

УДК 621.391.825

В.М. Бакіко, В.Б. Швайченко, канд. техн. наук

## Особенности фильтрации завад в каналах живлення інфо-телекомунікаційних систем

Проведен анализ особенностей характеристик современных помехоподавляющих фильтров, определены источники помех в цепях питания сверх больших интегральных схем. Предложено решение проблемы повышения эффективности фильтров, оценена возможность улучшения помехоустойчивости телекоммуникационных систем и снижения мощности генерируемых помех, их теплового воздействия на элементы аппаратуры.

The analysis of features and characteristics modern radiofrequency interference filters are considered, features of interferences in power supply circuits of the big integrated circuits are determined. The decision of a problem of low efficiency of filters, increase of a noise stability of telecommunication systems and reductions in intensity of generated electromagnetic interferences, their thermal influence on elements of the equipment is offered.

### Вступ

Розвиток інфо-телекомунікаційної техніки безпосередньо пов'язаний з електроживленням її вузлів. Завадостійкі фільтри у цифровій техніці вирішують не тільки завдання забезпечення живленням вузлів електронних блоків, але й захист кіл живлення від завад, що поширюються по них і по паразитних каналах зв'язку (кондуктивні завади).

Про необхідність боротьби з завадами в колах живлення мікросхем відомо давно [1], це явище завжди розглядалось з погляду завадостійкості вузлів, виконаних на швидкодіючих інтегральних мікросхемах. У зв'язку з розвитком мікропроцесорної техніки змінився рівень завад, збільшилась енергетична складова, розширився їх спектральний діапазон. Старими методами проблему розв'язати стало неможливо.

Загальна проблема забезпечення електромагнітної сумісності загострюється як внаслідок погіршення електромагнітного оточення, що зумовлено насиченням сучасним інфо-комунікаційним обладнанням обмеженого офісного простору, так і збільшенням потужності завад в гігерцовому діапазоні. Тому задача забезпечення ефективного притлумлення завад на часі є актуальною. Для вирішення цієї задачі необхідно, по-перше, визначити особливості генератора

завад, якими є сучасні надшвидкісні процесори, по-друге, шляхів поширення до телекомунікаційних ліній, і, по-третє, проведення аналізу фільтрів та визначення впливу паразитних параметрів на їх ефективність.

### 1. Необхідність застосування фільтрів в колах живлення надвеликих інтегральних схем

Цифрові дискретні пристрої потрібно не лише забезпечити якісним живленням, але й, оскільки вони самі генерують широкопasmову заваду, захистити їх від взаємного проникнення цієї завади у кола живлення. Смугу частот завади визначає в першу чергу тривалість її фронту. Оскільки  $U = L di/dt$ , то напруга, яку генерує завада на одному вентилі логічної мікросхеми TTL, де струм перемикання становить 4 мА (час перемикання 10нс), а індуктивність провідників зведена до величини  $0.5 \cdot 10^{-6}$  Гн, становить 0.2 В при її високочастотній границі близько 100 МГц. Ця завада від декількох корпусів призводить до нестійкої роботи всього вузла. Тому на кожній платі цифрового пристрою ставлять один оксидний конденсатор і на 1-5 корпусів мікросхем один керамічний конденсатор додатково до фільтру Г-типу [2].

Завади, що генерує процесор, на відміну від простої дискретної логіки, мають більшу потужність, у несприятливих випадках вона може досягати половини потужності, що споживає процесор. Практично зареєстрована потужність становить 0,25Р процесора. Їхній вплив має як теплову складову (на елементи процесора, системної плати), так і електромагнітну. Остання у вигляді завади поширюється лініями електроживлення процесора й системної плати. Потужність і максимальна частота завади зростають, перше обумовлено ростом кількості транзисторів, завади яких підсумовуються, друге їхньою швидкодією, все разом – синхронним режимом роботи процесора.

Враховуючи специфіку завади ( $f_{\text{max. завад.}} = t_{\text{фр}}^{-1}$ ), можна стверджувати, що максимальна частота завад суттєво вище тактової частоти процесора. Тому вирішити проблему ЕМС фільтрами, наявними в колі живлення, не можливо, адже ці фільтри мають інше призначення. У зв'язку із цим виробники нарощують

додаткові конденсатори на тримачі процесора й під ним, навіть якщо просто збільшують тактову частоту процесора. Але це рішення не забезпечує стабільність роботи комп'ютера. Ознаками цього є погана «розганяємість» процесора й нагрівання оксидних конденсаторів фільтра.

## 2. Особливості ліній зв'язку

Робота будь-якого електронного пристрою базується на отриманні, обробці й передачі інформації, представлена у вигляді електричних сигналів. У передачі електричного сигналу беруть участь джерело, засоби передачі й приймач сигналу. Пристрої передачі електричних сигналів від джерела до приймача називають електромагнітними лініями зв'язку або коротко – лініями зв'язку (ЛЗ) [3].

У каналі зв'язку при ємнісному паразитному зв'язку (рис. 1) для схеми живлення без нульового проводу завада буде визначатись як:

$$U_{п.п.} = (U_1 C_{п1} - U_2 C_{п2}) R_K \omega_{п} / \sqrt{1 + T_K^2 \omega_{п}^2}, \quad (1)$$

де  $C_{п1}$ ,  $C_{п2}$  – паразитні ємності каналу зв'язку з фазними проводами, у загальному випадку  $C_{п1} \neq C_{п2}$ ;  $\omega_{п}$  – частота мережі живлення;  $R_K$ ,  $T_K$  – внутрішній опір і стала часу каналу зв'язку [3].

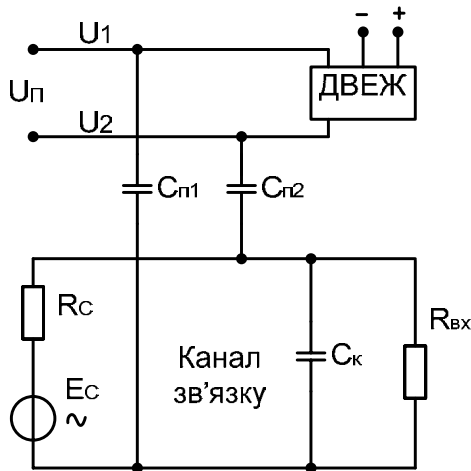


Рис. 1. Схема ємнісного зовнішнього паразитного зв'язку з первинним колом ДВЕЖ

Лінії зв'язку на друкованій платі є несиметричними однопровідними лініями, якими проходить сигнал. Як зворотну лінію можуть використовувати корпус блоку, шину уземлення, шину живлення або провід, що загальний для декількох ЛЗ. Це створює додаткову проблему в боротьбі з завадою.

Окрім того, взаємна індуктивність двох електромонтажних ЛЗ залежить від взаємного положення і відстані між ними. Для двох ліній, що лежать у паралельних площинах (рис. 2, а), взаємна індуктивність :

$$M = (\mu \mu_0 / b_1 b_2 \cos 2\alpha) / (\pi A^2),$$

а для ліній, що лежать у взаємно перпендикулярних площинах (рис. 2, б):

$$M = (\mu \mu_0 / b_1 b_2 \sin 2\alpha) / (\pi A^2), \quad (2)$$

де  $\mu_0$  – магнітна проникність вільного простору,  $\mu$  – магнітна проникність середовища навколо провідників,  $l$  – довжина ліній зв'язку на ділянці, де вони лежать у взаємно паралельних, чи взаємно перпендикулярних площинах.

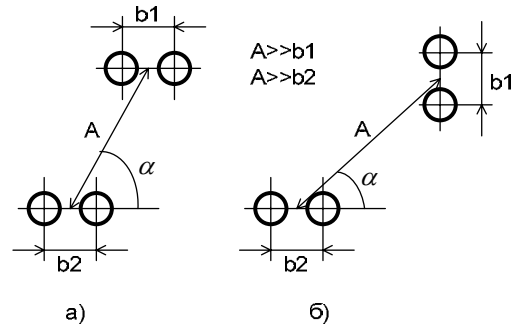


Рис. 2. Лінії зв'язку, що лежать в паралельних (а) і взаємно перпендикулярних площинах (б)

В цифровій техніці важливо враховувати взаємну індуктивність двох одиночних проводів (доріжок на друкованій платі), яка визначається виразом:

$$M = \left( \frac{\mu \mu_0}{2\pi} \right) / \ln \left( \frac{2l}{A} - 1 \right).$$

## 3. Вибір типу фільтра

Вибір необхідного типу фільтра залежить від електричної характеристики системи, де його буде встановлено, вимог щодо ефективності притлумлення завад, у тому числі частоти зрізу й верхньої граничної частоти ослаблення, тобто частотних характеристик кола, що фільтрує, а також вимог, визначених умовами експлуатації. Всі ці фактори погоджують з електричними характеристиками фільтра [4].

Фільтр С-типу являє собою фільтр із малою індуктивністю, який працює як прохідний конденсатор, що шунтує заваду на загальний провідник. Його застосовують за високих імпедансів джерела й навантаження.

Фільтр П-типу має два прохідних конденсатори, що шунтують заваду на загальний провідник, і індуктивність між ними. Такий фільтр являє собою високий опір за змінним струмом як для джерела, так і для навантаження. Найбільше підходить для застосування в колах з високими, відносно рівними за величиною імпедансами джерела й навантаження.

Фільтр Г-типу варто застосовувати там, де імпеданси джерела й навантаження істотно різні.

Індуктивність повинна бути звернена до низькоомного кола. Саме такі фільтри доцільно застосовувати в колах живлення інтегральних схем.

Як приклад, на рис. 3 показана схема такого фільтру, що застосовують в телекомунікаційних пристроях. Тут резистори R1, R2, R3 Г-подібного фільтру вибирають не тільки виходячи з ефективності притлумлення завад, але й з умови подачі на вузли 1 – 3 необхідної напруги живлення.

Застосування цих фільтрів істотно поліпшує характеристики тракту та дозволяє істотно подовжити термін служби елементів живлення портативних пристроїв, у яких, за обмеження ресурсу, починає збільшуватися внутрішній опір, що призводить до сильної залежності напруги живлення пристрою E від споживаного струму (див. рис.3).

У височастотних колах з робочими частотами до 30 МГц, у зв'язку із втратами в резисторах кола RC Г-подібних фільтрів і їхньому низькому опорі (це призводить до погіршення фільтрації), замість резисторів застосовують дроселі. На частотах до 20-30 МГц із феромагнітними осерддями, і без осердь – на більш високих частотах. Дроселі, як і будь-які котушки індуктивності, мають індуктивний зв'язок (взаємоіндукцією) і у випадку їхнього близького розміщення одна за одною, саме за допомогою індуктивного зв'язку, можлива поява каналу поширення завад

з виходу пристрою на його вхід. Для того, щоб такого каналу не виникало, треба розташувати дроселі у взаємно перпендикулярних площинах (рис. 2, б) або екранувати їх [4].

Невдало спроектовані ланки такого фільтру можуть резонувати, часто створюючи ситуацію, коли рівень завади не тільки не знижується, але й підсилюється.

**4. Результати моделювання**

Найефективніший спосіб притлумлення завади, що генерує процесор, – це встановлення додаткових конденсаторів. Більше складні рішення застосували AMD та Intel.

Так AMD використовує поняття “електромагнітної інтерференції на кристалі” [2]. Її вплив долають введенням додаткового мідного шару й додаткових фільтруючих конденсаторів на кристал процесора, що дозволяє збільшити фактичну тактову частоту від 14,4% до 26%, при збільшенні тепловиділення на 7,9% і збільшенні площі кристала на 5%.

Intel на процесорі Хеон застосував схему фільтрації описану в [5]. Визначимо особливості реалізації подібного фільтру, проаналізувавши і врахувавши паразитні параметри (див. рис. 4).

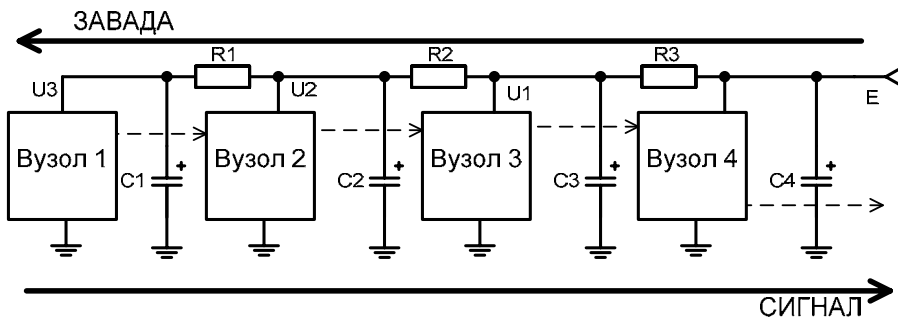


Рис. 3. Г-подібний фільтр

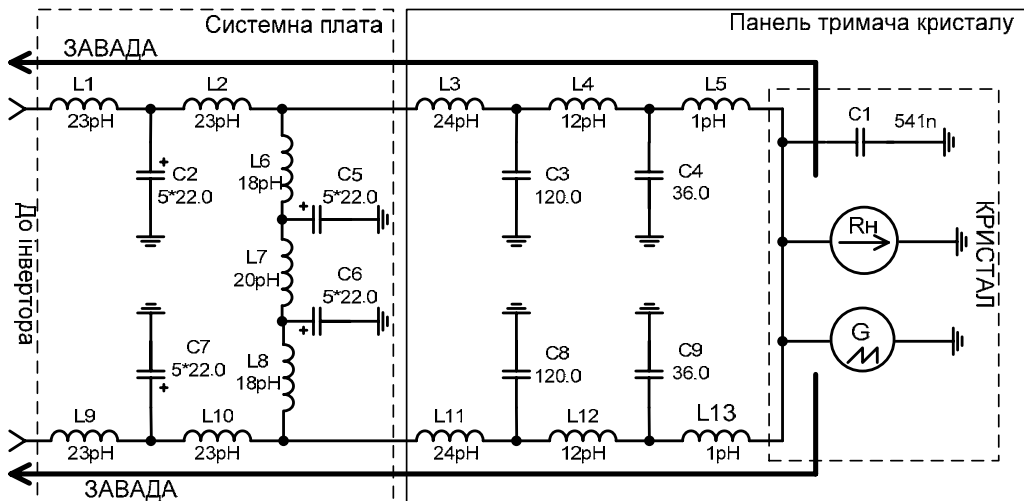


Рис. 4. Схема фільтрації на процесорі Хеон

На рис. 4 дроселі L1,2; L6-8 і L9,10 – це індуктивності доріжок ліній живлення, тому вони мінімальні. L3 і L11 – це індуктивності штирьових з'єднувачів панелі й процесора, всі вони з'єднані паралельно, що дозволяє знизити їх сумарну індуктивність.

Індуктивний опір  $X_L$  L13 для частот завади 13-15 ГГц має незначну величину в порівнянні з еквівалентним послідовним опором (ESR). Очевидно, що резонансна частота ланки L13 – C9 (без урахування еквівалентної послідовної індуктивності (ESL) C9) близько 26 МГц – це означає, що на частотах вище резонансної опір ланки індуктивний. Ця ланка працює ефективно тільки до частоти 24 МГц. З врахуванням ESL ця частота знижується до 7,9 МГц, значно нижче частоти завад, які генерує процесор.

Вибір ємності C1 відбувається за необхідності забезпечення потрібної величини вношеного загасання, що вносить фільтр. Виробни-

ком встановлено, що значення ємності C1 дорівнює 541 нФ. У разі збільшені цієї величини фільтр недостатньо притлумлює завади з частотами близькими до 10 МГц і сам конденсатор матиме більші лінійні розміри. А при менших величинах, загасання фільтру збільшено (рис. 5).

Конденсатор C1, за даними опису [5], повинен розміщуватись на процесорі й мати індуктивність  $L=0$ . Індуктивність плоского конденсатора прямує до нуля, але вона не може бути менше індуктивності обкладинок конденсатора. Важливо, що доріжки розведені від C1 до ядра й інших вузлів процесора мають індуктивність, хоч і менше одного з 150 провідників, включених паралельно й утворюючих L13, але в кожному разі в декілька разів більше її. На рис.6 зображено АЧХ фільтру за умови врахування паразитної індуктивності конденсатора C1 і внутрішньої індуктивності доріжок на кристалі (L1).

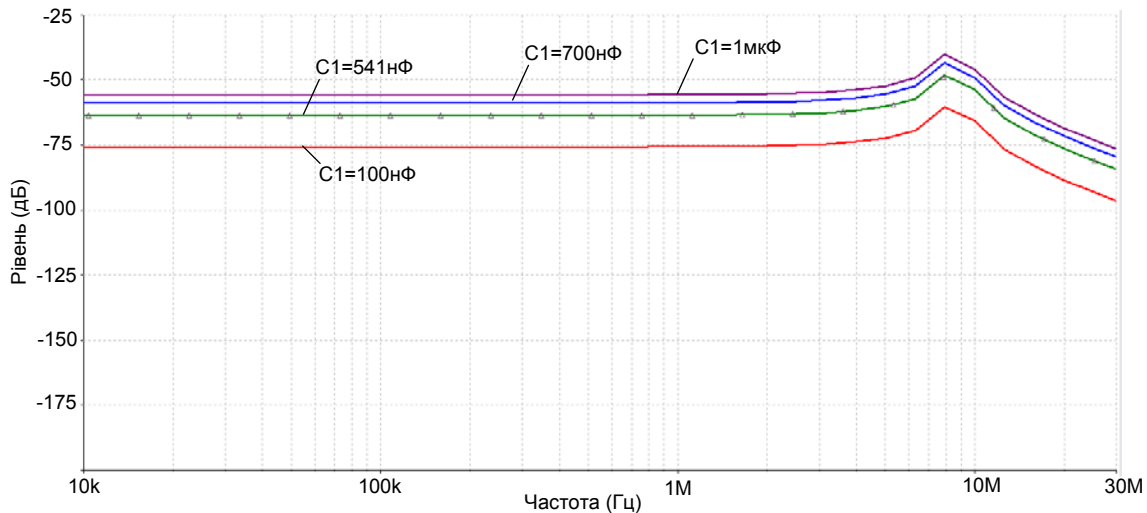


Рис. 5. Вплив ємності C1 на ефективність фільтрації

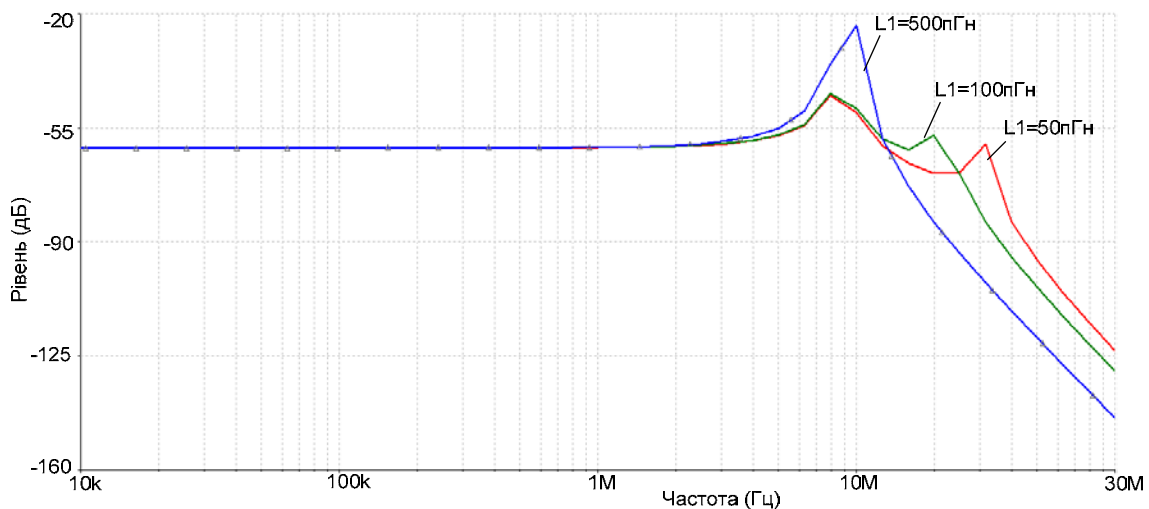


Рис. 6. Вплив паразитної індуктивності конденсатора C1

У такий спосіб резонансна частота  $C1$  із внутрішніми індуктивностями доріжок на кристалі становить від 10 до 25 МГц.

Даний фільтр працює, але в досить обмеженому діапазоні частот.

### 5. Причини низької ефективності фільтрів

Розробники процесорної техніки, не маючи достатніх засобів боротьби із завадами на кристалі (крім розглянутих вище), намагаються вивести всі генеровані процесором завади за межі кристала і панелі, вважаючи, що там з цими завадами здатні впоратись фільтри. Саме для цього знижують індуктивність кіл розподілу живлення на платі і панелі процесора.

На рис.7 показано залежність від частоти реактивного опору  $X_L$  для індуктивності, що має значення 10 нГн. Вже на частоті вище 5 ГГц  $X_L > 0.5 \text{ Ом}$ . Реальні ж значення індуктивності мають більші значення (наприклад, шина живлення 2нГн, контакт панелі 3.9нГн) [2].

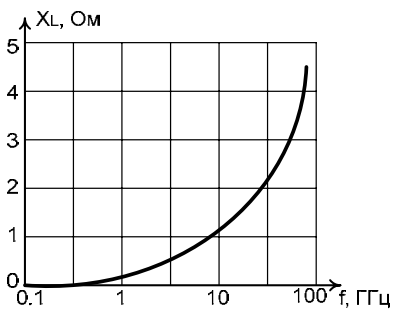


Рис. 7. Залежність  $X_L(f)$  при  $L = 10 \text{ нГн}$

В результаті відсутнє ефективне забезпечення притлумлення завад, які генерує процесор. Вузли, що вносять найбільший внесок у генерацію завад, ніби відсічені від фільтрів індуктивностями ліній з'єднання. Конденсатори, що застосовують у фільтрах, навіть при малих власних індуктивностях не можуть забезпечити фільтрацію внаслідок явища резонансу кола на низьких частотах.

Необхідне застосування багатоланкових ширококутових фільтрів з оптимізованими параметрами відносно характеристик генератора завад. При цьому конденсатор високочастотної ланки ширококутового фільтра повинен мати меншу ємність, і підключатися до джерела завад через мінімальну індуктивність (бути як найближче до джерела завад), забезпечуючи збільшення високочастотної межі роботи фільтра (20-50 ГГц). Усі ланки ширококутового фільтра повинні рівномірно перекривати частотний діапазон завади.

### Висновки

Процесор є потужним генератором завад, верхня межа яких визначається швидкодією елементарного транзистора (його розміри визначені технологією виробництва), що утворює його структуру. Максимальна тактова частота процесора обмежена максимальною частотою й потужністю створених ним завад, як за вимогами завадостійкості, так і тепловиділення.

Проведений аналіз особливостей будови протизавадних фільтрів, вказує на необхідність врахування впливу паразитних параметрів при розробці систем живлення інфо-телекомунікаційних систем.

Отже, для боротьби із завадами потрібно застосовувати конструктивні методи (екранування вузлів, правильне розташування елементів фільтра), використовувати багатоланкові ширококутові фільтри, враховувати паразитні параметри, а також використовувати нові підходи до фільтрації завад [6]. За цих умов стане можливим створення процесорів за 35 нм техпроцесом, що значно розширить можливості інфо-телекомунікаційних систем в цілому.

### Література

1. *Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания* / Векслер Г.С., В.С. Недочетов, В.В. Пилинский, и др. – К.: Техника, 1990. – 167 с.
2. <http://www.electrosad.ru/indexel.htm> “Эволюция фильтров в цепях питания электронных схем” А.Д. Сорокин, 2008.
3. *Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов*/ Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова.– М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009. – 508 с.
4. *Бландова Е.С.* Помехоподавляющие изделия. Рекомендации по выбору и применению // Специальная техника №2. – 2001. – с. 36 – 40.
5. <http://download.intel.com/support/processors/xeon/sb/25039702.pdf> “Intel® Xeon™ Processor Multi-Processor Platform Design Guide”, Intel, 2002.
6. *Швайченко В.Б., Бакіко В.М.* Забезпечення електромагнітної сумісності звукотехнічних систем за колами електроживлення // V Міжн. наук.-практ. конф. “Сучасні інформаційно-комунікаційні технології”: Збірник тез. – К.: ДУІКТ, 2009. – с. 67.