

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ SPREAD SPECTRUM ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ КОНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В. В. Макаренко, В. В. Пилинский

*Национальный технический университет Украины
"Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского"*

Аннотация. В статье приведены результаты исследования эффективности применения технологии расширения спектра (*Spread Spectrum*) на уровень кондуктивных помех, создаваемых при работе DC/DC-преобразователей. Результаты моделирования в среде NI Multisim подтвердили высокую эффективность применения такой технологии. По результатам моделирования сформулированы рекомендации по выбору параметров модулирующего сигнала и параметров частотной модуляции.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, кондуктивная помеха, спектр, *Spread Spectrum*, преобразователь, модуляция, моделирование, *Multisim*.

Введение

В современных условиях интенсивного расширения функциональных возможностей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), сопровождаемых увеличением её чувствительности, свидетельствует о необходимости усиления внимания к вопросам обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭА с другими устройствами и электрической сетью. Как подтверждение последнего можно указать на использование электрических сетей для передачи информации (*Power Line Communication – PLC*) [1].

Для обеспечения электромагнитной совместимости и бесперебойной работы электронных систем приняты международные законодательные акты и стандарты, которые ограничивают уровни эмиссии различных видов электромагнитных помех. Кроме того, принимают специальные меры для обеспечения необходимой устойчивости оборудования к воздействию электромагнитных помех. Допустимые уровни эмитируемых помех регламентируют многие стандарты на международном, региональных, национальных уровнях. Региональные нормативные документы в области электромагнитной совместимости представляет комплект стандартов, предписанный 3-й версией, так называемой ЭМС Директивой Европейского Парламента [2]. Существуют и другие стандарты, например, Федеральной комиссии связи США (*Federal Communications Commission – FCC*), глава 15 и др.

Поскольку любое радиоэлектронное оборудование требует энергообеспечения, то следует учитывать, что источник питания может функ-

ционировать, кроме основной функции, и как генератор – приемник (рецептор) помех.

Воздействие электромагнитных помех может иметь место в кондуктивной среде: в проводах и через паразитные связи, а также посредством индукции (в ближней зоне) и путем излучения (в дальней зоне).

Кондуктивная связь возникает, когда канал между источником помех и приемным устройством сформирован вследствие непосредственного контакта. Прямой контакт может быть реализован через линию передачи, провод, кабель, проводник печатной платы или металлический корпус.

Кондуктивные помехи распространяются как в синфазном (*common mode*), так и в дифференциальном (*differential mode*) режимах в двух проводниках. Кондуктивные электромагнитные помехи рассмотрим в диапазоне частот до 30 МГц. Токи частотой ниже 5 МГц в большинстве случаев можем считать дифференциальными, а выше 5 МГц – синфазными [3].

Для ослабления кондуктивных помех применяют, в основном, сетевые помехоподавляющие фильтры. Однако реализация такого метода уменьшения кондуктивных помех требует применения достаточно сложных фильтров. В то же время можно использовать в дополнение к фильтрации такой эффективный метод, как расширение эмитируемого спектра. Эту технологию, получившую название *Spread Spectrum*, используют в системах связи, где она показала высокую эффективность. В настоящее время ее начали использовать и при разработке импульсных источников питания. В частности, компания *Linear Technology* в ноябре 2016 г. анонсировала выпуск контроллера DC/DC-преобразователя, в котором используют технологию *Spread Spectrum*, реали-

зованную в виде частотной модуляции сигнала генератора управляющих сигналов [4].

Постановка задачи

Для практического использования технологии расширения спектра в преобразователях напряжения необходимо исследовать эффективность ее применения. Нужно провести сравнительный анализ различных способов реализации технологии расширения спектра в импульсных источниках питания и сформировать рекомендации по ее использованию. В дальнейшем запланирован анализ кондуктивных помех с использованием стандартных эквивалентов сети и сравнением с допустимыми уровнями помех, обусловленных нормативными документами.

Основные решения

Итак, технологию расширения спектра (Spread Spectrum) широко используют в системах связи и компьютерной технике, но значительно реже в источниках питания. Для чего это нужно, рассмотрим на примере использования этой технологии в системах связи. Для формирования сигналов с расширенным спектром, отличающихся от других модулированных информационных сигналов, в которых энергия концентрируется в окрестности несущего колебания, используется совершенно противоположный подход – распределение энергии сигнала в очень широкой полосе частот [5, 6]. Известно, что чем сильнее концентрируется энергия сигнала для передачи отдельной единицы информации, тем выше эффективность модуляции.

Полоса частот, занимаемая информационным сигналом, может быть значительно расширена (коэффициент расширения в пределах 10 до 10000) при их представлении двоичными последовательностями с использованием нескольких различных методов. В результате такого расширения спектра есть два полезных эффекта.

Эффект первый – рассредоточение энергии сигнала в пределах очень широкой полосы частот, что соответственно снижает спектральную плотность мощности в любой точке спектра.

Уровень сигнала зависит от нескольких факторов, таких как передаваемая мощность, расстояние от передатчика, усиление антенны и ширина спектра. Рассредоточение энергии позволяет снизить уровень спектральных составляющих сигнала ниже уровня шума.

Второй полезный эффект Spread Spectrum процесса в том, что приемник может разделить полезный и мешающий сигналы, даже если мешающий имеет существенно более высокий уровень, чем полезный.

Эффективность в части устойчивости к помехам обусловила широкое применение Spread Spectrum технологии передачи данных в разных сферах.

Имеются многочисленные способы, используемые в военных и космических коммуникациях, распределения сигнала по широкой полосе частот. Однако для коммерческого применения разрешены только технологии Frequency Hopping (FH) и Direct Sequence (DS).

При использовании технологии Frequency Hopping (скачкообразная перестройка частоты) несущая частота радиопередатчика изменяется скачкообразно в определенной последовательности. При этом каждая из несущих частот и связанных с ней боковых полос должны оставаться в пределах ширины полосы, отведенной для работы системы связи.

В методе Direct Sequence (прямая последовательность) полоса сигнала расширяется вследствие быстрого изменения фазы путем свертки информационного сигнала с псевдослучайной шумовой последовательностью. В приемнике исходный сигнал восстанавливается (в корреляторе) с использованием точно такой же последовательности.

Аналогичный подход можно использовать и при создании импульсных источников питания, характерная особенность которых состоит в формировании широкого спектра кондуктивных и индуктивных помех, создаваемых силовыми ключами преобразователей напряжения в составе источников питания. Причем для повышения КПД таких преобразователей применяют более быстродействующие ключи, и, как следствие, расширяется спектр создаваемых помех. Если частоту сигнала управления ключами изменять во времени, то энергия дискретных составляющих спектра будет снижаться и приближаться к уровню шумовых составляющих.

Чтобы проиллюстрировать, как использование технологии Spread Spectrum изменяет спектр кондуктивных помех преобразователя, промоделируем его работу с использованием программы NI Multisim. При этом не существенно, по какой схеме реализован преобразователь. Достаточно сравнить спектры кондуктивных помех при различных способах формирования сигналов управления силовым ключом (или ключами), чтобы сделать нужные выводы. Для упрощения анализа используем в моделях силовые ключи с близкими к идеальным характеристиками – малым сопротивлением в замкнутом состоянии и малым временем переключения.

На рис. 1 приведена схема понижающего преобразователя с идеальным силовым ключом и

фіксованою частотою преобразования, рівної 1 МГц.

Сигнал управління ключом S1 формує генератор прямокутних імпульсів V2. Длительність імпульсу встановлена рівною 0,4 мкс, довжина періода 1 мкс, довжина фронту і спаду сигналу на виході генератора 10 нс. Рівень кондуктивної поємки оцінюємо по спектру току, передаваного джерелом живлення V1 при роботі преобразувача. Ток контролюємо з допомогою токового пробника XCP1, а вимірювання спектра здійснюється аналізатором спектра XSA1. Діапазон аналізу від 0,5 до 20,5 МГц, число усереднених реалізацій 8192.

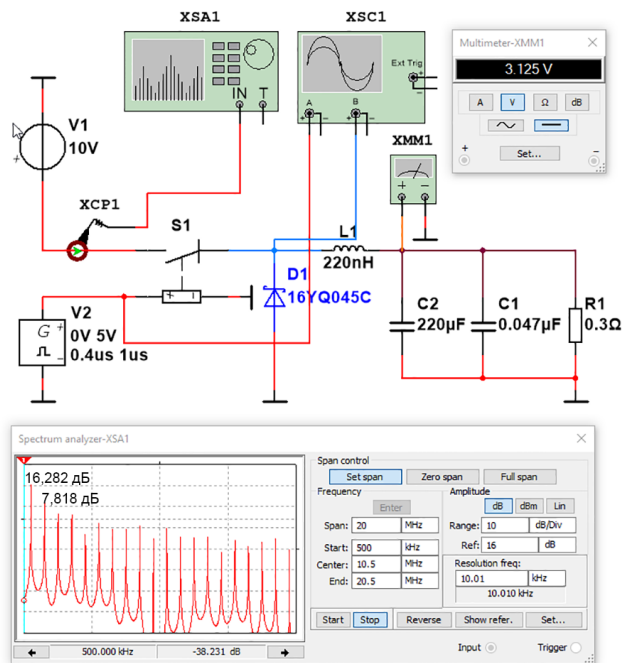


Рис. 1. Модель для дослідження кондуктивних поємок одноктного понижающего преобразувача напруги

Навантажено преобразувач на опір 0,3 Ом і забезпечує на виході напругу 3,1 В при тоці навантаження приблизно 10 А. Відносительний рівень дискретної складової в спектрі з частотою 1 МГц складає 15,845 дБ, другої гармоніки 7,818 дБ (рис. 1). Більш високі гармоніки мають рівень приблизно на 10 дБ нижче. Осцилограми сигналу управління (верхня) і напруги в точці з'єднання ключа S1 і котушки L1 приведені на рис. 2.

Для реалізації технології Spread Spectrum управління силовим ключем здійснено аналогічно методу Direct Sequence і реалізовано з допомогою частотної модуляції сигналу генератора імпульсів по різних законам.

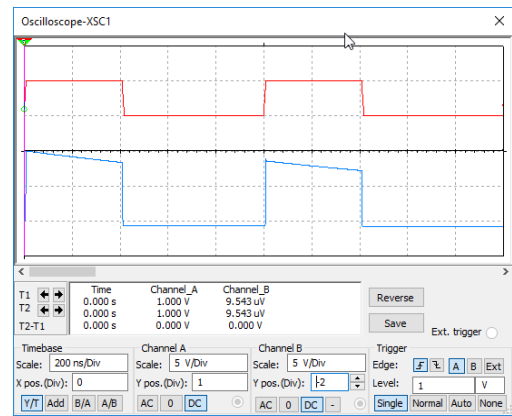


Рис. 2. Осцилограми напруги на виході генератора (верхня) і в точці з'єднання ключа і котушки індуктивності

На рис. 3. приведена модель DC/DC-преобразувача для дослідження кондуктивних поємок одноктного понижающего преобразувача напруги з застосуванням технології розширення спектра, а на рис. 4 – вікно налаштування параметрів генератора модулюючих коєбань.

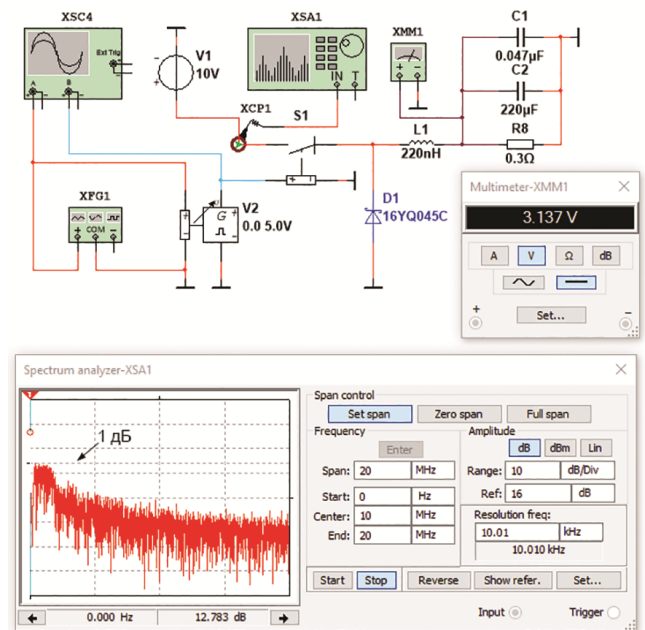


Рис. 3. Модель для дослідження кондуктивних поємок одноктного понижающего преобразувача напруги з застосуванням технології розширення спектра

Для формування управляючого сигналу використано функціональний генератор XFG1 в режимі формування трикутного напруги. Початкове значення частоти генератора імпульсів V2 задає напругу зміщення (вікно Offset на рис. 4 в панелі управління Function generator-XFG1).

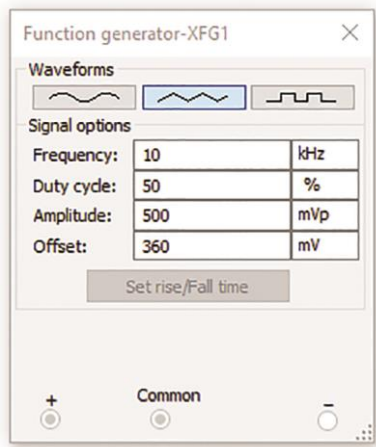
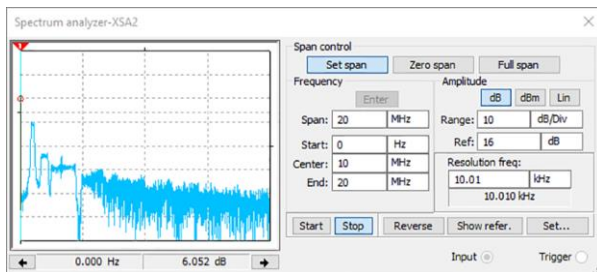
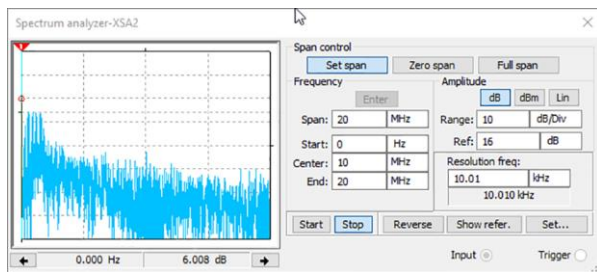


Рис. 4. Окно настройки параметров генератора модулирующих колебаний

Девиация частоты определяется амплитудой треугольного сигнала. При выборе частоты модулирующего сигнала следует учесть, что при очень низкой частоте модулирующего сигнала в спектре колебаний на выходе V2 (при уменьшении амплитуды управляющего сигнала до минимального значения) есть дискретные составляющие в области низких частот. А при высокой частоте модулирующего сигнала дискретные составляющие будут наблюдаться во всей полосе частот. Для сравнения на рис. 5 приведены спектры сигнала на выходе V2 при частоте модулирующего сигнала равной 1 кГц (рис. 5, а) и 100 кГц (рис. 5, б).



а)



б)

Рис. 5. Спектр сигнала на выходе управляемого генератора импульсов при частоте модулирующего сигнала 1 кГц (а) и 100 кГц (б) при центральной частоте сигнала генератора 1 МГц

Как компромисс следует выбирать частоту модулирующего сигнала примерно равную $0,01f_0$, где f_0 – частота сигнала генератора импульсов при отсутствии управляющего сигнала.

Анализ спектра тока, потребляемого от источника питания, показывает, что при частоте модулирующего треугольного сигнала равной 10 кГц максимальный уровень спектральных составляющих снижен до значения 1 дБ и в спектре отсутствуют явно выраженные дискретные составляющие (рис. 3). В эксперименте девиация частоты генератора импульсов составила $f_0 \pm 0,7$ МГц. Таким образом, выигрыш по уровню помех составил не менее 15 дБ, что характеризует весьма существенный результат.

Выбрать значения девиации частоты достаточно просто. Необходимо, чтобы эффективная ширина спектра на выходе генератора не превышала значения несущего колебания. При нарушении этого условия в спектре появляются комбинационные составляющие в низкочастотной области спектра за счет отражения компонентов спектра, выходящих за указанную выше полосу частот от начала координат. Удовлетворительные результаты по снижению уровня помех получаются при значении девиации частоты от $0,25f_0$ до $0,7f_0$.

Если моделирование недоступно, то значение девиации частоты можно рассчитать теоретически. Учитывая, что спектр ЧМ-сигнала описывает тригонометрический ряд с коэффициентами, определяемыми функцией Бесселя первого рода (1), и имеет бесконечно широкую полосу, нужно найти эффективную ширину спектра, в которой сосредоточено до 90% энергии. Это можно сделать по таблицам функций Бесселя [5] или расчетным путем. Необходимо найти индекс модуляции, при котором уровни спектральных составляющих боковых гармоник вблизи нулевой частоты имеют значения не более -40 дБ по отношению к уровню несущей частоты при отсутствии модуляции.

$$U = U_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta) \cos(\omega_0 t + n\Omega t), \quad (1)$$

где Ω – частота модулирующего сигнала,
 $\beta = \Delta f/\Omega$ – индекс модуляции.

Зная индекс модуляции и частоту модулирующего сигнала, можно найти значение девиации частоты. Из [6] следует, что при значении $\beta = 24$ эффективная ширина спектра составляет 58Ω , т. е. 580 кГц для значения модулирующей частоты 10 кГц.

Если в качестве модулирующего сигнала выбрать гармонический, то снижение уровня

спектральних составляючих вследствие расширения спектра на 3...4 дБ меньше, чем при использовании треугольного сигнала.

При использовании в качестве модулирующего сигнала напряжения теплового шума, формируемого на резисторе, в спектре кондуктивной помехи сохраняются явно выраженные спектральные составляющие. Их уровень примерно на 7 дБ больше, чем при использовании треугольного сигнала. Это объясняется тем, что энергия модулирующего сигнала распределена в широкой полосе частот, и поэтому обеспечить достаточно значительную девиацию частоты несущего колебания затруднительно.

На рис. 6 приведен спектр кондуктивной помехи с максимальным уровнем составляющих 1 дБ. Но для получения такого результата понадобилось сформировать случайный сигнал, распределенный в полосе 700 кГц, со среднеквадратическим значением 11,5 В.

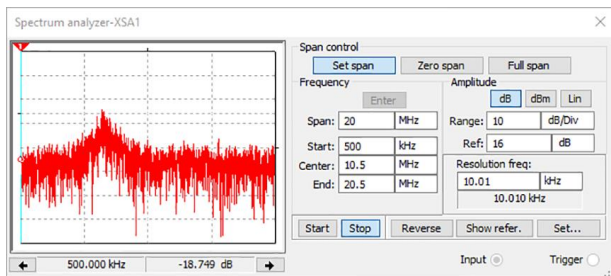


Рис. 6. Спектр кондуктивной помехи при управлении частотой генератора случайным процессом

Характерная особенность этого спектра состоит в том, что он сконцентрирован возле частоты 6 МГц. Вводя дополнительное смещение на вход управления генератором, можно сместить максимум спектра в область более низких частот. Однако уровень помехи от этого не становится меньше.

Из проведенных экспериментов следует, что наиболее удобный модулирующий сигнал для достижения одинакового эффекта – треугольный сигнал.

При уменьшении нагрузки в 10 раз (до 1 А) амплитудные значения составляющих спектра уменьшились примерно на 15 дБ, а эффект уменьшения уровня составляющих при расширении спектра сохраняется на прежнем уровне.

Выводы

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о высокой эффективности применения технологии расширения спектра для снижения уровня кондуктивных помех. Снижение уровня спектральных составляющих в спектре помех может достигать 16 дБ.

Самым простым способом расширения спектра является частотная модуляция сигнала, управляющего переключением силовых ключей в преобразователях напряжения. Наиболее эффективно использование сигнала треугольной формы в качестве модулирующего.

Эффективность снижения уровня спектральных составляющих во многом зависит от правильного выбора индекса модуляции. При увеличении индекса модуляции выше оптимального значения может наблюдаться рост уровня спектральных составляющих за счет формирования интермодуляционных составляющих в спектре управляющего сигнала.

Список использованной литературы

1. Pilinsky, V. Assessment of Electromagnetic Environment Mains occurring by SMPS & PLC Systems [Текст] / V. Pilinsky, A. Rozvadovsky, I. Zaitcev // Proceedings of the 11-th Int. Symp. on EMC "EMC Europe 2012", с 8–6. Rome, Italy, Sept. 17-21, 2012.
2. Directive 2014/30/EU of 26 February 2014 on the harmonization of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/electromagnetic-compatibility>.
3. Рабинович, Е., ЭМС: Решения от TDK-lambda для повышения кондуктивной помехозащищенности [Текст] / Е. Рабинович // Электронные компоненты. – 2013. – №11. – С. 116–120.
4. News release. 60V Synchronous 4-Switch Buck-Boost Controller with Spread Spectrum. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cds.linear.com/docs/en/pressrelease/LT8390.p>
5. Chulwoo Kim, Minyoung Song, Sewook Hwang Cost Effective Spread Spectrum Clock Generator Design / Chulwoo Kim, Minyoung Song, Sewook Hwang [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://home.sogang.ac.kr/sites/aiprc/sub_05/Lists/b6/Attachments/23/04_Cost%20Effective%20Spread%20Spectrum%20Clock%20Generation%20Design_%EA%B3%A0%EB%A0%A4%EB%8C%80_%EA%B9%80%EC%B2%A0%EC%9A%B0.pdf
6. Frequency Assignments in Slow Frequency-Hopping GSM Networks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.math2.rwth-aachen.de/basilic/Publications/2011/Tie11/Tie11.pdf>
7. Картьяну, Г., Частотная модуляция [Текст] / Г. Картьяну. – Бухарест, "Меридиане", 1964. – 672 с.

References

1. Pilinsky, V., Rozvadovskiy, A. and Zaitzev, I., "Assessment mains electromagnetic environmental formed by SMPS & PLC systems", *Proc. of Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 17-21 Sept. 2012, Rome, Italy, (EMC Europe, 2012), IEEE Xplore DOI: 10.1109/EMC Europe.2012.6396780.
2. Directive 2014/30/EU of 26 February 2014 on the harmonization of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility. <https://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/electromagnetic-compatibility>.
3. Rabinovich, E., (2013) EMS: the Solution from TDK-lambda to enhance conductive noise immunity., [EMS: Resheniya ot TDK-lambda dlya povyisheniya konduktivnoy pomoho-zaschischnosti]. *Elektronnyie komponentyi*, (11), pp. 116-120.
4. News release (2016) *60V Synchronous 4-Switch Buck-Boost Controller with Spread Spectrum*. Available at: <http://cds.linear.com/docs/en/press-release/LT8390.pdf>
5. Chulwoo, K., Minyoung, S. and Sewook, H., *Cost Effective Spread Spectrum Clock Generator Design*. Available at: http://home.sogang.ac.kr/sites/aiprc/sub_05/Lists/b6/Attachments/23/04_Cost%20Effective%20Spread%20Spectrum%20Clock%20Generation%20Design_%EAB3%A0%EB%A0%A4%EB%8C%80_%EAB9%80%EC%B2%A0%EC%9A%B0.pdf
6. Tieves, M., (2011) *Frequency Assignments in Slow Frequency-Hopping GSM Networks*. Available at: <https://www.math2.rwthachen.de/basilic/Publications/2011/Tie11/Tie11.pdf>
7. Kartyanu, G., (1964) *Frequency modulation*, [Chastotnaya modulyatsiya]. Buharest: Meridiane.

ANALYSIS THE EFFECTIVENESS OF SPREAD SPECTRUM TECHNOLOGY TO REDUCE THE LEVEL OF DC/DC CONVERTERS CONDUCTED INTERFERENCE

V. V. Makarenko, V.V. Pilinsky
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Abstract. *Switch mode power supplies (SMPS) generated a wide range of conductive and inductive interference. Moreover, the spectrum dominated by discrete components with a switching frequency of a power transistor and its harmonics. The spectrum width can reach several tens of megahertz. Known technology Spread Spectrum, widely used in communication systems, allows expanding the spectrum of the signal, reducing the level of its components to the noise.*

The aim of this work is to study the effectiveness of technology use Spread Spectrum to reduce conductive interference when operating DC/DC converters, search methods, modulation parameters of the modulated signals.

For the research was the simulation of a step-down DC/DC Converter in the program NI Multisim. The efficacy of reducing the level of conducted interference estimated by comparing the spectra of the current given by a power supply Converter operating in various modes: with a fixed conversion frequency and time varying.

The results of modeling in NI Multisim confirmed the high efficiency of this technology. Discrete components of the spectrum are blurred in a wide range of frequencies and the level of conducted interference can be lowered by 15...16 dB. Studies have shown that the most effective application for reducing interference using frequency modulation control signal according to a triangular law. The article presents recommendations for selecting the frequency of the modulating signal and the frequency deviation of the modulated oscillations to obtain the maximum of useful effect.

Key words: *electromagnetic compatibility, conductive interference, spectrum, Spread Spectrum, transmitter, modulation, simulation, Multisim.*

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ SPREAD SPECTRUM ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ КОНДУКТИВНИХ ЗАВАД DC/DC-ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

В. В. Макаренко, В.В. Пілінський
Національний технічний університет України

Анотація. Наведено результати дослідження ефективності використання технології розширення спектру (*Spread Spectrum*) на рівень кондуктивних завад, створених під час роботи DC/DC-перетворювачів. Моделювання у середовищі NI Multisim підтвердило – спектральні компоненти розосереджено у широкому діапазоні частот, рівень кондуктивних завад знижено до 16 дБ. Сформульовано рекомендації щодо вибору параметрів сигналу і параметрів частотної модуляції.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, кондуктивна завада, розширення спектру, *Spread Spectrum*, перетворювач, модуляція, моделювання, *Multisim*.

Получено 26.12.2016



Макаренко Владимир Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры звукотехники и регистрации информации Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского". Просп. Победы, 37, Киев, Украина, E-mail: v_mak@ukr.net, тел. +38-044-236-60-93

Vladimir Makarenko, candidate of technical Sciences, associate Professor of Department of Audio Engineering and Registration of Information of the National technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Prosp. Pobedy, 37, Kyiv, Ukraine, E-mail: v_mak@ukr.net, tel: +38-044-236-60-93

ORCID ID: 0000-0002-4749-9818



Пилинський Владимир Владимирович, кандидат технических наук, профессор кафедры звукотехники и регистрации информации Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского". Просп. Победы, 37, Киев, Украина, E-mail: pww@ukr.net, тел. +38-044-236-60-93

Vladimir Pilinsky, candidate of technical Sciences, Professor of Department of Audio Engineering and Registration of Information of the National technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Prosp. Pobedy, 37, Kyiv, Ukraine, E-mail: pww@ukr.net, tel: +38-044-236-60-93

ORCID ID: 0000-0002-2569-9503