

## ВПЛИВ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ВТРАТ РЕАЛЬНОГО КОНДЕНСАТОРА ПРИ ЗАСТОСУВАННІ БЕЗФІЛЬТРОВОГО МЕТОДУ ЗМЕНШЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНИХ КОНДУКТИВНИХ ЗАВАД ВІД ТРАНЗИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІЗ НАКОПИЧУВАЛЬНИМ ДРОСЕЛЕМ

В.К. Гурін\*, В.О. Павловський\*\*, канд.техн.наук, О.М. Юрченко\*\*\*, докт.техн.наук  
 Інститут електродинаміки НАН України,  
 пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: [yuon@ied.org.ua](mailto:yuon@ied.org.ua)

Проведено подальший аналіз методу ефективного зменшення несиметричних кондуктивних завад у регламентованому діапазоні частот (100 кГц...30 МГц) від перетворювача напруги з накопичувальним дроселем без застосування традиційних електромережних протизавадних фільтрів. Одержано значення ємності для реального конденсатора з високочастотними втратами у схемі компенсації з точки зору забезпечення максимально можливого зменшення кондуктивних завад. З використанням програми PSPICE перевірена та підтверджена правильність одержаного виразу для ємності згаданого вище конденсатора, а також отримано результати, які показують залежність ефективного зменшення завад від високочастотних втрат реального конденсатора. Бібл. 3, рис. 3.

**Ключові слова:** перетворювач напруги, накопичувальний дросель, несиметрична радіозавада.

**Вступ.** Сучасні транзисторні перетворювачі напруги є генераторами інтенсивних електромагнітних завад у діапазоні частот від десятків кілогерц до десятків і сотень мегагерц, які діють у мережі електроживлення у вигляді напруги кондуктивних завад. Одним із методів їхнього зменшення є електромережні протизавадні фільтри; вони часто займають до 30 % і більше загального об'єму, маси та вартості перетворювача. Тому для більшості силових транзисторних перетворювачів напруги і особливо для тих, які застосовуються у бортових системах електроживлення, актуально і важливо дослідити такі методи зменшення кондуктивних завад, що дають змогу спростити схему та конструкцію фільтрів або навіть зовсім обійтися без використання згаданих фільтрів.

Такий метод ефективного зменшення напруги несиметричних завад, які генерує перетворювач із накопичувальним дроселем на вході, без використання протизавадного електромережного фільтра запропонований та описаний у роботах [2, 3]. Показано, що для широкого класу перетворювачів напруги основною причиною інтенсивних несиметричних завад є паразитна ємність між силовими колами перетворювача і його корпусом. Також показано, що можна створити такий накопичувальний дросель, який буде генерувати «від'ємну» ємність заданого значення для компенсації згаданої вище паразитної ємності. Це спричинить значне зменшення напруги цієї завади. Для цього накопичувальний дросель перетворювача виконують у вигляді двох послідовно з'єднаних обмоток із неоднаковою кількістю витків; обмотки мають бути охоплені сильним магнітним зв'язком (коефіцієнт магнітного зв'язку  $k_{зв} \rightarrow 1$ ) і увімкнені зустрічно, а між точкою з'єднання обмоток і корпусом перетворювача необхідно увімкнути конденсатор, ємність  $C$  якого жорстко пов'язана з параметрами схеми компенсації та зі значенням паразитної ємності в несиметричному колі перетворювача [2, 3].

Для практичної реалізації згаданого вище методу зменшення несиметричних завад важливо дослідити ефективність роботи схеми компенсації з реальним конденсатором, який має певні високочастотні втрати.

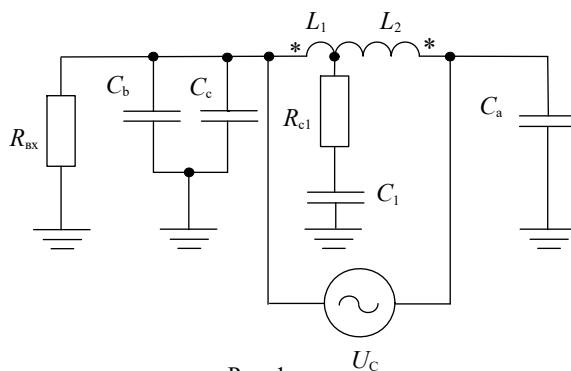


Рис. 1

**Метою роботи** є визначення ємності реального конденсатора з довільними втратами для схеми компенсації паразитної ємності у колі транзисторного перетворювача з накопичувальним дроселем, для забезпечення мінімізації несиметричних завад перетворювача на входних контактах останнього.

Для досягнення цієї мети було проаналізовано еквівалентну схему перетворювача, в яку входить схема компенсації паразитної ємності перетворювача з реальним конденсатором  $C_1$ , що має високочастотні втрати  $R_{c1}$ , як генератора електромагнітних завад (рис. 1). Тут перетворювач напруги показаний як еквівалентний генератор меандра  $U_c$  [3], а традиційний накопичувальний дросель на вході перетворювача виконаний так, як було зазначено вище, і доповнений конденсатором  $C_1$  схеми компенсації паразитної ємності у несиметричному колі перетворювача. На цьому рисунку позначено:  $R_{вх}$  – еквівалентний вхідний опір

© Гурін В.К., Павловський В.О., Юрченко О.М., 2019

ORCID ID: \* <https://orcid.org/0000-0003-2541-216X>; \*\* <https://orcid.org/0000-0001-5768-101X>;

\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-2107-2308>

вимірювача несиметричних завод;  $C_b, C_c$  – паразитні ємності перетворювача;  $L_1, L_2$  – індуктивності обмоток вхідного накопичувального дроселя перетворювача;  $R_{c1}$  – еквівалентний опір високочастотних втрат конденсатора  $C_1$ ;  $C_a$  – паразитна ємність «силової кола перетворювача – корпус».

Для оцінки впливу втрат  $R_{c1}$  конденсатора  $C_1$  у схемі компенсації на зменшення несиметричної завади потрібно визначити напругу завади  $U_x$  від перетворювача на вхідному опорі  $R_{вх}$  вимірювача завод (рис. 1). З цією метою було введено магнітне розв'язування котушок індуктивності  $L_1$  та  $L_2$  і розрахована напруга  $U_x$  за допомогою методу контурних струмів [1]. На рис. 2 показана еквівалентна схема перетворювача зі схемою компенсації паразитної ємності  $C_a$ ; у схему компенсації введено магнітне розв'язування згаданих вище котушок індуктивності.

Для спрощення перетворень коефіцієнт магнітного зв'язку  $k_{зв}$  між двома обмотками перед введенням магнітного розв'язування був прийнятий гранично можливим ( $k_{зв} = 1$ ).

На рис. 2 прийнято позначення:  $z_1$  – еквівалентний комплексний опір, який представляє собою паралельне з'єднання вхідного опору  $R_{вх}$  вимірювача завод і паразитних ємностей  $C_b$  та  $C_c$  (рис. 1);  $L'_1 = -L(n-1)$ ;

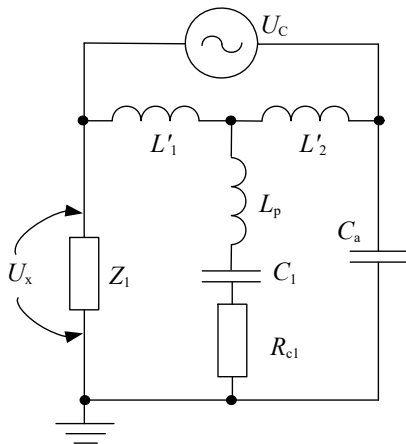


Рис. 2

$L_p = nL$ ;  $L'_2 = nL(n-1)$ ;  $L = L_B / (n-1)^2$ ;  $L_B$  – задана індуктивність вхідного накопичувального дроселя перетворювача, необхідна для нормального функціонування силової частини перетворювача;  $n$  – відношення кількості витків котушки індуктивності  $L_2$  до кількості витків котушки індуктивності  $L_1$  (рис. 1).

Обрахуємо індуктивність  $L_p$  у схемі рис. 2. Підставляючи у вираз для  $L_p$  типові значення  $n = 55$ ,  $L_B = 860$  мкГ [3], одержимо, що  $L_p \approx 16$  мкГ. Із рис. 2 видно, що котушка індуктивності  $L_p$  увімкнена послідовно з резистором  $R_{c1}$  високочастотних втрат конденсатора  $C_1$ . Індуктивності виводів конденсатора  $C_1$  (на рисунку не показані) увімкнені послідовно з індуктивністю  $L_p$ , але оскільки індуктивності виводів значно менші за індуктивність  $L_p$  (зазвичай вони складають 10...20 нГ, з розрахунку близько 1 нГ на 1 мм довжини виводу), то у схемі рис. 2 ними можна знехтувати. Це означає, що ефективність компенсації несиметричної завади навіть на високих частотах, які сягають десятків мегагерц, не залежить від довжини виводів конденсатора  $C_1$ .

Після розрахунку напруг і струмів у схемі на рис. 2 модуль напруги завади  $U_x$  дорівнює

$$U_x = U_c R_{ex} \sqrt{\frac{B_{1r}^2 + B_{1i}^2}{C_r^2 + C_i^2}}, \quad (1)$$

де

$$B_{1r} = R_{c1} + \frac{n}{\omega C_1} - n^2 \omega L, \quad (2)$$

$$B_{1i} = n R_{c1} + n^2 \omega L - \frac{C_1 + C_a}{\omega C_1 C_a}. \quad (3)$$

Тут  $\omega = 2\pi f$  – кругова частота.

У свою чергу

$$C_r = (n-1) \left[ n(n-1) \frac{L}{C_1} + R_{ex} \left( n^2 \omega L - \frac{C_1 + C_a}{\omega C_1 C_a} \right) - R_{c1} \left( n \omega L - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right]; \quad (4)$$

$$C_i = (n-1) \left[ R_{c1} (R_{c1} - n \omega L) - n^2 \frac{L}{C_1} + \frac{C_1 + C_a}{(\omega C_1)^2 C_a} + R_{ex} (n^2 \omega L - R_{c1}) \right]. \quad (5)$$

З виразу (1) видно, що для того, щоб  $U_x \rightarrow 0$ , потрібно,

$$B_{1r}^2 + B_{1i}^2 = 0. \quad (6)$$

Враховуючи вирази (2) і (3), можемо записати, що

$$\left( R_{c1} + \frac{n}{\omega C_1} - n^2 \omega L \right)^2 = 0, \quad \left( n R_{c1} + n^2 \omega L - \frac{C_1 + C_a}{\omega C_1 C_a} \right)^2 = 0.$$

З цієї системи рівнянь нескладно знайти вираз для ємності конденсатора  $C_1$  схеми компенсації, яка буде забезпечувати виконання умови (6), тобто мінімізувати напругу несиметричної завади перетворювача на його вхідних контактах

$$C_1 = \frac{C_a(n-1)}{1 - C_a(n-1)R_{c1}\omega}. \quad (7)$$

Проаналізуємо вираз (7).

Діапазон частот, де відбувається ефективна компенсація паразитної ємності  $C_a$ , складає 0,1...1 МГц, типові значення  $C_a = 20...50$  пФ, типові значення  $n$  знаходяться у межах 25...50 [3]. Щодо значення опору високочастотних втрат  $R_{c1}$ , то цей специфічний параметр, як правило, відсутній у каталогах з основними даними конденсаторів. Його можна визначити з частотної характеристики повного опору конденсатора, яку представляють практично для всіх типів конденсаторів із плівковим діелектриком та керамічних безвыводних конденсаторів у згаданих вище каталогах. Для конденсаторів ємністю 1...2 нФ (типове значення ємності конденсатора  $C_1$  у схемі компенсації на рис. 1) опір втрат  $R_{c1}$  складає від 0,1 до 10 Ом у залежності від типу діелектрика. Підставляючи всі ці значення у від'ємник знаменника виразу (7), неважко переконатися, що згаданий від'ємник менше одиниці. Це дає підставу вважати, що

$$C_1 \approx C_a(n-1). \quad (8)$$

Із виразу (8) випливає, що незалежно від високочастотних втрат  $R_{c1}$  реального конденсатора  $C_1$  (рис. 1) ємність цього конденсатора, обрахована згідно зі згаданим вище виразом, повинна забезпечувати мінімально можливу напругу  $U_x$  несиметричної завади, генерованої перетворювачем.

Для перевірки правильності такого висновку було змодельовано генерування завад еквівалентною схемою перетворювача, зображеною на рис. 1, за допомогою програми електронного моделювання PSPICE. Моделювання було проведене для таких значень елементів схеми: напруга  $U_c$  – синусоїдальної форми амплітудою 1 В;  $R_{вх} = 25$  Ом;  $C_b = C_c = 25$  пФ;  $C_a = 34,2$  пФ;  $R_{c1} = 0,1$  Ом, 1 Ом, 10 Ом;  $L_1 = 0,3$  мкГ;  $L_2 = 875$  мкГ;  $n = 55$ ;  $C_1 = C_a(n-1) = 1847$  пФ. Частоту  $f$  змінювали від 100 кГц до 30 МГц.

Результати моделювання показано на рис. 3. Суцільною лінією позначена залежність напруги  $U_x$  від частоти для випадку, коли  $C_1 = C_a(n-1)$ , пунктирною – аналогічна залежність, коли ємність конденсатора  $C_1$  має невеликий розкид  $\pm \Delta C_1$  відносно значення, обрахованого згідно з виразом (8). Криві 1 на рис. 3 побудовано для  $R_{c1} = 10$  Ом, криві 2 – для  $R_{c1} = 1$  Ом, криві 3 – для  $R_{c1} = 0,1$  Ом.

З рис. 3 видно, що незалежно від опору високочастотних втрат конденсатора  $C_1$ , його ємність, обрахована згідно з виразом (8), забезпечує мінімально

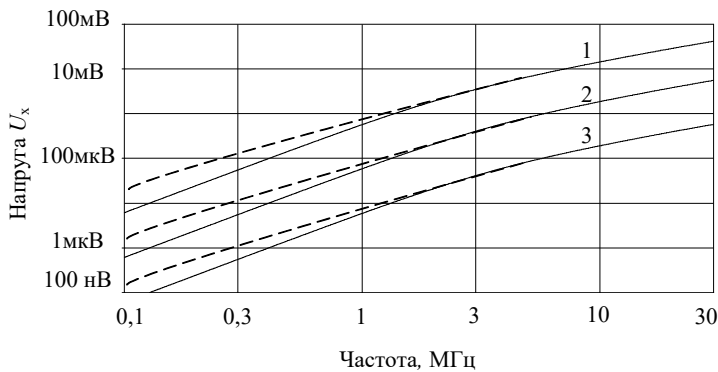


Рис.3

можливу напругу завад  $U_x$  порівняно з будь-яким іншим значенням ємності конденсатора  $C_1$ . З рис. 3 також видно, що напруга завад  $U_x$  прямо пропорційна опору втрат  $R_{c1}$  конденсатора. Це означає, що на відміну від випадків, коли електричний ланцюг представляє собою послідовне з'єднання резистора з порівняно великим опором та конденсатора і високочастотні втрати останнього не відіграють помітної ролі, для розглянутої вище безфільтрової схеми компенсації несиметричних завад високочастотні втрати компенсувального конденсатора безпосередньо визначають напругу несиметричних завад на вхідних контактах перетворювача: чим менші високочастотні втрати має конденсатор  $C_1$  схеми компенсації, тим менша напруга несиметричних завад від перетворювача.

### Висновки.

Одержаний в роботі вираз дає змогу визначити ємність реального конденсатора з високочастотними втратами для схеми компенсації несиметричних завад, яка забезпечує мінімальну напругу завад від перетворювача з вхідним накопичувальним дроселем. Напруга згаданих вище завад прямо пропорційна опору згаданих втрат конденсатора у схемі компенсації. Для максимального зменшення кондуктивних завад потрібно у схемі компенсації застосовувати конденсатор з мінімально можливими втратами, оскільки цей параметр конденсатора є визначальним показником роботи схеми компенсації. Одне з можливих інженерних рішень у цьому напрямку – набирати потрібний номінал ємності конденсатора шляхом паралельного з'єднання декількох конденсаторів меншої ємності.

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. М.: Высш. школа, 1978. 528 с.
2. Gurin V.K., Pavlovskiy V.O., Yurchenko O.M. Зменшення кондуктивних завад на вході транзисторних перетворювачів з накопичувальним дроселем. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 50-52.
3. Shuo Wang, and Fred. C. Lee. Common-Mode Noise Reduction for Power Factor Correction Circuit With Parasitic Capacitance Cancellation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2007. Vol. 49. No 3. Pp. 537-541.

УДК 621.391

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОТЕРЬ РЕАЛЬНОГО КОНДЕНСАТОРА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БЕСФИЛЬТРОВОГО МЕТОДА УМЕНЬШЕНИЯ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ ОТ ТРАНЗИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С НАКОПИТЕЛЬНЫМ ДРОССЕЛЕМ**

**В.К. Гурин, В.А. Павловский, канд.техн.наук, О.Н. Юрченко, докт.техн.наук**  
**Институт электродинамики НАН Украины,**  
**пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.**  
**E-mail: [yuon@ied.org.ua](mailto:yuon@ied.org.ua)**

*Проведен дальнійший аналіз методу ефективного подавлення несимметричних кондуктивних помах в регламентованому діапазоні частот (100 кГц...30 МГц) от преобразователей напряжения с накопительным дроселем без использования традиционных сетевых помехоподавляющих фильтров. Получены значения ёмкости для реального конденсатора с высокочастотными потерями в схеме компенсации с точки зрения обеспечения максимально возможного уменьшения уровня кондуктивных помах. С помощью программы PSPICE проверена и подтверждена правильность полученного выражения для ёмкости, а также показано, что напряжение несимметричной помехи на входных контактах преобразователя прямо пропорционально сопротивлению упомянутых выше потерь конденсатора в схеме компенсации – чем меньше потери конденсатора, тем меньше напряжение помах. Библи. 3, рис. 3.*

**Ключевые слова:** преобразователь напряжения, накопительный дросель, несимметричная радиопомеха.

**EFFECT OF HF LOSSES IN A REAL CAPACITOR ON A COMMON-MODE NOISE DECREASING FOR TRANSISTOR CONVERTERS WITH ACCUMULATING GHOKE**

**V.K. Gurin, V.O. Pavlovskiy, O.M. Yurchenko**  
**Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine,**  
**pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.**  
**E-mail: [yuon@ied.org.ua](mailto:yuon@ied.org.ua)**

*In this paper, a further analysis of a non-traditional method of common-mode (CM) noise decreasing for transistor converters with accumulating choke is described. It is obtained an expression for the capacitance of a real capacitor having high frequency losses in compensating circuit which provides maximal decreasing of CM noise. The correctness of the obtained expression was checked and confirmed with the aid of PSPICE. The dependence of effective CM noise decreasing on mentioned above losses of the real capacitor also was showed in the paper. References 3, figures 3.*

**Key words:** power factor correction converter, common-mode noise.

1. Bessonov L.A. Theoretical Basics of Electrical Engineering: Electric circuits. Moskva: Vysshaya Shkola, 1978. 528 p. (Rus)
2. Gurin V.K., Pavlovskiy V.O., Yurchenko O.M. A Common-Mode Noise Decreasing for Boost Converters With Power Factor Correction Circuits. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 4. Pp. 50-52. (Ukr)
3. Shuo Wang, and Fred. C. Lee. Common-Mode Noise Reduction for Power Factor Correction Circuit With Parasitic Capacitance Cancellation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2007. Vol. 49. No 3. Pp. 537-541.

Надійшла 02.03.2018  
Остаточний варіант 09.07.2018