

## ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ЕФЕКТИВНОГО ПРИТЛУМЛЕННЯ НАПРУГИ КОНДУКТИВНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД ВІД ТРАНЗИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ

**В.К. Гурін\***, канд. техн. наук, **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)

*У роботі розглянуто перетворювачі напруги як генератори неумисних кондуктивних електромагнітних завад (НКЕМЗ). Досліджено особливості стандартної методики вимірів НКЕМЗ від перетворювачів і показано, що вона дає змогу виміряти лише сумарний рівень завади, який може бути одним і тим же за зовсім різних співвідношень між симетричною та несиметричною складовими НКЕМЗ. Це призводить до неефективного використання засобів задля зменшення сумарної завади від перетворювачів до допустимого рівня, тому що різне співвідношення між згаданими вище складовими сумарної завади потребує різних засобів задля зменшення сумарної завади. У роботі запропоновано доповнити стандартну методику вимірів завад від перетворювачів двома додатковими вимірами на частотах, де сумарна завада перевищує допустимий рівень, з використанням під час першого виміру електромережного протизавадного фільтра (ЕПФ), який ефективно притлумлює тільки симетричну заваду, і під час другого виміру – ЕПФ, який ефективно притлумлює тільки несиметричну заваду. Показано, що ці два додаткових виміри дозволяють визначити симетричну та несиметричну складові сумарної завади від перетворювачів. Саме це дає змогу гарантовано зменшити сумарну заваду до допустимого рівня з мінімальними витратами матеріалів і коштів. Бібл. 6.*

**Ключові слова:** кондуктивні завади, еквівалент мережі, протизавадний фільтр.

Як відомо [1, 4], транзисторні перетворювачі напруги є генераторами неумисних кондуктивних електромагнітних завад (НКЕМЗ), які поступають в мережу електроживлення та до споживача, що живиться від перетворювача. Задля перевірки «електромагнітної екологічності» перетворювача необхідно виміряти рівень НКЕМЗ, генерованих перетворювачем, і якщо рівень завад на тих чи інших частотах регламентованого діапазону перевищує «планку» гранично допустимого рівня, вжити необхідних заходів задля зменшення напруги НКЕМЗ.

Методику вимірювання НКЕМЗ та гранично допустимий рівень завад описано в багатьох технічних та нормативних документах, зокрема у Національному стандарті України [2]. Ця методика передбачає використання стандартних еквівалента мережі (ЕМ) та вимірювача завад.

Особливість стандартного ЕМ полягає в тому, що він подає на вхід вимірювача сумарний рівень НКЕМЗ, який складається з арифметичної суми симетричної та несиметричної напруг завади у разі синфазності цих напруг [1], або, у більш загальному випадку, являє собою модуль сумарної напруги  $U_{\text{сум}}^{(2)}$ , якщо згадані напруги є вузькосмуговими, квазігармонічними та незалежними випадковими процесами [5], тобто

$$U_{\text{сум}}^{(2)} = \sqrt{[U_{\text{сум}}^{(\text{сим})}]^2 + [U_{\text{сум}}^{(\text{нес})}]^2}, \quad (1)$$

де  $U_{\text{сум}}^{(2)}$  – середньоквадратичне значення сумарної напруги НКЕМЗ на електромережних контактах перетворювача;  $U_{\text{сум}}^{(\text{сим})}$  та  $U_{\text{сум}}^{(\text{нес})}$  – середньоквадратичні значення напруги, відповідно, симетричної і несиметричної складових НКЕМЗ на тих же контактах.

Якщо вимірне значення  $U_{\text{сум}}^{(2)}$  перевищує згадану вище «планку», то необхідно зменшувати цю напругу. Але проблема полягає в тому, що, як видно з виразу (1), одній і тій же напрузі  $U_{\text{сум}}^{(2)}$  можуть відповідати три зовсім різні співвідношення між  $U_{\text{сум}}^{(\text{сим})}$  та  $U_{\text{сум}}^{(\text{нес})}$ :  $U_{\text{сум}}^{(\text{сим})} \ll U_{\text{сум}}^{(\text{нес})}$ ,  $U_{\text{сум}}^{(\text{сим})} \approx U_{\text{сум}}^{(\text{нес})}$ ,

$U_{\text{ВІК}}^{(\text{СІМ})} \gg U_{\text{ВІК}}^{(\text{НС})}$ . Для кожного з цих співвідношень потрібен спеціалізований засіб зменшення НКЕМЗ. Як правило, в якості такого засобу використовують електромережний протизавадний фільтр (ЕПФ); тоді для першого співвідношення потрібен ЕПФ, який ефективно зменшує напругу несиметричної завади, для другого – ЕПФ, який ефективно зменшує напругу обох її складових, для третього – ЕПФ, який ефективно зменшує напругу симетричної завади. Відомо [1, 6], що ЕПФ для кожного з цих випадків має свою власну структуру, схему ЕЗ і конструкцію. Тому задля гарантованого зменшення сумарної завади від конкретного транзисторного перетворювача до рівня, регламентованого нормативними документами, необхідно, крім сумарної напруги, додатково знати симетричну та несиметричну складові цієї завади, але згадані складові неможливо одержати в результаті вимірів НКЕМЗ по стандартній методиці.

**Мета роботи:** удосконалення стандартної методики вимірів НКЕМЗ від перетворювачів напруги задля забезпечення гарантованого зменшення завад до допустимого рівня з мінімальними витратами матеріалів і коштів.

Для синфазних напруг симетричної та несиметричної завад у роботі [1] запропоновано спосіб їхнього визначення шляхом доповнення стандартного ЕМ резистивною або трансформаторною схемами притлумлення симетричної або несиметричної складових сумарної завади від перетворювача. Проте, якщо обидві складові завади є випадковими процесами з випадковими початковими фазами, то резистивні або трансформаторні схеми притлумлення, які працюють на арифметичному додаванні або відніманні двох гармонічних напруг, можуть різко зменшити притлумлення одної або другої складової сумарної завади, що значно збільшить похибку визначення цих складових. Крім того, доповнення стандартного ЕМ згаданими вище схемами притлумлення перетворює його у нестандартний пристрій і потребує подальшої метрологічної легалізації. Тому, як схему притлумлення симетричної або несиметричної складової доцільно використовувати пристрої, притлумлення яких не залежить від початкових фаз напруг і використання яких не потребує вносити зміни у схему та конструкцію стандартного ЕМ.

Такими пристроями є ЕПФ. Відносно нескладно розробити та виготовити ЕПФ<sub>СІМ</sub> задля притлумлення напруги тільки симетричної завади або ЕПФ<sub>НС</sub> задля притлумлення напруги тільки несиметричної завади. Тоді стандартну методику вимірювання завад від перетворювача доцільно доповнити ще двома вимірами: першим – з ЕПФ<sub>СІМ</sub> між ЕМ та перетворювачем і другим – з ЕПФ<sub>НС</sub> між тими ж пристроями; в результаті одержимо шукані складові  $U_{\text{ВІК}}^{(\text{СІМ})}$  і  $U_{\text{ВІК}}^{(\text{НС})}$  сумарної завади  $U_{\text{ВІК}}^{(\Sigma)}$ . Зрозуміло, що додаткові виміри потрібно проводити тільки на тих частотах, де зафіксовано перевищення сумарної напруги завади над «планкою» гранично допустимого рівня.

Знаючи симетричну та несиметричну складові сумарної завади, можна сформулювати вимоги до загасання, яке ЕПФ повинен вносити у згадані складові напруги завади від перетворювача; така інформація дасть змогу побудувати ЕПФ, який гарантовано зменшить сумарну НКЕМЗ від перетворювача до необхідного рівня.

З цією метою проаналізуємо вираз (1). Якщо у цьому виразі тим чи іншим способом зменшити напругу симетричної завади у  $d_{\text{СІМ}}$  разів, то зменшена напруга цієї завади  $U_{\text{ВІК}}^{(\text{СІМ})} = U_{\text{ВІК}}^{(\text{СІМ})} / d_{\text{СІМ}}$ ; якщо у  $d_{\text{НС}}$  разів зменшити напругу несиметричної завади, то зменшена її напруга  $U_{\text{ВІК}}^{(\text{НС})} = U_{\text{ВІК}}^{(\text{НС})} / d_{\text{НС}}$ .

Поставимо умову, щоб зменшена напруга завад від перетворювача на вході вимірювача не перевищувала допустимий нормативними документами граничний рівень  $U_{\text{ПЛ}}$  сумарної НКЕМЗ від перетворювача. Тоді вираз (1) можна записати у вигляді

$$U_{\text{ПЛ}} \geq \sqrt{\left[ U_{\text{ВІК}}^{(\text{СІМ})} \right]^2 / d_{\text{СІМ}}^2 + \left[ U_{\text{ВІК}}^{(\text{НС})} \right]^2 / d_{\text{НС}}^2} \quad (2)$$

У нерівності (2) є дві невідомі величини –  $d_{\text{СІМ}}$  і  $d_{\text{НС}}$ . Перетворимо цю нерівність у рівняння і поставимо додаткову умову, щоб  $U_{\text{ВІК}}^{(\text{СІМ})} / d_{\text{СІМ}} = U_{\text{ВІК}}^{(\text{НС})} / d_{\text{НС}}$ . Ця умова є логічною, бо вона означає, що більшу напругу завади потрібно притлумлювати більше, і навпаки. В результаті одержимо систему з двох рівнянь з двома невідомими

$$\begin{cases} U_{\text{пл}} = \sqrt{[U_{\text{ВМК}}^{(\text{СМК})}]^2 / d_{\text{СМК}}^2 + [U_{\text{ВМК}}^{(\text{НС})}]^2 / d_{\text{НС}}^2} \\ U_{\text{ВМК}}^{(\text{СМК})} / d_{\text{СМК}} = U_{\text{ВМК}}^{(\text{НС})} / d_{\text{НС}} \end{cases} \quad (3)$$

Вирішивши цю систему рівнянь відносно  $d_{\text{СМК}}$  і  $d_{\text{НС}}$ , одержимо

$$d_{\text{СМК}} = U_{\text{ВМК}}^{(\text{СМК})} \sqrt{2} / U_{\text{пл}} \quad (4)$$

$$d_{\text{НС}} = U_{\text{ВМК}}^{(\text{НС})} \sqrt{2} / U_{\text{пл}} \quad (5)$$

Якщо напруги завод і «планки» виразити у відносних одиницях [дБмкВ], у яких значенню 0 дБ відповідає напруга  $U=1$  мкВ [1], загасання  $d_{\text{СМК}}$  та  $d_{\text{НС}}$  – також у логарифмічних одиницях і врахувати нерівність (2), то вирази (4) і (5) можна записати у вигляді

$$d_{\text{СМК}}[\text{дБ}] \geq U_{\text{ВМК}}^{(\text{СМК})}[\text{дБмкВ}] - U_{\text{пл}}[\text{дБмкВ}] + 3,01; \quad (6)$$

$$d_{\text{НС}}[\text{дБ}] \geq U_{\text{ВМК}}^{(\text{НС})}[\text{дБмкВ}] - U_{\text{пл}}[\text{дБмкВ}] + 3,01. \quad (7)$$

Методика вимірів загасання, внесеного ЕПФ, наведена, зокрема, у Національному стандарті України [3] та роботах [1, 6].

Важливість виразів (6) і (7) в тому, що вони визначають вимоги до мінімального загасання, яке ЕПФ повинен вносити в напруги окремо симетричної та несиметричної складових сумарної завади від конкретного перетворювача задля зменшення згаданої завади до рівня «планки». Тому ЕПФ, побудований з урахуванням вищенаведених вимог до внесеного загасання, не тільки гарантовано зменшує НКЕМЗ до необхідного рівня, але найкращим чином відповідає конкретній структурі завади від конкретного перетворювача, а тому є оптимальним з точки зору мінімізації матеріальних та фінансових затрат, необхідних для виготовлення такого ЕПФ.

Таким чином, запропоноване у роботі удосконалення стандартної методики вимірів НКЕМЗ від перетворювачів дає можливість створювати ЕПФ для ефективного зменшення завод до регламентованого нормативними документами рівня з мінімальними витратами матеріалів і коштів. Це робить такі фільтри економічно ефективними і конкурентними на світовому ринку фільтрів і «електромагнітно екологічних» перетворювачів.

На практиці такий підхід показав економію масогабаритних показників та вартості фільтра на (20..25)% порівняно з типовими ЕПФ на такі самі напругу, силу струму і діапазон робочих частот.

*Роботу виконано за рахунок коштів бюджетної теми «Розвиток теорії високочастотних транзисторних перетворювачів на основі резонансних інверторів для систем електроживлення технологічного обладнання (шифр – “Частота-3”) (КПКВК 6541030).*

1. Henry W. Ott. Electromagnetic Compatibility Engineering. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, 2009. 843 p.
2. ДСТУ EN 55022:2017. Обладнання інформаційних технологій. Характеристики радіозбурень. Норми та методи вимірювання. Київ: ДП «УкрНДЦ», 2017. 67 с.
3. ДСТУ CISPR 17:2007. Фільтри та елементи радіочастотні протизавадні пасивні. Методи вимірювання характеристик загасання. Київ: ДП «УкрНДЦ», 2007. 26 с.
4. Векслер Г.С., Недочетов В.С., Пилинский В.В. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания. К.: Техника, 1990. 167 с.
5. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. Радио, 1969. 752 с.
6. Ozenbaugh R.L. EMI Filter Design. New York, 2001. 272p.

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ И ЭФЕКТИВНОГО ПОДАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ КОНДУКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ ОТ ТРАНЗИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

**В.К. Гурин**, канд. техн. наук, **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)

*В работе рассмотрены преобразователи напряжения как генераторы кондуктивных электромагнитных помех (КЭМП). Рассмотрены особенности стандартной методики измерений КЭМП от преобразователей и показано, что она позволяет измерить только суммарный уровень помехи, который может быть одним и тем же при совершенно разных соотношениях между симметричной и несимметричной составляющими КЭМП. Это приводит к неэффективному использованию средств для уменьшения суммарной помехи от преобразователей до допустимого уровня, потому что разное соотношение между упомянутыми выше составляющими требует различных средств для уменьшения суммарной помехи. В работе предложено дополнить стандартную методику измерений помех от преобразователей двумя дополнительными измерениями на частотах, где суммарная помеха превышает допустимый уровень, с использованием во время первого измерения сетевого помехоподавляющего фильтра (СПФ), который эффективно подавляет только симметричную помеху, и во время второго измерения – СПФ, который эффективно подавляет только несимметричную помеху. Показано, что это позволяет определить симметричную и несимметричную составляющие суммарной помехи от преобразователей и гарантированно уменьшить такую помеху до допустимого уровня с минимальными затратами материалов и средств. Библ. 6.*

**Ключевые слова:** кондуктивные помехи, эквивалент сети, помехоподавляющий фильтр.

## FEATURES OF MEASUREMENT AND EFFECTIVE REDUCING OF CONDUCTIVE NOISE CAUSED BY TRANSISTOR CONVERTERS

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

*The paper considers voltage converters as sources of conductive electromagnetic interference (EMI). Some features of the standard measurement method of converters EMI are considered and it is shown that it measures only the total level of noise, which can be the same at completely different relations between the differential and common components of EMI. This leads to inefficient use of means reducing the total converter noise to the permitted level, because the different ratio between the above components of this noise requires different means to reduce them. The paper proposes to supplement the standard noise measurement method by two additional measurements at frequencies where the total noise exceeds the permitted level, using during the first measurement the additional RFI common mode filter which effectively reduces only the common noise, and the additional RFI differential mode filter which effectively reduces only the differential noise during the second measurement. It is shown that these two additional measurements make it possible to determine the differential and common components of the total noise. This, in turn, makes it possible to reduce the total noise to the permitted level at the minimal cost. References 6.*

**Keywords:** conductive noise, LISN, EMI, RFI filter.

1. Henry W. Ott. Electromagnetic Compatibility Engineering. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, 2009. 843 p.
2. State Standard of Ukraine EN 55022: 2017. Information technology equipment. Characteristics of radio interferences. Norms and measurement methods. Kyiv: DP UkrNDTS, 2017. 68 p. (Ukr)
3. State Standard of Ukraine CISPR 17:2007. Methods of measurement of the suppression characteristics of passive EMC filtering devices. Kyiv: DP UkrNDTS, 2007. 26 p. (Ukr)
4. Veksler G.S., Nechochetov V.S., Pilinskyi V.V. Suppression of electromagnetic interferences in power supply circuits. Kyiv: Technika, 1990. 167 p. (Rus)
5. Levin B.R. Theoretical foundations of statistical radio engineering. Moskva: Sov. Radio, 1969. 752 p. (Rus)
6. Ozenbaugh R.L. EMI Filter Design. New York, 2001. 272 p.

Надійшла 28.02.2020  
Остаточний варіант 23.06.2020