ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ КОНДУКТИВНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД

PECULIARITIES OF USING ACTIVE FILTERS OF CONDUCTIVE ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE

У статті наведена коротка інформація про особливості активних фільтрів для послаблення рівня електромагнітних кондуктивних завад. Показано, що використання таких фільтрів ефективне в області частот до 200 кГц.

В. Макаренко

Abstract – The article provides brief information on the features of active filters for reducing the level of electromagnetic conductive interference. It is shown that the use of such filters is effective in the range of frequencies up to 200 kHz.

V. Makarenko

Як відмінна альтернатива традиційним громіздким і дорогим пасивним фільтрам кондуктивних електромагнітних завад (ЕМЗ) в [1] пропонується використовувати активні фільтри (AEF – Active Electromagnetic Interference Filters), що дозволяють знизити вартість рішень для зниження рівня завад, створюваних імпульсними джерелами живлення. За інформацією авторів у джерелах [2, 3] наведені дані про приблизне зменшення розміру фільтрів ЕМЗ на 50% у порівнянні з пасивними фільтрами.

Більшість AEF використовують активні схеми на основі операційного підсилювача (ОП) для визначення рівня завад та введення відповідного сигналу компенсації для зменшення електромагнітних завад. Щоб досягти найкращої продуктивності з таким типом AEF, схеми операційних підсилювачів повинні бути стабільними, а операційний підсилювач не повинен насичуватися. В іншому випадку AEF матиме гіршу продуктивність і навіть може ввести додатковий шум у систему [3].

На рис. 1 наведені схеми підключення AEF між джерелом живлення (ZL) та імпульсним перетворювачем (Zs+Vs), що є джерелом завад. На рис. 1 введені наступі позначення:

- C_{in} – вхідний конденсатор імпульсного перетворювача
- C_{par} – паразитна ємність між проводом живлення та загальним (землею)
- C_{sen} – конденсатор через який завади попадають на вхід ОП
- C_{inj} – конденсатор через який вводиться компенсуюча напруга у повід зв'язку з джерелом живлення
- C_{comp} – конденсатор компенсації для усунення нестабільного режиму роботи при зсуві фаз у петлі підсилення близько 180°
- R_{DC_fb} – резистор зворотного зв'язку за постійним струмом
- R_{comp} – резистор кола компенсації зсуву фаз у петлі підсилення близько 180°.

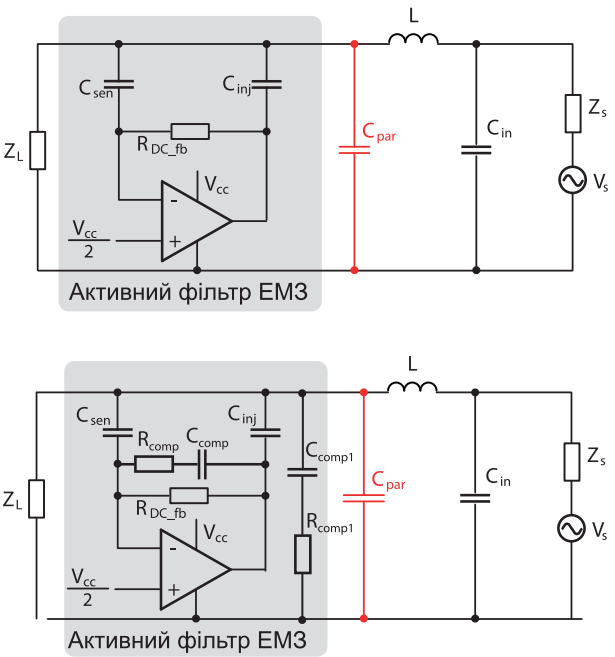


Рис. 1. Основна схема активного фільтра ЕМЗ (а) та з колами компенсації (б)

Принцип дії активного фільтру доволі простий. Напруга завад надходить на інвертуючий вхід ОП через конденсатор C_{sen} і в протифазі через конденсатор C_{inj} подається у лінію зв'язку між джерелом живлення та імпульсним перетворювачем.

Для того, щоб уявити амплітудно-частотну характеристику такого фільтру необхідно провести моделювання його роботи. На рис. 2 наведена модель Ltspice для дослідження активного фільтра без

кіл компенсації зі значеннями параметрів з [1]. До моделі додано коло еквівалента мережі згідно з вимогами стандарту CISPR25.

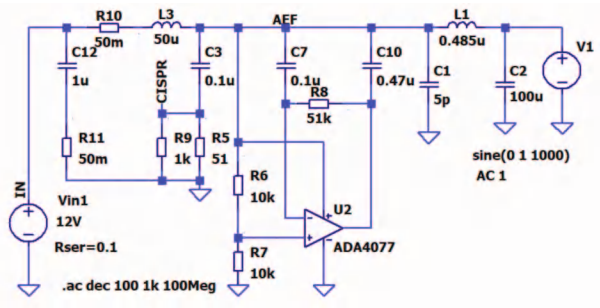


Рис. 2. Модель для дослідження активного фільтра без кіл компенсації

На рис. 3 наведені АЧХ фільтра V(aef) та АЧХ на виході еквівалента мережі V(cispr).

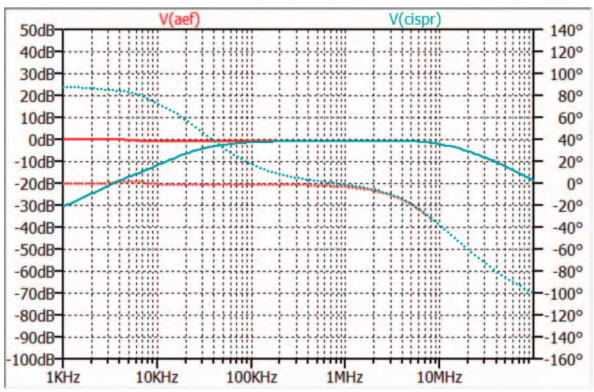


Рис. 3. АЧХ і ФЧХ фільтра V(aef) та АЧХ і ФЧХ на виході еквівалента мережі V(cispr)

Перевіримо ефективність використання стандартного фільтра з понижувальним перетворювачем (рис. 4) при аналізі рівня кондуктивних завад з результатами роботи активного фільтра.

Результат аналізу спектру кондуктивних завад на виході еквівалента мережі наведений на рис. 5.

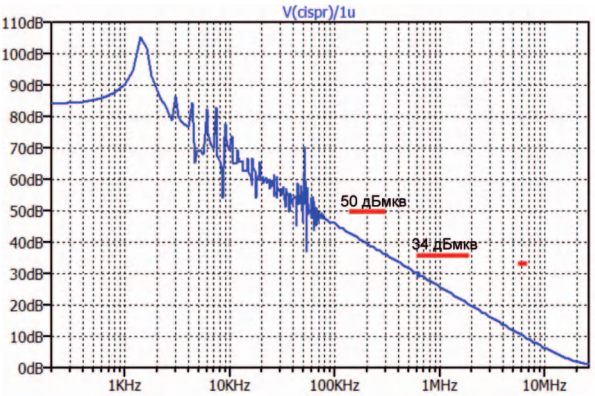


Рис. 5. Спектр кондуктивних завад понижувального перетворювача

На рис. 6 наведено модифікований вузол фільтра, а на рис. 7 – результат аналізу при використанні замість рекомендованого активного фільтра ЕМЗ, наведеного на рис. 6.

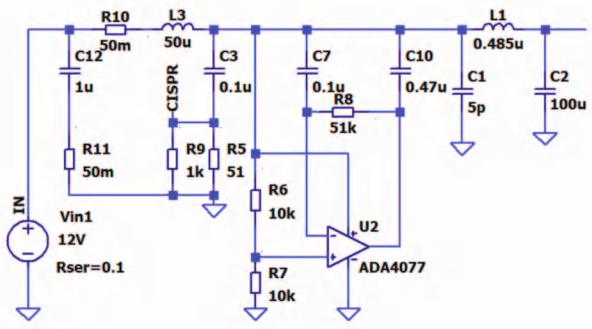


Рис. 6. Модифікація вузла фільтра моделі наведеної на рис. 4

Порівнюючи спектри на рис. 5 та 7 можна зробити висновок про те, що рівень завад в низькочастот-

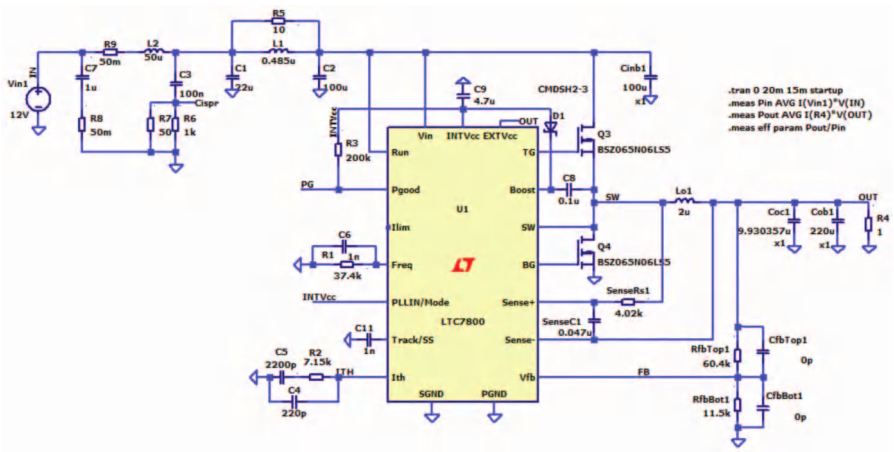


Рис. 4. Понижувальний перетворювач 12/5 В з рекомендованим виробником фільтром

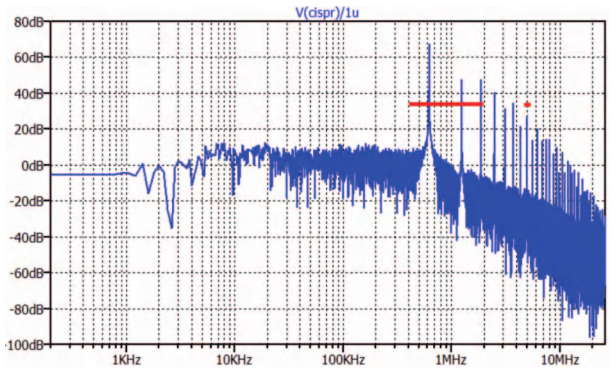


Рис. 7. Спектр кондуктивних завад при використанні активного фільтра на рис. 6

ній частині спектру знизився майже на 100 дБмкв. Викид у спектрі на частоті 1,5 кГц (рис. 5) зумовлений резонансом контуру, утвореного елементами L1, C1.

На рис. 5 та 7 червоними лініями позначені припустимі рівні кондуктивних завад у відповідності зі стандартом CISPR25 [4]. З рис. 5 випливає що фільтр, рекомендований виробником, повністю забезпечує відповідність стандарту. При використанні активного фільтру відбувається значне зниження рівня завад в області частот до 200-300 Гц, а на частотах вище 300 кГц складові спектру не тільки не послаблюються, а навіть збільшується їх рівень. Це пояснюється тим, що на частотах вище 300 кГц фазовий зсув фільтра починає зростати. В результаті на частотах вище 300 кГц послаблення складових кондуктивної завади зменшується при зростанні частоти.

Якщо замість конденсатора паразитної ємності C1 встановити конденсатор 22 мкФ, то спектр завади приймає вигляд наведений на рис. 8.

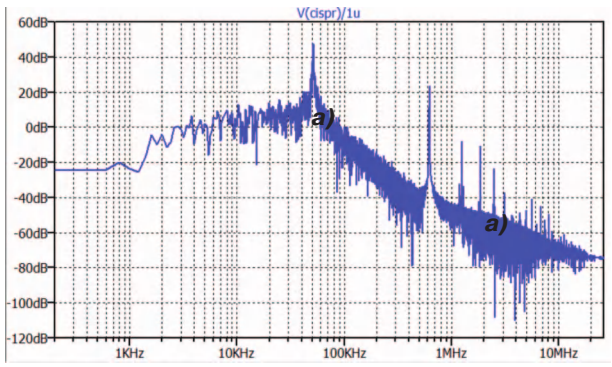


Рис. 8. Спектр завади при використанні активного фільтру і конденсатора C1 ємністю 22 мкФ

Як випливає з рис. 8 рівень складових, зумовлених частотою комутації ключів, знизився на 50 дБмкв. Але з'явився викид у спектрі на частоті приблизно 50 кГц. Частота резонансу розрахована за формулою:

$$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{(L_1C_1)}) = 1/2\pi\sqrt{(0.485\cdot10^{-6}\cdot22\cdot10^{-6}} = 48{,}7 \text{ кГц}$$

співпадає з виміряним значенням.

На рис. 9 наведені моделі та відповідні їм АЧХ фільтрів з різними значеннями ємності C1.

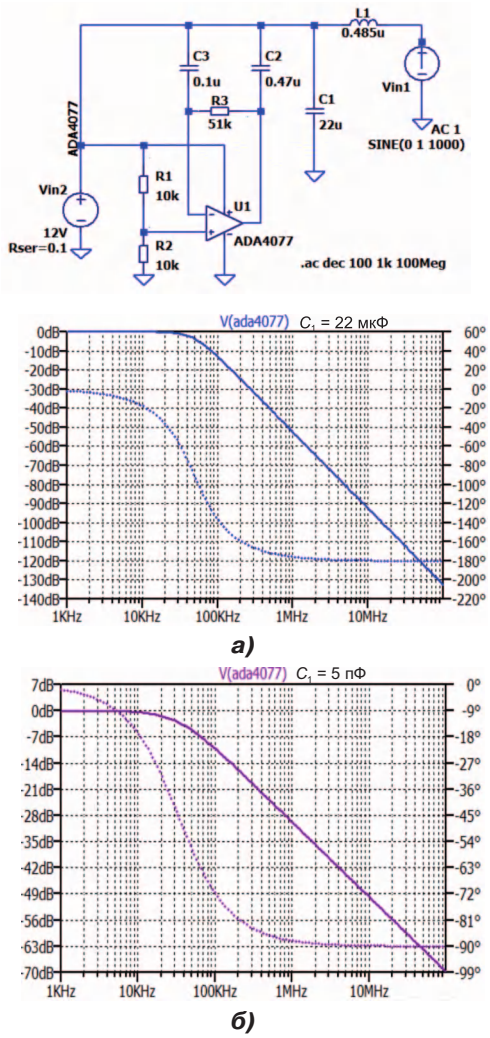


Рис. 9. Модель фільтра та його АЧХ при значенні C1, рівним 22 мкФ (а) та 5 пФ (б)

Порівнюючи АЧХ при значення ємності C1 22 мкФ та 5 пФ, можна зробити висновок про те, що швидкість спаду АЧХ при C_1=22 мкФ в 2 рази більша ніж при ємності 5 пФ, що і призводить до послаблення високочастотних складових спектру. Аналогічні результат отримаємо при використання високочастотного ОП.

Отже, для того, щоб послабити складові з частотою комутації ключів, треба додавати конденсатор,

підключений між котушкою індуктивності та активним фільтром. Котушка та конденсатор утворюють фільтр нижніх частот. Але на частоті резонансу буде спостерігатись викид АЧХ, величина якого залежить від добротності котушки. Тому виробник рекомендував шунтувати котушку резистором (рис. 4), що призводить до зменшення викиду АЧХ.

При зменшенні індуктивності L1 до 0.1 мкГн отримаємо спектр, наведений на рис. 10. Зменшення індуктивності котушки фільтра призводить до зменшення часу перехідного процесу при включенні джерела живлення. Але завада з частотою комутації ключів не зменшується, оскільки частота зрізу ФНЧ, утвореного елементами L1, C1 підвищилась і загасання на частоті 600 кГц (частоті комутації ключів перетворювача) зменшилось.

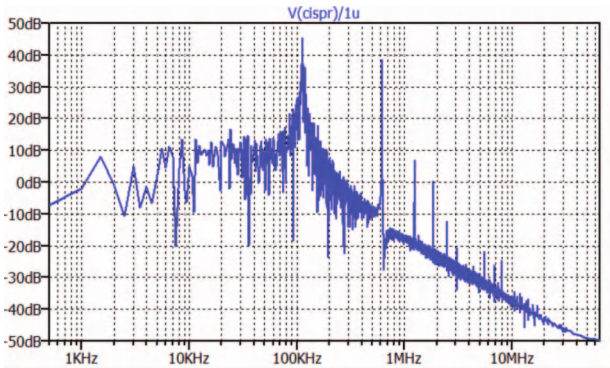


Рис. 10. Спектр кондуктивних завад при використанні активного фільтру і L_1 = 0.1 мкГн

Щоб послабити ВЧ складові, треба розрахувати частоту зрізу (частоту резонансу) фільтру L1C1 так, щоб на частоті завади було потрібне загасання. При збільшенні індуктивності чи ємності у 4 рази, частота зрізу знизиться у 2 рази, а загасання ВЧ-складових кондуктивної завади збільшиться на 10-12 дБ. На рис. 11 наведений спектр завади при індуктивності L_1 = 2 мкГн.

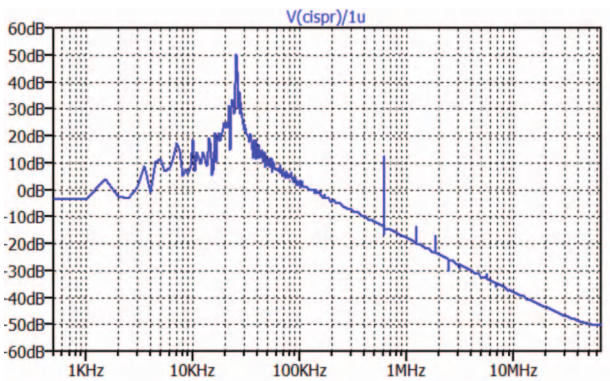


Рис. 11. Спектр кондуктивних завад при використанні активного фільтру і L_1 = 2 мкГн

З рис.11 випливає, що збільшення індуктивності у 4 рази призвело до зменшення рівня завад на 10 дБ, у порівнянні зі спектром на рис. 8 (L_1 = 0.485 мкГн).

Використання високочастотних ОП при частоті комутації ключів до 1 МГц недоцільно, оскільки призводить до утворення великої кількості паразитних складових. На рис. 12 наведено спектр завади при значенні L_1 = 2 мкГн і використанні ОП LT1223 зі смугою одиничного підсилення 100 МГц. Для порівняння смуга одиничного підсилення ADA4077 складає 3.6 МГц.

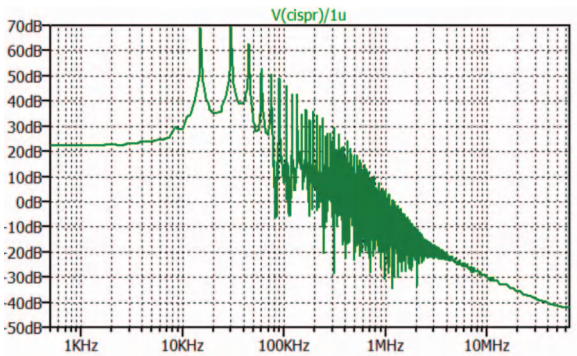


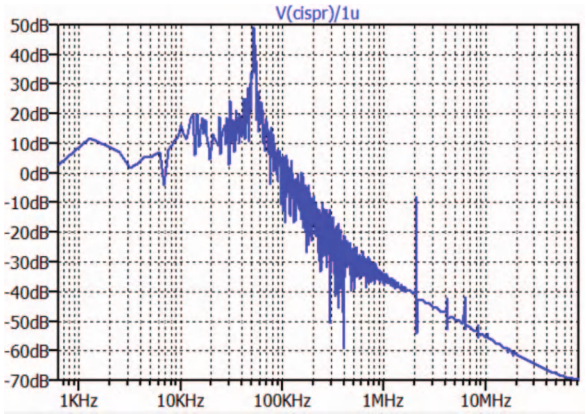
Рис. 12. Спектр кондуктивних завад при використанні активного фільтру і L_1 = 2 мкГн і ОП LT1223

Дещо по іншому поводиться схема з активним фільтром при збільшенні частоти комутації ключів до 2 МГц. Для встановлення частоти комутації 2 МГц необхідно опір резистора R1 у схемі перетворювача (рис. 4) збільшити до 100 кОм. Спектр завади, отриманий при використанні ОП ADA4077 і індуктивності котушки L1 = 0.485 мкГн, наведено на рис. 13.

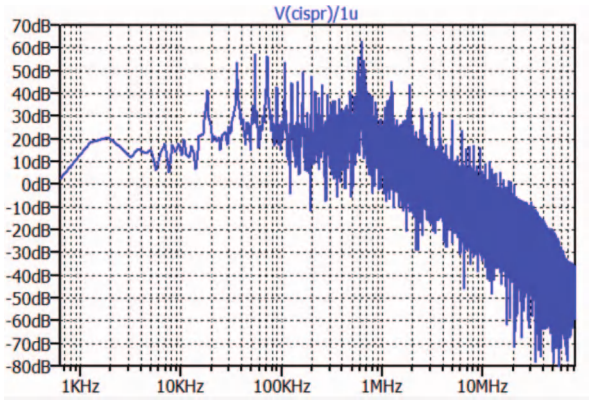
Результат аналізу спектру свідчить про неефективність використання активного фільтру при частоті комутації ключів 2 МГц. Якщо порівняти спектри на рис. 13,а та 13,б,то висновок однозначний – активний фільтр практично не призводить до зменшення рівня завад.

Перевіримо ефективність використання активного фільтру на частотах комутації ключів перетворювача на частоті 200 кГц. На рис. 14 наведено спектр завад при використанні активного фільтру з ОП ADA4077 при значенні ємності C1 рівному 5 пФ (рис. 14,а) та 22 мкФ (рис. 14,б).

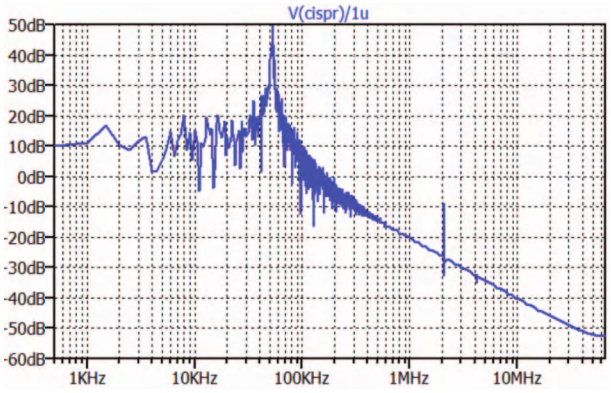
З рис. 14 випливає що активний фільтр послаблює низькочастотні компоненти завади при відсутності великої ємності на його вході. Однак високочастотні складові завади, починаючи з частоти комутації ключів послаблюються тільки при наявності ємності декілька десятків мкФ на його вході.



а)



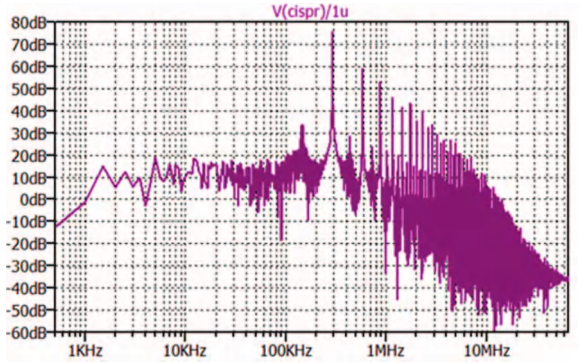
б)



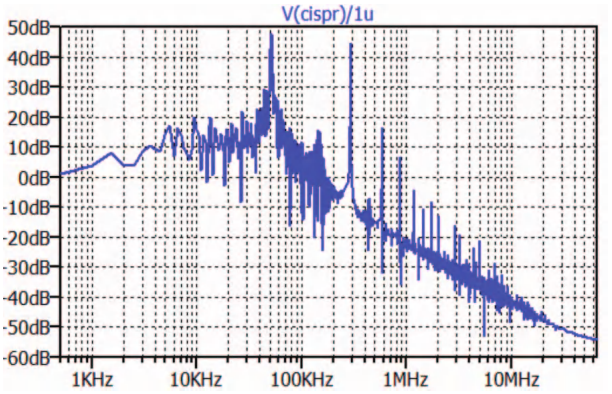
в)

Рис. 13. Спектр кондуктивних завад без активного фільтру (а) та при використанні активного фільтру і L_1 = 0.485 мкГн, ОП ADA4077 при C_1 = 5 пФ (б) та 22 мкФ (в)

З проведених дослідів можна зробити висновок про специфічні особливості активних фільтрів послаблення АМЗ. Такі фільтри доцільно використовувати при необхідності послаблення завад в діапазоні від 1 до 200 кГц. На більш високих частотах ефективність використання таких фільтрів практично відсутня.



а)



б)

Рис. 14. Спектр кондуктивних завад з активним фільтром при ємності C_1 = 5пФ (а) та C_1 = 22 мкФ (б)

ЛІТЕРАТУРА

1. Yongbin Chu, Yogesh Ramadass How to ensure the stability and performance of an active EMI filter. / Analog Design Journal, 1Q, 2022. p. 1-4. / https://www.ti.com/lit/an/slyt823/slyt823.pdf?ts=1717994093680

2. Murray, Orlando. How to reduce EMI and shrink power-supply size with an integrated active EMI filter. TI E2E™ design support forums technical article, April 5, 2021.

3. Texas Instruments: Active EMI filters to reduce size and cost of EMI filters in automotive systems.

4. Timothy Hegarty. The engineer's guide to EMI in DC-DC Converters (Part 1): Standards requirements and measurement techniques. How2Power Today, December 2017. / http://www.how2power.com/pdf_view.php?url=/newsletters/1712/articles/H2PToday1712_design_TexasInstrume nts_Part%201.pdf .