. – Ч. 1, № 2/3. – С. 298–305.
2. Petrenko A. Using Optimization Procedures to Calculate Parameters of MEMS Macromodels / Petrenko A., Ladogubets V., Beznosyk O., Finogenov O. // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics : 10-th Anniversary Intern. Conf. «CADSM'2009», 24-28 February 2009, Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine : proc. – Lviv, 2009. – P. 511–514.
3. Безносик А.Ю. Особенности оптимизации макромоделей механических компонентов с несколькими степенями свободы / Безносик А.Ю., Ладогубец Т.С., Ладогубец А.В. // Системный анализ и информационные технологии: 12-я международная научно-техническая конференция «САИТ-2010», 25-29 мая 2010, Киев, Украина : материалы. – К. : УНК «ИПСА» НТУУ «КПИ», 2010. – С. 356.
4. Petrenko A. ALLTED – a computer-aided engineering system for electronic circuit design / Petrenko A., Ladogubets V., Tchkalov V., Pudlowski Z. – Melbourne: UICEE, 1997. – 205 p.
5. Ладогубец В.В. Состояние и перспективы развития автоматизированного схемотехнического проектирования / Ладогубец В.В. // Электроника и связь: Тематический выпуск «Проблемы электроники». – 2005. – Ч. 1. – С. 121–127.