

## МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ РІЗНОМАНІТНИМИ СИСТЕМАМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

*Розглядається методика спільного використання окремих видів систем автоматизованого проектування (САПР), таких як: система схемотехнічного моделювання MULTISIM і система конструкторського проектування P-CAD – під час створення проекту радіоелектронного пристрою (РЕП) та проекту його друкованої плати. Як приклад РЕП моделюється схема активного смугового фільтра другого порядку, що побудований на базі операційного підсилювача (ОП).*

**Постановка проблеми.** Сучасні радіотехнічні комплекси і системи стають усе більш складними та багатофункціональними внаслідок підвищення кількості та якості вимог, які висуваються до них з метою найкращого задоволення потреб суспільства. Це є причиною того, що подібні системи потребують постійного удосконалення (модернізації). Їх складність обумовлена тим, що вони будуються з множини пристроїв, вузлів та модулів, які можуть діяти за різними фізичними принципами, різною елементною базою, різними режимами роботи, але повинні працювати у взаємозв'язку між собою. Зазначене свідчить про те, що для вдосконалення вказаних пристроїв слід застосовувати знання та вміння з різних технічних галузей. Це суттєво ускладнює процес розробки і, як наслідок, збільшує часові затрати. Тому постає завдання у пошуку шляхів до спрощення цього процесу з одночасним зменшенням навантаження і скороченням термінів.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Відомо [1], що процес розробки (створення) включає два окремі етапи: проектування та виробництва. Саме етап проектування потребує багато зусиль з боку інженерів-проектувальників і втрачається багато часу на пошук оптимальних рішень для підвищення якості майбутнього об'єкта. Загалом, етап проектування для будь-якої технічної системи поділяється на власні етапи: функціональний, конструкторський, технологічний. Стосовно ж радіоелектронної апаратури (РЕА) виділяють такі етапи проектування: системотехнічний; функціональний (схемотехнічний); технічний (конструкторський); технологічний. З погляду на складність завдань, які повинні вирішуватись на вказаних етапах, слід зазначити, що суттєве спрощення процесу проектування не можливе без використання сучасних САПР [2, 3], особливо на етапах схемотехнічного і конструкторського проектування. Але оскільки в сучасному світі існує багато подібних систем [4], то виникає потреба в обранні конкретних видів САПР і в спільному їх використанні. Досвід застосування свідчить про те, що однією з найкращих серед систем схемотехнічного моделювання на сучасному етапі є система MULTISIM [5], а серед систем конструкторського проектування – P-CAD [6].

**Формулювання завдання дослідження.** Виходячи з наведеного вище, головною метою статті є запропонувати методику спільного використання різноманітних САПР для більш якісного, швидкого і зрозумілого створення проектів пристроїв при розробці нової або модернізації існуючої РЕА. Зазначена методика повинна вирішувати багато окремих

© Ю. В. Пономарьов, О. Ю. Дячук, І. Г. Грабар, 2013

завдань, основними з яких є: вибір необхідних САПР з урахуванням існуючих недоліків і переваг; визначення методики розрахунку параметрів компонентів і порядку проведення дослідження схеми; забезпечення логічного зв'язку між окремими САПР, які є різними за призначенням і принципами застосування, але повинні взаємодіяти між собою в процесі проектування на різних етапах тощо.

**Виклад основного матеріалу.** Для того, щоб докладно розглянути методику проектування та ретельно її проаналізувати, слід спочатку визначити конкретний РЕП, проект якого потрібно створити (постановка завдання), оскільки саме його призначення та складність суттєво впливають на кількість та сутність окремих етапів і процедур проектування різними САПР. Як приклад РЕП використаємо схему активного смугового фільтра другого порядку, побудованого на базі ОП з інвертуючим входом [7]. Кінцевим результатом проектування повинні стати результати моделювання з відповідними характеристиками фільтра і проект його друкованої плати.

Виходячи з [8], загальна методика проектування активних фільтрів включає три основні етапи: завдання технічних вимог; визначення передаточної функції фільтра; конструювання активного фільтра. Проте, як було зазначено раніше, потреба у використанні САПР свідчить про доцільність додавання до цієї методики вже як мінімум ще одного етапу – етапу моделювання, який варто виконати перед конструюванням. З погляду ж тих завдань, які потрібно вирішувати на різних етапах проектування, і особливо на схемотехнічному та конструкторському, впливає, що до методики [8] слід додати ще декілька власних етапів (процедур). Крім того, як показує досвід, під час проведення проектування виникає ще багато різних завдань, наявність і сутність яких залежить від поставленого завдання й умов застосування РЕП. Це вибір і різних методик розрахунку, і режимів аналізу, і порядку логічного поєднання взаємодії окремих САПР, і багато іншого. Виходячи з викладного і враховуючи досвід фахівців у галузі проектування РЕА, можна запропонувати методику спільного використання САПР для створення пристрою та його друкованої плати.

### **1. Завдання технічних вимог**

Вимоги (початкові (вхідні та вихідні) дані) визначаються, виходячи з призначення проектованого пристрою і умов використання. Для смугових фільтрів важливими параметрами є нижня ( $f_H$ ) та верхня ( $f_B$ ) частоти смуги пропускання фільтра ( $\Delta f$ ) та коефіцієнт його підсилення в смузі пропускання ( $K_0$ ). Ці параметри впливають на амплітудно-частотну (АЧХ) і фазово-частотну характеристики (ФЧХ) фільтра.

Для нашого фільтра задамо, наприклад, такі початкові дані: нижня частота  $f_H = 6650$  Hz; верхня частота  $f_B = 7350$  Hz; коефіцієнт підсилення  $K_0 = 2$ .

### **2. Визначення математичної моделі пристрою**

Для того, щоб провести моделювання пристрою в системах схемотехнічного моделювання, слід заздалегідь визначити: математичну модель пристрою; характеристики та параметри, за якими буде проведено аналіз його роботи. Для будь-якого фільтра такою математичною моделлю є передаточна функція, яка характеризує, по-перше, його порядок, а по-друге, до якого виду він належить (фільтр нижніх частот (ФНЧ), фільтр верхніх частот (ФВЧ), смуговий, режекторний тощо). Активний смуговий фільтр другого порядку має таку передаточну функцію в операторній формі [7, 9, 10]:

$$K(P) = \frac{K_0}{1 + 1/\Delta\Omega \cdot [P + (1/P)]} = \frac{K_0 \cdot \Delta\Omega \cdot P}{1 + \Delta\Omega \cdot P + P^2}, \quad (1)$$

де  $P = p / \omega_p = j\omega / \omega_p = j\Omega$  – безрозмірна (нормована) функція частоти;

$p = j\omega$  – комплексна функція частоти,  $j = \sqrt{-1}$ ;

$\omega$  – колова частота;

$\omega_p$  – резонансна частота;

$\Omega = \omega / \omega_p = f / f_p$  – відносна частота;

$f = \omega / 2\pi$  – частота сигналу;

$\Delta\Omega = \Omega_B - \Omega_H$  – нормована смуга пропускання фільтра;

$\Omega_B$  – нормована верхня (максимальна) частота зрізу фільтра;

$\Omega_H$  – нормована нижня (мінімальна) частота зрізу фільтра.

Якщо початково задано смугу пропускання фільтра та його резонансну частоту, то розрахунок його нормованих частот, на яких коефіцієнт передачі зменшується на 3 dB, можна здійснити за таким виразом:

$$\Omega_{B/H} = \sqrt{(\Delta\Omega)^2 + 4} \pm \frac{1}{2} \Delta\Omega. \quad (2)$$

Характеристиками фільтрів, які доцільно аналізувати за результатами моделювання, слід обрати АЧХ і ФЧХ.

### 3. Визначення засобів і порядку дослідження пристрою

Визначається перелік основних вимірювальних приладів і, якщо потрібно, окремих режимів аналізу, виходячи з призначення пристрою, його початкових даних та умов застосування. Сучасні САПР мають можливість провести безліч різних режимів аналізу, наприклад: розрахунок перехідних процесів (Transient...); Фур'є-аналіз (Fourier...); аналіз спектра внутрішніх шумів (Noise...); аналіз впливу зміни параметрів компонентів схеми на її характеристики (Parameter sweep...(варіація параметрів)) і т. ін.

Для аналізу роботи фільтрів слід використати такі пристрої та вимірювальні прилади: функціональний генератор (джерело сигналів) – для задання вхідних сигналів з відповідними параметрами; бode-плотер – для вимірювання АЧХ і ФЧХ фільтра; осцилограф – для вимірювання параметрів вхідних і вихідних сигналів.

Доцільно застосувати такий порядок дослідження смугового фільтра: спочатку отримуються результати моделювання на резонансній частоті ( $f_p$ ), потім на частотах зрізу ( $f_H, f_B$ ), а далі на тих, які менші та більші за частоту зрізу та рівновіддалені від резонансної [9]. Наприклад:  $f_{1,2} = f_p \pm 0,5 \cdot f_p$ , тобто  $f_1 = 7 - 3,5 = 3,5$  kHz, а  $f_2 = 7 + 3,5 = 10,5$  kHz. Після цього можна дослідити фільтр і в режимах, що були наведені вище.

### 4. Вибір конкретних САПР для реалізації проекту

Здійснюється з огляду на поставлене завдання, порядок дослідження, обрані режими аналізу, недоліки та переваги конкретних систем проектування. Як було визначено раніше, обрано MULTISIM і P-CAD.

5. Вибір схеми (схем) проєктованого об'єкта

Оскільки може існувати декілька схем для реалізації конкретного типу фільтра, то необхідно серед них обрати якусь одну. Якщо заздалегідь відомо, що якась конкретна схема має кращі показники за результатами моделювання, то доцільно обрати саме її. Якщо це невідомо, то можна провести моделювання різних схем і потім за його результатами обрати найкращу. У нашому випадку оберемо схему на ОП, яка має складний негативний зворотний зв'язок інтегро-диференціального типу (рис. 1а). АЧХ зазначеного фільтра наведено на рис. 1б.

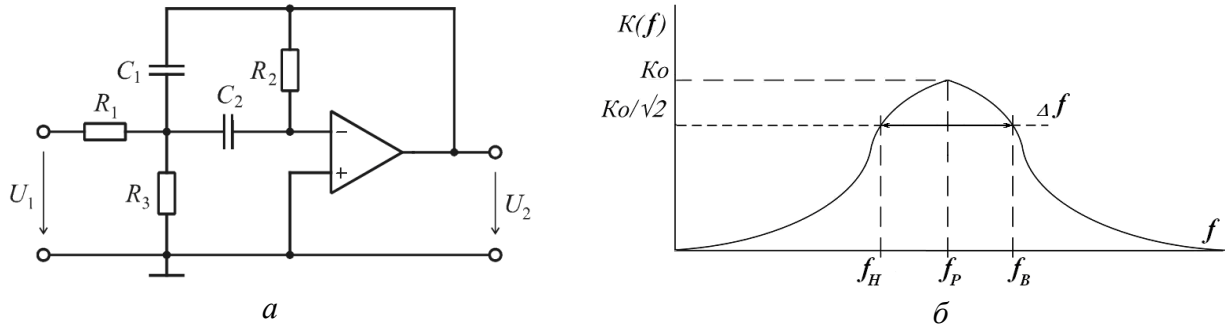


Рис. 1. Смуговий фільтр другого порядку з інвертувальним входом ОП: а) схема; б) АЧХ

Основними характеристиками зазначеного фільтра є коефіцієнт передачі на резонансній частоті ( $K_p = K_0$ ) і добротність  $Q$ . Знаючи ( $f_B$ ) і ( $f_H$ ) або знайшовши  $\Omega_B$  і  $\Omega_H$  за виразом (2), можна визначити добротність:

$$Q = \frac{f_p}{f_B - f_H} = \frac{1}{\Omega_B - \Omega_H} = \frac{1}{\Delta\Omega} \tag{3}$$

Добротність характеризує крутість АЧХ фільтра, тобто швидкість її наростання чи спаду. Зазвичай для фільтрів першого порядку береться швидкість наростання чи спаду АЧХ 20 dB на декаду, а для фільтрів другого порядку – 40 dB на декаду.

Якщо  $Q \leq 10$ , то фільтр вважається широкосмуговим, інакше – вузькосмуговим.

Враховуючи (3), вираз (1) можна записати як

$$K(P) = \frac{(K_p / Q) \cdot P}{1 + (1 / Q) \cdot P + P^2} \tag{4}$$

Аналізуючи схему на рис. 1а, з урахуванням  $C_1 = C_2 = C$  можна записати остаточну передаточну функцію фільтра [7]:

$$K(P) = \frac{-\frac{R_2 R_3}{R_1 + R_3} C \omega_p P}{1 + \frac{2 R_1 R_3}{R_1 + R_3} C \omega_p P + \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_3} C^3 \omega_p^2 P^2} \tag{5}$$

Застосовуючи ряд перетворень з (5), з урахуванням (4) можна знайти добротність фільтра через параметри схеми:

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1 R_3}} = \pi R_2 C f_p; \quad (6)$$

коефіцієнт передачі фільтра на резонансній частоті:

$$-K_p = R_2 / 2R_1; \quad (7)$$

резонансну частоту через параметри схеми:

$$f_p = \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{R_1 + R_3}{R_1 R_2 R_3}}. \quad (8)$$

### 6. Вибір методики розрахунку параметрів компонентів схеми

Так само, як у попередньому пункті, для кожної схеми фільтра може існувати декілька методик розрахунку параметрів компонентів. Тому, якщо заздалегідь невідома найкраща методика, то обирається будь-яка або послідовно використовується кожна, отримуються результати моделювання, а потім обирається найкраща. У нашому випадку скористаємося методикою [7] і окремими положеннями [9, 10].

### 7. Розрахунок параметрів компонентів схеми за обраною методикою

Відповідно до обраної методики і заданих значень ( $f_H$ ) і ( $f_B$ ) розрахуємо параметри компонентів обраної схеми фільтра.

Знаходимо резонансну частоту фільтра через початкові дані:

$$f_p = 0,5 \cdot (f_H + f_B) = 0,5 \cdot (6650 \text{ Hz} + 7350 \text{ Hz}) = 7000 \text{ Hz}.$$

Визначаємо смугу пропускання фільтра:

$$\Pi_{0,707} = \Delta f = f_B - f_H = 7350 - 6650 = 700 \text{ Hz}.$$

З виразу (3) встановлюємо добротність передаточної функції фільтра:  $Q = f_p / \Pi_{0,707} = 7000 \text{ Hz} / 700 \text{ Hz} = 10$ . Фільтр вважається широкосмуговим.

Обираємо ОП. Оскільки смуга пропускання фільтра знаходиться в низькочастотному діапазоні, то в MULTISIM оберемо звичайний ОП серії 741.

Обираємо ємності конденсаторів, наприклад,  $C_1 = C_2 = 5 \text{ nF}$ .

Знаходимо опори резисторів.

Враховуючи вирази (3), (6), знаходимо опір резистора  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{1}{\pi \cdot C_1 \cdot \Pi_{0,707}} = \frac{1}{3,14 \cdot 5 \text{ nF} \cdot 700 \text{ Hz}} \approx 91 \text{ k}\Omega.$$

На основі виразу (7) знаходимо опір резистора  $R_1$ :

$$R_1 = R_2 / (2 \cdot K_p) = 91 \text{ k}\Omega / (2 \cdot 2) \approx 22,8 \text{ k}\Omega.$$

З урахуванням виразів (6)–(8) знайдемо опір резистора  $R_3$  :

$$R_3 = \frac{R_2}{4 \cdot Q^2 - 2 \cdot K_p} = \frac{91 \text{ k}\Omega}{4 \cdot 10^2 - 2 \cdot 2} \approx 230 \Omega.$$

Щоб опір  $R_3$  був позитивним, має виконуватися умова  $2 \cdot Q^2 > K_p$ .

У нашому випадку  $200 > 2$ , тобто умова виконується.

**8. Налаштування та моделювання схеми пристрою в MULTISIM**

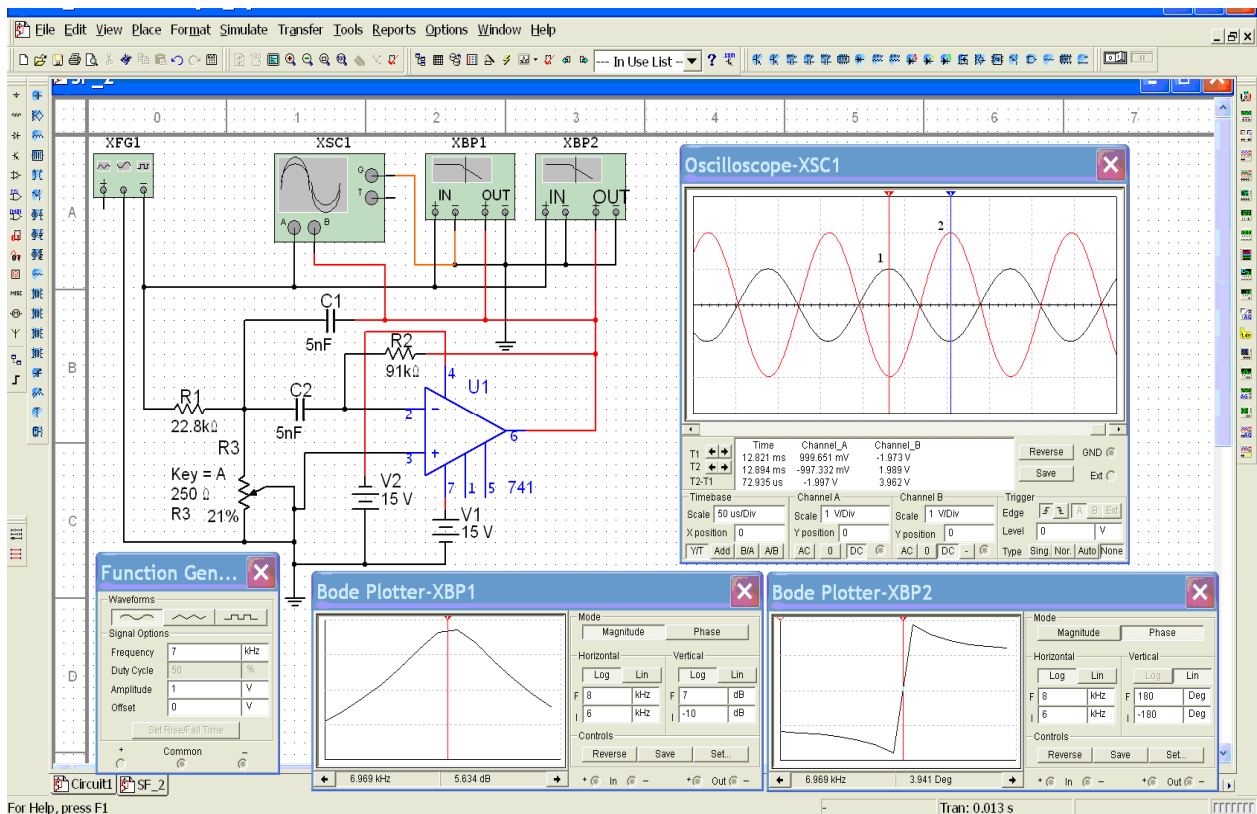
У розглянутому варіанті налаштування та моделювання смугового фільтра в різних режимах здійснюється в системі MULTISIM.

Виходячи з (3) і враховуючи (6), можна знайти, чому буде дорівнювати смуга пропускання фільтра через параметри компонентів схеми:

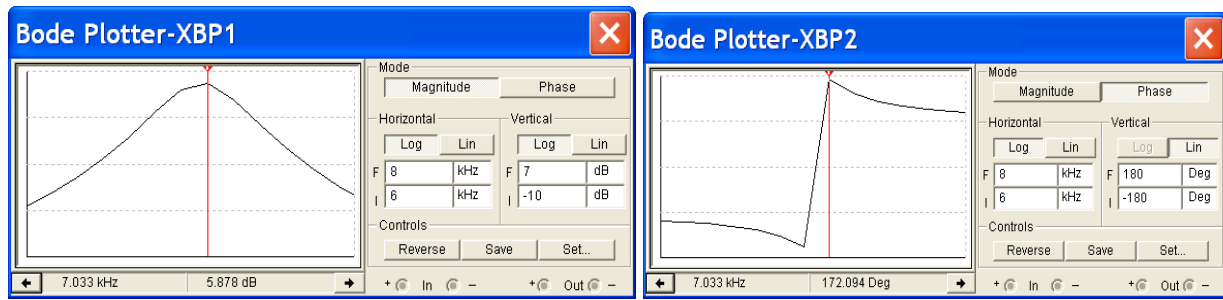
$$\Delta f = \Pi_{0,707} = f_p / Q = 1 / \pi R_2 C. \tag{9}$$

Отже, з виразу (9) випливає, що  $\Delta f$  не залежить від опорів резисторів  $R_1$  і  $R_3$ , а  $K_p$  не залежить від  $R_3$ , тому можна змінювати резонансну частоту  $f_p$ , змінюючи  $R_3$ , без зміни коефіцієнта передачі  $K_p$ . Це означає, що для налаштування фільтра чітко на резонансну частоту ( $f_p$ ) доцільно замість резистора постійного опору  $R_3$  використати потенціометр.

Результати моделювання активного смугового фільтра системою комп'ютерного моделювання MULTISIM для резонансної частоти  $f_p = 7 \text{ kHz}$  наведено на рис. 2.



a)



б)

Рис. 2. Результати моделювання фільтра на резонансній частоті ( $f_p = 7$  kHz):

- а) моделювання, що відповідає частоті, на якій спостерігається мінімальна різниця фаз;  
 б) моделювання, що відповідає частоті максимуму вершини АЧХ

На рис 2, а наведено схему фільтра з його визначеними вище параметрами компонентів і вимірювальні прилади для аналізу його роботи (функціональний генератор (XFG1) – для задання параметрів вхідного гармонічного сигналу; два боде-плотери (ХВР1 і ХВР2) – для одночасного спостереження АЧХ і ФЧХ фільтра; двоканальний осцилограф (XSC1) – для відображення вхідного та вихідного сигналів).

На функціональному генераторі (XFG1) задано режим формування гармонічного сигналу й значення його параметрів: амплітуда – 1 V; частота – 7 kHz. Саме такий сигнал є вхідним для досліджуваного фільтра на даному етапі.

На осцилографі (XSC1) наведено вхідний (1, Channel\_A) і вихідний (2, Channel\_B) сигнали. Оскільки в обох каналах по вертикальній осі Y (напряга) встановлено однакове значення 1 вольт на клітину (1 V/Div), то це означає, що сигнал на виході фільтра дорівнює (грубо) 2 V (2 клітини) і більший, ніж на вході 1 V (1 клітина), вдвічі, що підтверджується початковим заданим значенням коефіцієнта підсилення фільтра  $K_0 = 2$ . Точні значення амплітуди вхідного і вихідного сигналів можна побачити в спеціальних вікнах напроти Channel\_A і Channel\_B, у яких відображаються значення перетину вертикальних візирних ліній в основному вікні осцилографа з діаграмами сигналів. Амплітуда вхідного сигналу напроти Channel\_A у першому рядку (перша T1 вертикальна візирна лінія (ліворуч) становить 999,651 mV. У другому рядку наведено значення амплітуди негативної хвилі гармонічного вхідного сигналу, яку перетинає друга T2 вертикальна візирна лінія (праворуч): -997,332 mV. Так само для вихідного сигналу. Напроти Channel\_B у першому рядку наведено значення перетину першої T1 візирної лінії негативної хвилі вихідного гармонічного сигналу: -1,973 V. У другому рядку – другої вертикальної лінії T2 з позитивною хвилею вихідного гармонічного сигналу: 1,989 V. Крім того, з осцилографа видно, що вихідний сигнал порівняно з вхідним знаходиться в протифазі, що пояснюється схемою фільтра (інвертувальним входом ОП).

На боде-плотерах ХВР1 і ХВР2 наведено відповідно АЧХ і ФЧХ фільтра. За допомогою вертикальних візирних ліній, що перетинають АЧХ і ФЧХ на частоті, яка приблизно дорівнює резонансній (6,969 kHz – нижнє ліве віконце), визначені: значення коефіцієнта передачі фільтра (5,634 dB – середнє віконце ХВР1 (1,91 – у лінійному масштабі)); значення різниці фаз між вихідним і вхідним сигналами (3,941 Deg – середнє віконце ХВР2). Останнє значення є мінімальним серед тих, які можна реально виставити та побачити шляхом зсуву по горизонтальній осі частот вертикальної візирної лінії ХВР2. В ідеалі воно повинне дорівнювати нулю, що свідчитиме про точку швидкого переходу

різниці фаз з  $-180^\circ$  до  $180^\circ$  на резонансній частоті (умовному максимуму АЧХ). Таким чином, з огляду ФЧХ визначено точку ( $f = 6,969$  kHz), найбільш наближену, що підходить до заданої резонансної частоти. Точніше виставити цю частоту на бode-плотерах для заданого діапазону частот просто не вдається (особливості системи).

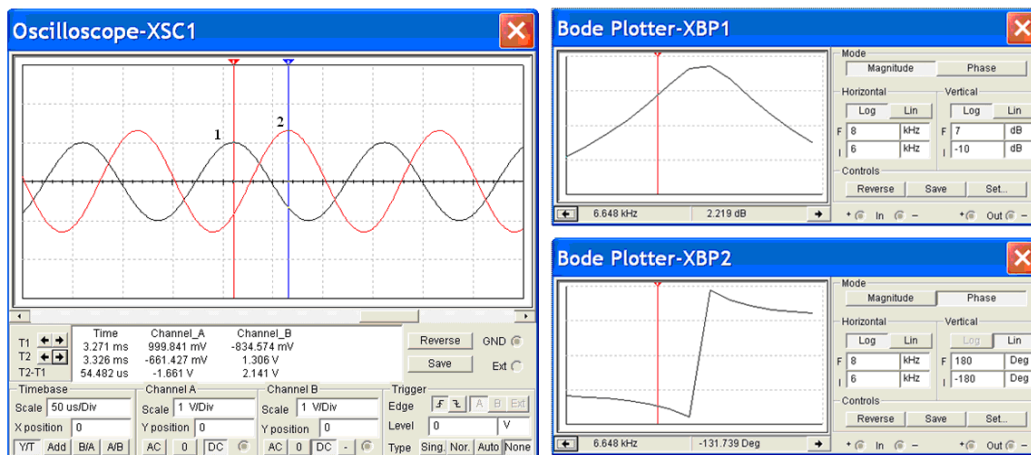
З аналізу АЧХ (ХВР1) можна побачити, що вершина цієї характеристики не є рівномірною. Існує максимум наприкінці цієї вершини. З аналізу ФЧХ (ХВР2) випливає, що різниця фаз між сигналами змінюється в такому порядку: до резонансної частоти – від  $-90^\circ$  до  $-180^\circ$ ; після резонансної частоти – від  $180^\circ$  до  $90^\circ$ .

На рис. 2б за допомогою вертикальної візирної лінії в ХВР1 знайдено максимальний коефіцієнт передачі фільтра (5,878 dB), який відповідає частоті максимуму вершини АЧХ (7,033 kHz). У ХВР2 на цій же частоті наведено значення різниці фаз між сигналами, яке вже становить 172,094 Deg, тобто майже в протифазі.

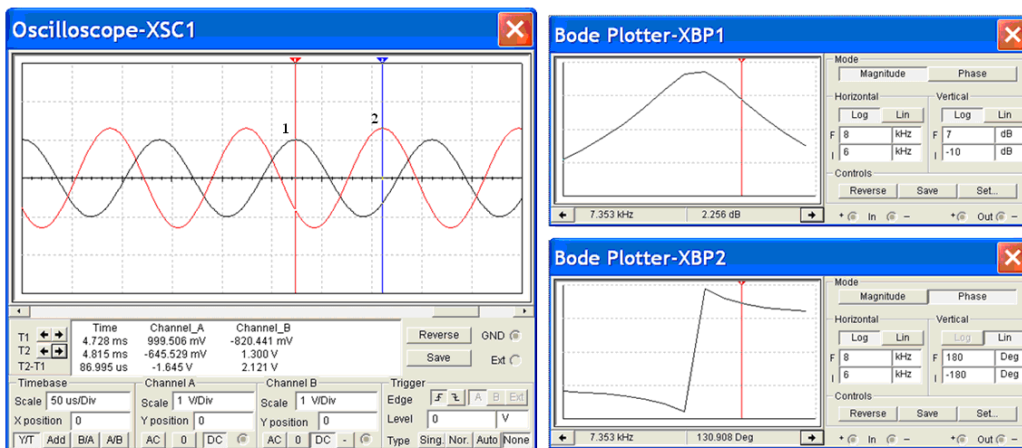
**9. Дослідження схеми пристрою**

Відповідно до визначеного раніше порядку дослідження схеми проведено спочатку моделювання роботи фільтра на нижній ( $f_H = 6,65$  kHz) і верхній ( $f_B = 7,35$  kHz) частотах його зрізу, а потім на частотах  $f_1 = 3,5$  kHz і  $f_2 = 10,5$  kHz. Це означає, що при кожному наступному моделюванні при незмінній амплітуді сигналу 1 V слід змінювати частоту функціонального генератора (XFG1) на частоту досліджуваного сигналу.

Результати моделювання фільтра на частотах  $f_H$ ,  $f_B$  наведено на рис. 3.



a)



б)

Рис. 3. Результати моделювання фільтра: а) на частоті зрізу  $f_H$ ; б) на частоті зрізу  $f_B$



На рис. 3а зображено результати моделювання фільтра на частоті  $f_H = 6,65 \text{ kHz}$ . З осцилографа видно, що амплітуда сигналу на виході (2, Channel\_B) вже становить не 2 V, як на рис. 2а, а близько 1,3 V, тобто підсилення вже майже не відбувається. Сигнал на виході фільтра практично такий, як і на вході, але вже не в протифазі. На бode-плотері ХВР1 з наведеної АЧХ зрозуміло, що на частоті  $f = 6,648 \text{ kHz}$  коефіцієнт передачі фільтра становить 2,219 dB (1,302 – у лінійному масштабі). Різниця порівняно з рис. 2а становить:  $5,634 - 2,219 \approx 3,4 \text{ dB}$ , що приблизно (грубо) дорівнює класичним 3 dB. На бode-плотері ХВР2 з наведеної ФЧХ видно, що різниця фаз для тієї ж самої частоти  $f = 6,648 \text{ kHz}$  близько  $-131,2^\circ$ , тобто, як уже вказувалося, не в протифазі, що і спостерігаємо на осцилографі.

На рис. 3б наведено результати моделювання фільтра на частоті  $f_B = 7,35 \text{ kHz}$ . Вони за своїми показниками близькі за абсолютними значеннями до наведених на рис. 3а. З осцилографа видно, що амплітуда сигналу на виході (2, Channel\_B) становить 1,3 V. На бode-плотері ХВР1 з наведеної АЧХ зрозуміло, що на частоті  $f = 7,353 \text{ kHz}$  (приблизно дорівнює заданій  $f_B = 7,35 \text{ kHz}$ ) коефіцієнт передачі фільтра 2,256 dB (1,303 – у лінійному масштабі). Різниця порівняно з рис. 2а теж, як і в попередньому випадку, становить:  $5,634 - 2,256 \approx 3,4 \text{ dB}$ . На бode-плотері ХВР2 з наведеної ФЧХ фільтра впливає, що різниця фаз для тієї ж самої частоти  $f = 7,353 \text{ kHz}$  приблизно становить  $130,9^\circ$ , тобто майже так само, як і на рис. 3а, але з іншим знаком.

Результати моделювання фільтра на частотах  $f_1, f_2$  наведено на рис. 4.

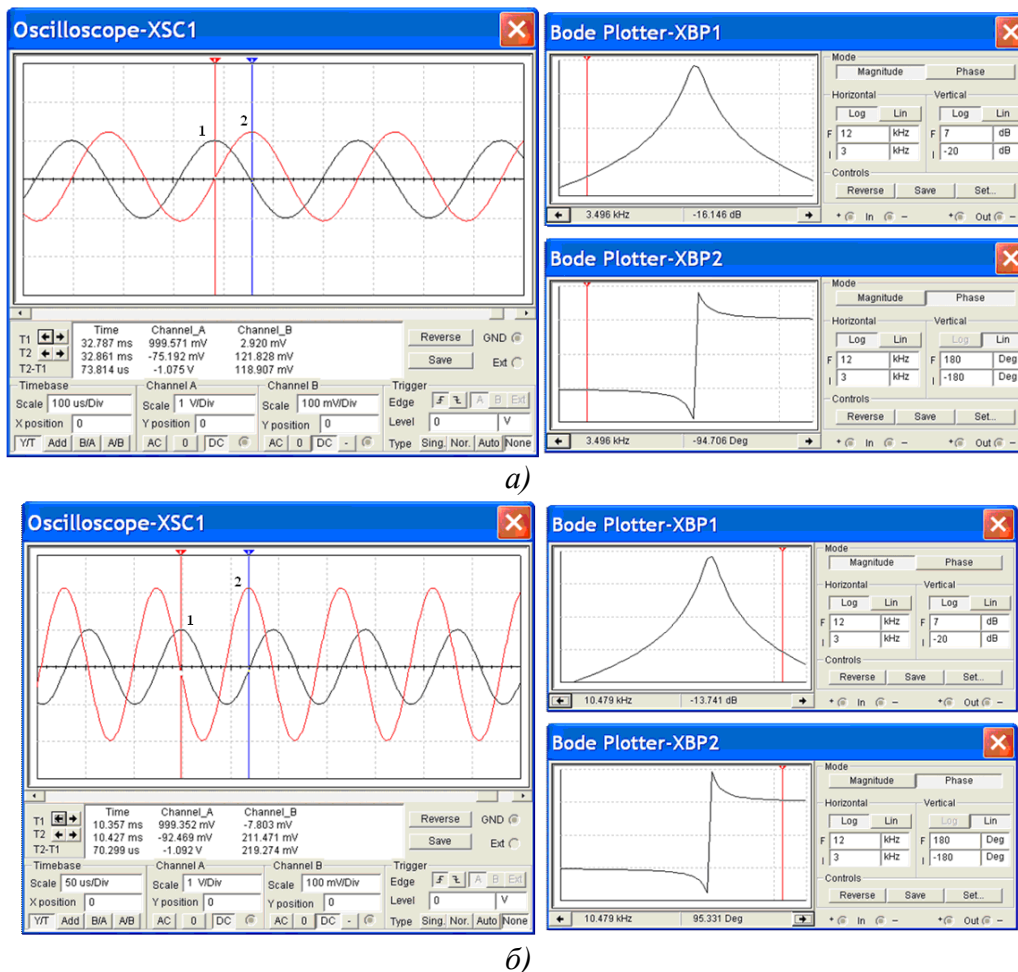


Рис. 4. Результати моделювання фільтра: а) на частоті  $f_1$ ; б) на частоті  $f_2$

На рис. 4а наведено результати моделювання фільтра на частоті  $f_1 = 3,5$  kHz. З осцилографа видно, що амплітуда сигналу на виході (2, Channel\_B) близько 121,8 mV, тобто сигнал суттєво подавлюється. На бode-плотері ХВР1 з наведеної АЧХ зрозуміло, що на частоті  $f = 3,496$  kHz (приблизно дорівнює  $f_1 = 3,5$  kHz) коефіцієнт передачі фільтра  $-16,146$  dB (0,156 – у лінійному масштабі). Різниця порівняно з рис. 2а становить:  $5,634 - (-16,146) \approx 22,8$  dB, тобто приблизно на 23 dB менше, ніж на резонансній частоті. На бode-плотері ХВР2 з наведеної ФЧХ фільтра впливає, що різниця фаз для тієї ж самої частоти  $f = 3,496$  kHz приблизно становить  $-94,7^\circ$ , що і видно на осцилографі.

На рис. 4б наведено результати моделювання фільтра на частоті  $f_2 = 10,5$  kHz. З осцилографа видно, що амплітуда сигналу на виході (2, Channel\_B) – приблизно 211,5 mV, тобто сигнал так само, як і в попередньому випадку, суттєво подавляється, але все ж таки більший, ніж на частоті  $f_1$ . На бode-плотері ХВР1 з наведеної АЧХ зрозуміло, що на частоті  $f = 10,479$  kHz (приблизно дорівнює  $f_1 = 10,5$  kHz) коефіцієнт передачі фільтра становить  $-13,741$  dB (0,206 – у лінійному масштабі). Різниця порівняно з рис. 2а дорівнює:  $5,634 - (-13,741) \approx 19,4$  dB, тобто приблизно на 19 dB менше, ніж на резонансній частоті. Це менше майже на 4 dB, ніж для частоти  $f_1$ , що свідчить про те, що швидкість спаду АЧХ зазначеного фільтра більш повільна, ніж швидкість наростання. На бode-плотері ХВР2 з наведеної ФЧХ фільтра впливає, що різниця фаз для тієї ж самої частоти  $f = 10,479$  kHz приблизно становить  $95,3^\circ$ , що і видно на осцилографі (ХСC1).

#### **10. Порівняльний аналіз результатів моделювання**

Здійснюється з метою вибору найкращої схеми та методики розрахунку параметрів компонентів для цієї схеми. У нашому випадку обраний фільтр за конкретною схемою і конкретною методикою розрахунку його параметрів [7], а тому моделювання різних варіантів і порівняльного аналізу відповідно не проводиться.

#### **11. Формування списку з'єднань**

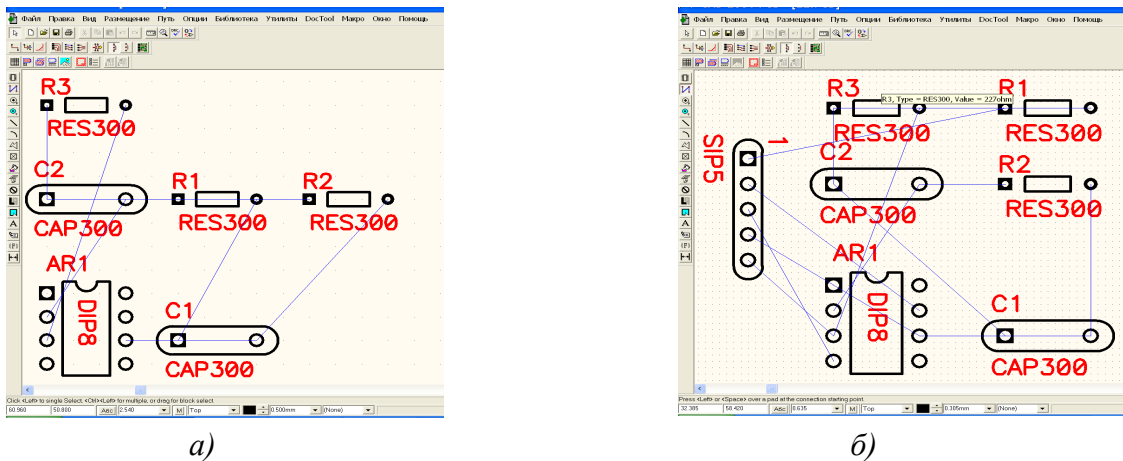
Список з'єднань формується з метою опису досліджуваної схеми в текстовому форматі для того, щоб потім його завантажити в іншу САПР. Головне призначення – забезпечення логічного зв'язку взаємодії різних САПР під час створення проекту на етапі конструкторського проектування. Список формується в системі MULTISIM, щоб потім завантажити в P-CAD. Для зазначених систем обирається формат Tango.net.

#### **12. Створення радіокомпонентів у конструкторських САПР**

Створення компонентів у P-CAD здійснюється тоді, коли необхідно побудувати проект друкованої плати, який складається з вітчизняних компонентів, що відсутні в бібліотеках подібних систем. Якщо ж такого завдання не ставиться, то простіше побудувати проект друкованої плати з компонентів закордонного виробництва, що і зроблено в нашому випадку.

#### **13. Завантаження списку з'єднань у конструкторську САПР**

Завантаження здійснюється в графічному редакторі P-CAD PCB. Результатом успішного завантаження є розташування шаблонів (корпусів) компонентів у графічному редакторі й відображення електричних зв'язків між выводами зазначених компонентів. Зв'язки позначаються синім кольором відповідно до принципової електричної схеми пристрою, проект друкованої плати якого створюється (рис. 5а).



а)

б)

Рис. 5. Упакування схеми:

а) автоматичне розміщення; б) остаточне (оптимальне) розміщення

#### 14. Оптимальне розміщення компонентів

Здійснюється в просторі майбутнього проекту друкованої плати з урахуванням вирішення завдання мікромініатюризації відповідно до критерію мінімуму сумарної довжини з'єднань. Але все це проводять з дотриманням різних факторів обмеження (мінімальна відстань між компонентами та трасами, ширина траси, кількість шарів і т. ін.).

Оптимальне розміщення здійснюється шляхом виконання окремих команд редагування (пересування, повертання, обернення і т. ін.) початкового варіанта (рис. 5а). Крім того, можна додавати різні компоненти та електричні зв'язки між ними, якщо це потребує логіка проекту. Наприклад, у нашому випадку фільтр буде використовуватися як окремий радіоелектронний функціональний вузол (РФВ), а тому необхідно передбачити його зв'язок з іншими РФВ. Потрібно розмістити роз'єм SIP5. Остаточний варіант розміщення компонентів наведено на рис. 5б. Роз'єм має п'ять виводів: 1 – сигнальний вхід; 2 – живлення ОП (+15 V); 3 – живлення ОП (–15 V); 4 – сигнальний вихід; 5 – Земля.

#### 15. Трасування друкованої плати

Трасування друкованої плати в системі P-CAD може здійснюватися в різних режимах: ручному, інтерактивному, автоматичному. Методика трасування, як правило, передбачає спочатку проведення автоматичного трасування, а потім, якщо потрібно, остаточного редагування в ручному режимі. Skorиставшись цією методикою, отримано один з варіантів автоматичного трасування проекту двохшарової друкованої плати (рис. 6). Подібних варіантів можна отримати безліч. Користувач потім сам обирає той, який він вважає за потрібний, і його остаточно редагує.

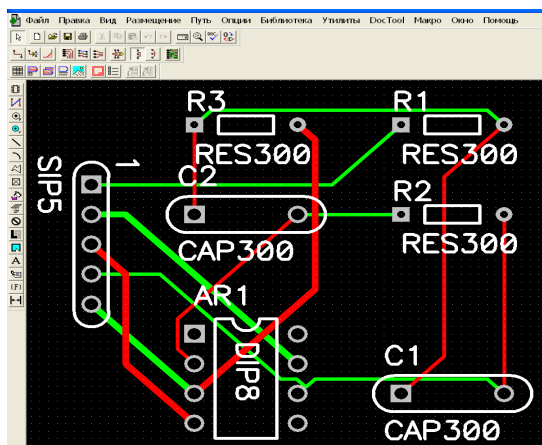


Рис. 6. Проект друкованої плати смугового фільтра

**Висновки.** Підбиваючи підсумки, слід зазначити, що запропонована методика є результатом удосконалення різноманітних методик проектування РЕА окремими САПР. Досвід застосування цієї методики дає можливість сформулювати такі основні висновки:

проектування РЕА стає більш зрозумілим, наочним, зручним і таким, що суттєво зменшує зусилля інженера під час пошуку оптимальних рішень серед безлічі існуючих варіантів (схем, методик, питань дослідження і т. ін.);

запропонована методика дозволяє послідовно охопити початкові етапи проектування в тісному взаємозв'язку між собою, що зменшує обсяг необхідних операцій порівняно з проектуванням, яке здійснюється без спільного використання різноманітних САПР;

уможливорює суттєве зменшення матеріальних і фізичних затрат на проектування, оскільки не буде потребувати виготовлення безлічі макетів, тому що пошук оптимальних рішень здійснюється саме на етапі моделювання;

засвідчує правильність роботи проєктованих об'єктів та розрахованих параметрів компонентів за обраними схемами і методиками;

суттєво скорочує час на отримання остаточного варіанта проєктованого об'єкта.

Зазначену методику доцільно використовувати для проектування, моделювання та дослідження будь-яких РЕП: як аналогових, так і цифрових. При цьому вона може набувати постійного розвитку та удосконалення, оскільки все залежатиме від складності проєкту, умов його застосування та конкретних (обраних) САПР для реалізації потрібного варіанта. Це означає, що до даної методики можуть додаватися окремі пункти (етапи) або, навпаки, за певних умов вилучатися. Проте основні з них практично будуть залишатися незмінними.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алексеев О. В. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств : учеб. пособ. для вузов / О. В. Алексеев, А. А. Головкин. – М. : Высш. шк., 2000. – 479 с. : ил.
2. Колодницький М. М. Елементи теорії САПР складних систем : навч. посіб. / М. М. Колодницький. – Житомир : ЖІТІ, 1999. – 512 с.
3. Пономарьов Ю. В. Основи автоматизації проектування радіоелектронної апаратури. Система схемотехнічного моделювання Electronics Workbench : навч. посіб. / Ю. В. Пономарьов. – Житомир : ЖВІРЕ, 2006. – 196 с.
4. Обзор программных продуктов электронного САПР [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://pspicelib.narod.ru/01\\_modelirovanie/obzor\\_sapr.htm](http://pspicelib.narod.ru/01_modelirovanie/obzor_sapr.htm).
5. Хернтер Марк Е. Multisim: Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств / Хернтер Марк Е. ; пер. с англ. А. И. Осипова. – М. : Изд. дом ДМК-пресс, 2006. – 488 с. : ил.
6. Разевиг В. Д. Проектирование печатных плат в P-CAD 2001 / В. Д. Разевиг. – М. : Солон-Р, 2001. – 560 с.: ил.
7. Титце У. Полупроводниковая схемотехника : справоч. рук-во / У. Титце, К. Шенк ; пер. с нем. – М. : Мир, 1982. – 512 с. : ил.
8. Мошиц Г. Проектирование активных фильтров / Г. Мошиц, П. Хорн ; пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 320 с. : ил.
9. Водовозов А. М. Проектирование активных фильтров / А. М. Водовозов, А. С. Елюков. – Вологда, ВоГТУ, 2009. – 28 с.

10. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых устройств / Г. И. Волович. – М. : Изд. дом «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.

Подано 10.06.13

**Ю. В. Пономарев, О. Ю. Дячук, И. Г. Грабар**

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ  
РАЗНООБРАЗНЫМИ СИСТЕМАМИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

*Рассматривается методика совместного использования отдельных видов систем автоматизированного проектирования, таких как: система схемотехнического моделирования MULTISIM и система конструкторского проектирования P-CAD во время создания проекта радиоэлектронного устройства (РЭУ) и проекта его печатной платы. В качестве примера РЭУ моделируется схема активного полосового фильтра второго порядка, построенного на базе операционного усилителя.*

**Y. Ponomarev, O. Dyachuk, I. Grabar**

**TECHNIQUE OF DESIGNING ELECTRONIC DEVICES VARIETY OF CAD  
SYSTEMS**

*The technique of compatible usage of the certain types of the automated design systems such as MULTISIM circuit technique simulation system and P-CAD design system while creating the project of radio-electronic device as well as its plated circuit project is examined. As on example the scheme of an active band-pass filter of the second order based on an operational amplifier is computing.*