

## ВЛИЯНИЕ МОДУЛЯЦИИ С РАСШИРЕННЫМ СПЕКТРОМ НА УРОВЕНЬ ПОМЕХ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ УСИЛИТЕЛЯМИ КЛАССА D

**Onykiyenko Yu.O. Effect of the spread spectrum modulation on the interference level generated by class D amplifiers.** Spread spectrum modulation (SSM) is used in switch mode power converters (particularly class D amplifiers) for suppressing of generated electromagnetic interferences. SSM is effective in a wide frequency band and may be relatively easily implemented. SSM in class D amplifiers reduces the electromagnetic interference both in the power supply circuit and in the output circuit. Features of the periodic and random spread spectrum modulation are analyzed. The SSM with periodic modulating signal are used for suppressing in local frequency regions. Modulating signal may be sinusoidal, triangular, sawtooth, etc. The SSM with random modulating signal provides suppression in wide frequency band. The effectiveness of different types of modulation and methods of their implementation are discussed in this article. Quantitative estimations of the spread spectrum modulation efficiency in various embodiments and conditions of use are proposed.

**Keywords:** class D amplifiers, electromagnetic compatibility, electromagnetic interferences, spread spectrum modulation

**Оникієнко Ю.О. Вплив модуляції з розширеним спектром на рівень завад, згенерованих підсилювачами класу D.** Розглянуто модуляцію з розширеним спектром для зменшення електромагнітних завад від підсилювачів класу D. Виконано аналіз особливостей застосування періодичної і неперіодичної модуляції з розширеним спектром. Оцінено ефективність різних видів модуляції і способи їх реалізації. Надано рекомендації щодо використання модуляції з розширеним спектром для зниження рівня або перерозподілу спектру згенерованих завад.

**Ключові слова:** підсилювачі класу D, електромагнітна сумісність, електромагнітні звади, модуляція з розширеним спектром

**Оникиенко Ю.А. Влияние модуляции с расширенным спектром на уровень помех, генерируемых усилителями класса D.** Рассмотрена модуляция с расширенным спектром для подавления электромагнитных помех от усилителей класса D. Выполнен анализ особенностей применения периодической и непериодической модуляции с расширенным спектром. Оценена эффективность различных видов модуляции и способы их реализации. Предложены рекомендации по использованию модуляции с расширенным спектром для снижения уровня или перераспределения спектра генерируемых помех.

**Ключевые слова:** усилители класса D, электромагнитная совместимость, электромагнитные помехи, модуляция с расширенным спектром

**1. Введение.** В последние годы необходимость повышения энергоэффективности усилителей мощности звуковых частот способствовала широкому применению усилителей класса D. Наряду с несомненным достоинством усилителей мощности класса D как преобразователей ключевого типа: существенным снижением потерь и соответственно увеличением к.п.д., им присущ и недостаток – электромагнитные помехи, которые распространяются по проводам и в виде излучения. Для снижения электромагнитных помех (ЭМП), создаваемых усилителями класса D применяют следующие меры: использование помехоподавляющих фильтров, экранирование проводов громкоговорителя, установка помехоподавляющих цепей параллельно силовым элементам, применение специальных схемных решений и т.п. [1].

Одним из наиболее эффективных способов снижения уровня ЭМП является использование *модуляции с расширенным спектром* (MPS, Spread Spectrum Modulation). MPS позволяет исключительно изменением режима работы выходного каскада, не прибегая к использованию дополнительных помехоподавляющих элементов и не изменяя конструкции и компоновки устройства, снизить уровень ЭМП. Причем в результате снижается как уровень кондуктивных помех, так и уровень помех в результате эмиссии. В случае использования MPS частота переключения усилителя класса D изменяется определенным образом в некотором диапазоне относительно центральной частоты. В результате общее количество спектральной энергии не уменьшается, но распределяется в более широком диапазоне, тем самым уменьшая максимальные значения спектральных

составляющих. МРС наиболее широко распространена в портативных усилителях класса D, где использование выходного помехоподавляющего фильтра затруднительно.

На рис. 1 представлено сравнение спектров немодулированного и частотно-модулированного (ЧМ) сигнала в окрестностях частоты переключения, поясняющее механизм снижения помех.

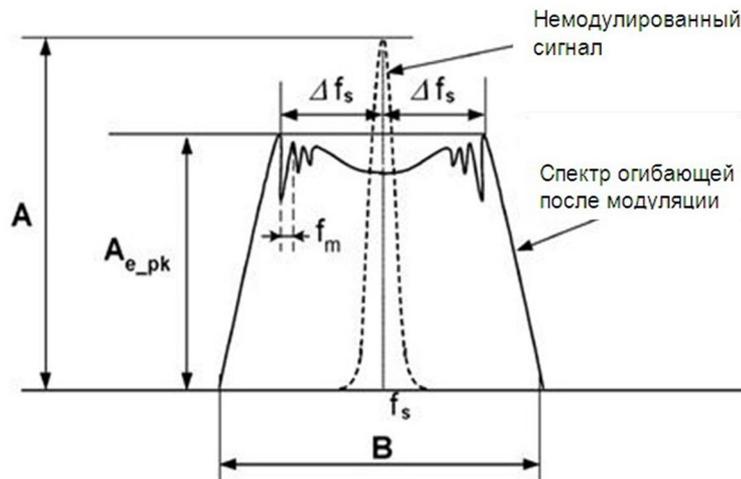


Рис. 1. Механизм снижения амплитуды спектральных составляющих при частотной модуляции

Существующие виды МРС можно разделить на два типа: с модулирующим сигналом в виде периодической функции и с модулирующим сигналом в виде непериодической функции. В зависимости от типа непериодической функции МРС бывает случайная, псевдослучайная, хаотическая и т.п.

Цель данной статьи – оценить эффективность МРС как средства подавления помех и предложить рекомендации для применения МРС при разработке усилителей мощности класса D. Для этого необходимо рассмотреть основные виды МРС, проанализировать варианты их реализации и сравнить количественные показатели снижения электромагнитных помех для каждого из вариантов.

**2. Особенности МРС с периодическим модулирующим сигналом.** Выражение для спектра частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) с косинусоидальным модулирующим сигналом может быть получено следующим образом [2]. Функцию для широтно-импульсной модуляции (ШИМ) последовательности прямоугольных импульсов  $G(t)$  можно выразить

через ряд Фурье  $G(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{j\theta_n}$ , где  $C_n$  и  $\theta_n$  являются амплитудой и фазой  $n$ -ой гармоники соответственно.

Зависимость  $C_n$  от частоты  $f$  может быть вычислена следующим образом:

$$C_n = \frac{1}{T_s} \int_{-T_s/2}^{T_s/2} G(t) e^{-j2\pi nft} dt = \frac{j}{2\pi n f T_s} A (e^{-j2\pi nDT} - 1),$$

где  $A$  – амплитуда импульса;  $DT$  – коэффициент заполнения;  $T_s$  – период следования импульсов переключения.

При частотной модуляции ШИМ функция  $G(t)$  модулируется периодической функцией амплитудой  $\Delta f_s$  и частотой  $f_m$ . На практике  $\Delta f_s$  представляет максимальную девиацию частоты переключения  $f_s$ . Мгновенная частота  $f_{inst,n}$   $n$ -ой гармоники равна производной по времени фазы  $\theta_n$ :

$$f_{inst,n} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta_n}{dt} = n [f_s + \Delta f_s \cos(2\pi f_m t)].$$

Отсюда можно получить выражение для фазы

$$\theta_n = 2\pi n \int_0^t [f_s + \Delta f_s \cos(2\pi f_m \lambda)] d\lambda = 2\pi n f_s t + n\beta \sin(2\pi f_m t),$$

где  $\beta$  является индексом модуляции и имеет вид  $\beta = \frac{\Delta f_s}{f_m}$

Выражение для частотно-модулированного сигнала прямоугольной формы имеет вид:

$$G(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \left\{ J_0(n\beta) e^{j2\pi n f_s t} + \sum_{k=1}^{\infty} J_k(n\beta) \left[ e^{j2\pi(n f_s + k f_m)t} + (-1)^k e^{j2\pi(n f_s - k f_m)t} \right] \right\},$$

где  $J_0$  – Функция Бесселя 0-го порядка;  $J_k$  – Функция Бесселя  $k$ -го порядка.

Спектр ЧИМ сигнала описывается выражением:

$$G(f, \beta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \left[ J_0(n\beta) \delta(f - n f_s) + \sum_{k=1}^{\infty} J_k(n\beta) \left\{ \delta(f - n f_s - k f_m) + (-1)^k \delta(f - n f_s + k f_m) \right\} \right].$$

Спектральная плотность энергии ЧИМ сигнала имеет вид:

$$G(f, \beta) = 2 \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \left[ J_0(n\beta) \delta(f - n f_s) + \sum_{k=1}^{\infty} J_k(n\beta) \left\{ \delta(f - n f_s - k f_m) + (-1)^k \delta(f - n f_s + k f_m) \right\} \right] \right|^2, f > 0. \quad (1)$$

Анализ выражения (1) показывает, что спектр ЧИМ сигнала содержит бесконечное число гармоник и зависит от  $\beta$  и  $f_m$ . Изменяя эти параметры можно перераспределять энергию спектра в требуемом диапазоне частот. Таким образом, достоинством периодической МРС является возможность в определенных пределах изменять амплитуду гармоник на некоторых участках частотного диапазона.

Работа [3], была одной из первых, в которой рассмотрена возможность снижения уровня помех, генерируемых преобразователем напряжения, с помощью МРС, в частности, синусоидальной. Авторы показали эффективность применения МРС и добились снижения уровня ЭМП на 10-16 дБ при частоте переключения 90 кГц и девиации 10 кГц.

Кроме синусоидальной (косинусоидальной) функции для МРС используются также треугольная, экспоненциальная, пилообразная и т.п. В работе [4] выполнено сравнение эффективности МРС с различными функциями или профилями модуляции.

На рис. 2 представлены синусоидальный, треугольный и экспоненциальный профили модуляции, для которых выполнялось сравнение.

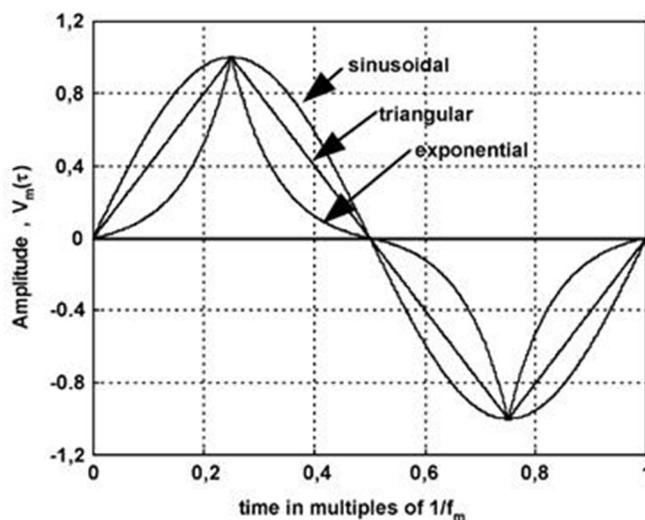


Рис. 2. Профили модуляции, используемые для сравнения эффективности МРС

В результате максимальное подавление до 10 дБ уровней ЭМП получено с треугольным профилем и высоких частотах переключения. Экспоненциальный профиль обеспечивает наибольшую эффективность при подавлении помех на заданной частоте. Таким образом, выбор наиболее удобного профиля зависит от цели.

Вызывает интерес усилитель класса D с двойной пилообразной МРС [5]. Преимуществом такой МРС является простота реализации. Кроме того, авторы утверждают, что предложенная МРС снижает уровень кондуктивных ЭМП на 14-16 дБ, обеспечивает коэффициент нелинейных искажений (КНИ) усилителя порядка 0,05% - 0,2% и к.п.д. около 90%. Рис. 3 поясняет формирование двойной пилообразной МРС.

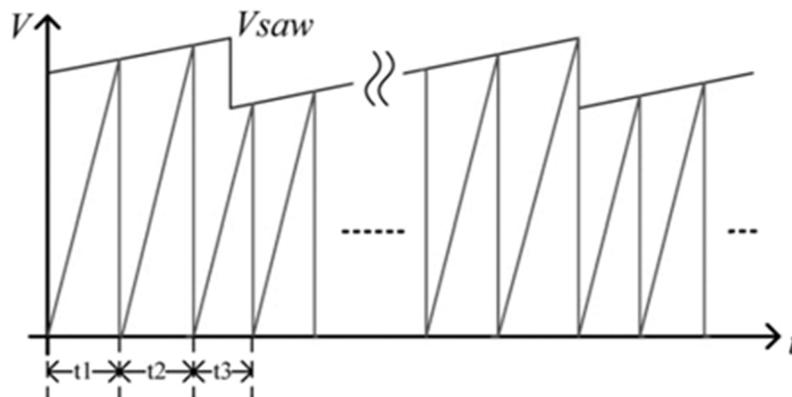


Рис. 3. Модуляция последовательности пилообразных импульсов пилообразным напряжением

Одной из разновидностей периодических МРС является линейная частотная модуляция (ЛЧМ) ШИМ сигнала [6]. Такая ЛЧМ обеспечивает снижение ЭМП приблизительно на 16 дБ и при равных условиях обеспечивает преимущество над случайной МРС.

**3. Особенности МРС со случайным модулирующим сигналом и сравнение ее с МРС с периодическим модулирующим сигналом.** Математическое описание МРС со случайным модулирующим сигналом выполнено в работах [7, 8]. Спектральная плотность случайной МРС имеет вид:

$$SG(f, \mathfrak{R}) = \frac{1}{E[T_k]} \left\{ E[|G(f)|]^2 + 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{E[G(f) e^{j2\pi f T_k}] E[G^*(f)]}{1 - E[e^{j2\pi f T_k}]} \right\} \right\},$$

где  $E$  – математическое ожидание всего ансамбля;

$G^*(f)$  – комплексно сопряженная величина по отношению к спектру  $G(f)$ ;

$T_k$  – мгновенный период переключения.

Случайную и псевдослучайную МРС широко используют для снижения уровня генерируемых ЭМП. В работе [9] выполнен теоретический анализ влияния коэффициента заполнения на распределение спектральных составляющих при случайной МРС.

В [10] приведено описание задающего генератора со случайной МРС для усилителя класса D, позволяющего снизить уровень помех на 12 дБ. Рассмотрено влияние случайной МРС на уровень нелинейных искажений. Подчеркнуто, что МРС незначительно увеличивает КНИ. На рис. 4 приведены спектры выходного напряжения генератора со случайной модуляцией и без нее, полученные в результате компьютерного моделирования. Вариант псевдослучайной МРС, отличающийся цепями формирования частотно модулированного сигнала, предложен в [11]. Эффективность подавления помех порядка 5-16 дБ в зависимости от частоты.

МРС благодаря простоте реализации и эффективности находит широкое применение в интегральных усилителях класса D. Псевдослучайная МРС реализована фирмой Maxim в линейке усилителей класса D в интегральном исполнении [12].

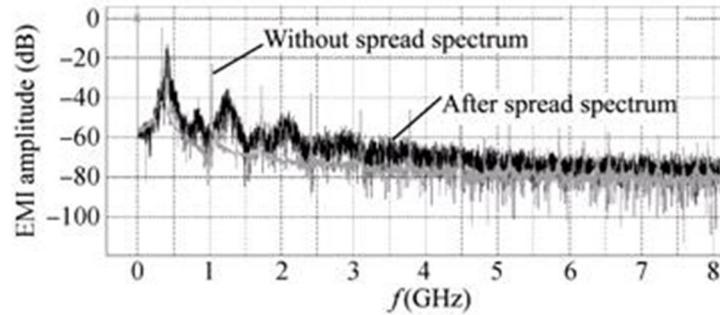
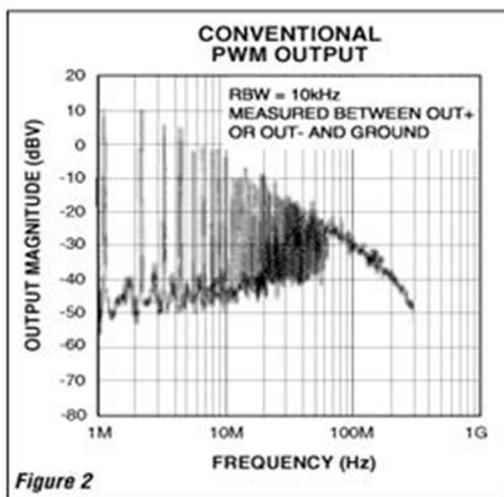
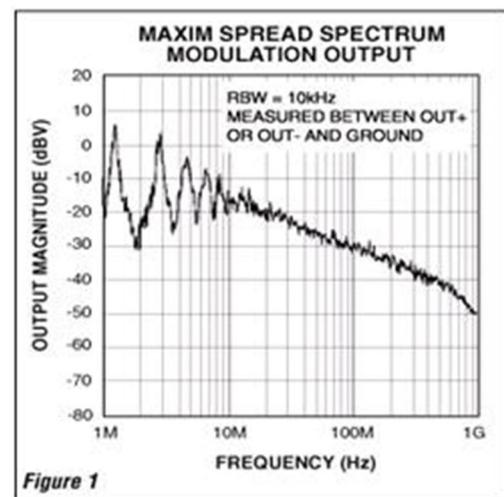


Рис. 4. Влияние случайной модуляции на спектр выходного напряжения задающего генератора

Сравнительные кривые напряжений помех усилителей фирмы Maxim с МРС и без нее приведены на рис. 5,а) и рис. 5,б). В работе [13] выполнено экспериментальное сравнение эффективности подавления кондуктивных ЭМП для периодической и случайной МРС. Указано, что случайная МРС обеспечивает лучшее подавление помех на высоких частотах и более равномерное распределение спектра.



а)



б)

Рис. 5. Напряжение помех на выходе усилителя класса D фирмы Maxim:  
а) без МРС, б) с МРС

Широкое распространение в усилителях класса D получила сигма-дельта модуляция. Механизм снижения кондуктивных помех данным методом подобен механизму случайной МРС. В работе [14] рассмотрены различные варианты реализации такого вида модуляции. Главным достоинством сигма-дельта модуляции является простота реализации. Для реализации сигма-дельта модуляции первого порядка необходимы интегратор и компаратор. Однако такой модулятор не обеспечивает достаточного сглаживания выбросов частотной характеристики. Поэтому для улучшения помехоподавляющих свойств сигма-дельта модуляции во входной сигнал модулятора добавляют некоторую составляющую псевдослучайного напряжения или используют модулятор 2-го порядка. Сигма-дельта модуляции 2-го рода обеспечивает подавление ЭМП порядка 5-10 дБ. Однако при сигма-дельта модуляции используется ШИМ второго рода, что вызывает искажения сигнала и требует повышения рабочей частоты усилителя класса D до 1МГц и выше.

В заключение обзора модуляционных способов снижения уровня ЭМП следует упомянуть еще об одном виде МРС – хаотической модуляции. Теоретические и экспериментальные исследования влияния такой МРС на уровень ЭМП достаточно хорошо описаны в литературе, например в [15]. В силу особенностей реализации хаотическая МРС используется в основном в одноктактных преобразователях напряжения.

В табл. 1 обобщены характеристики различных видов МРС.

Табл. 1. Виды модуляции с распределенным спектром

	Периодическая			Непериодическая		
	Синусоидальная	Пилообразная	Экспоненциальная	Случайная, псевдослучайная	Хаотическая	Сигма-дельта
Ослабление	до 10 дБ	до 16 дБ	до 10 дБ	до 16 дБ	до 16-18 дБ	До 10 дБ
Достоинства	Обеспечивает снижение ЭМП в заданном диапазоне частот			Равномерность снижения ЭМП	Достоинства случайной и периодической	Простота реализации
Недостатки	Неравномерность снижения ЭМП в частотном диапазоне			Возможно появления низкочастотных гармоник	Не используется в УЗЧ класса D	Рабочая частота не ниже 1 МГц

**4. Выводы.** Модуляция с расширенным спектром является эффективным средством снижения ЭМП, генерируемых усилителями звуковых частот класса D. МРС обеспечивает подавления как кондуктивных помех, так и помех излучения в широком диапазоне частот. Введение МРС не требует применения отдельных помехоподавляющих элементов и изменения силовой части усилителя класса D.

Эффективность подавления помех как периодической так и непериодической модуляция с расширенным спектром приблизительно одинакова и составляет 10-16 дБ. При этом МРС обеспечивает подавление помех на высоких частотах (более 10 МГц), где эффективность помехоподавляющих фильтров падает.

Применение в усилителях звуковых частот класса D периодической МРС позволяет обеспечить максимальное снижение ЭМП в заданных локальных участках частотного диапазона. Модуляция пилообразным или треугольным напряжением является одной из самых простых в практической реализации.

МРС случайного и псевдослучайного типа обеспечивает более равномерное подавление ЭМП во всем диапазоне частот. Поэтому в усилителях звуковых частот класса D в основном используют указанный вид модуляции.

#### Литература

1. Оникиенко Ю.А. Особенности обеспечения электромагнитной совместимости усилителей мощности класса D / Ю.А.Оникиенко, В.В. Пилинский, В.Б. Швайченко // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка і енергоефективність». – 2011. – Ч.1. – С.39-42.
2. Tse K. K. A comparative study of carrier-frequency modulation techniques for conducted EMI suppression in PWM converters / K. K. Tse, Henry Shu-Hung Chung, S. Y. Ron Hui, H. C. So // IEEE Transactions on Industrial Electronics – Jun 2002 – Vol. 49, No. 3 – P. 618-627.
3. Lin Feng Reduction of Power Supply EMI Emission by Switching Frequency Modulation / Feng Lin, Dan Y. Chen // IEEE Transactions On Power Electronics – January 1994 – Vol. 9, No. 1 – P.132-137.

4. González David Conducted EMI Reduction in Power Converters by Means of Periodic Switching Frequency Modulation / David González, Josep Balcells, Alfonso Santolaria, Jean-Charles Le Bunetel, Javier Gago, Didier Magnon, Stéphane Bréhaut // IEEE Transactions On Power Electronics – Nov. 2007 – Vol. 22, No. 6 – P. 2271-2281.
5. Yeh Mei-Ling An Electromagnetic Interference (EMI) Reduced High-Efficiency Switching Power Amplifier / Mei-Ling Yeh, Wan-Rone Liou, Hsiang-Po Hsieh, Yu-Jei Lin // IEEE Transactions on Power Electronics – March 2010 – Vol.25, No. 3 – P.710 – 718.
6. Husain Tausif A Chirp PWM Scheme for Brushless DC Motor Drives / Wasi Uddin, Tausif Husain, Rakesh Mitra, Ernest Ofori, Yilmaz Sozer, Iqbal Husain // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2012: IEEE Conf., 15-20 Sept. 2012: proc. of conf. – [s.l.], 2012. – P. 3317-3323.
7. Tse K.K. A comparative investigation on the use of random modulation schemes for dc-dc converters / K.K. Tse, H.S.H. Chung, S.Y.R. Hui, H.C.So // IEEE Transactions on Industrial Electronics – Apr 2000 – Vol.47, No. 2 – P.253 –263.
8. Stankovic A. M. Analysis and synthesis of randomized modulation schemes for power converters / A. M. Stankovic, G. C. Verghese, D. J. Perreault // IEEE Transactions on Power Electronics – Nov. 1995 – Vol.10, No. 6 – P.680 – 693.
9. Guo Hai-Yan The Effect Of Duty Cycle On Suppressing EMI Level In Random Carrier Frequency Modulation Of PWM // Hai-Yan Guo, Zhao-Ji Li, Bo Zhang , Ping Luo, Zhe-Hong Li // Apperceiving Computing and Intelligence Analysis, 2008: IEEE Conf., 13-15 Dec. 2008: proc. of conf. – [s.l.], 2008. – P. 164 – 167.
10. Xin M. An Advanced Spread Spectrum Architecture Using Pseudorandom Modulation to Improve EMI in Class D Amplifier / M. Xin, C. Zao, Z. Ze-kun, Z. Bo // IEEE Transactions on Power Electronics – Feb. 2011 – Vol.26, No. 2 – P.638 – 646.
11. Sadamura Hiroshi Spread-Spectrum Clocking in Switching Regulators to Reduce EMI / Hiroshi Sadamura, Takayuki Daimon, Takayuki Shindo, Haruo Kobayashi, Takao Myono, Tatsuya Suzuki; Shuhei Kawai, Takaslii Iijima // ASIC, 2002: IEEE Conf., 2002: proc. of conf. – [s.l.], 2002. – P. 141 – 144.
12. Spread-Spectrum-Modulation Mode Minimizes Electromagnetic Interference in Class D Amplifiers [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <http://www.maximintegrated.com/app-notes/index.mvp/id/3881>.
13. Knitter A. Conducted EMI Mitigation in Switched Mode DC-DC Converters by Spread Spectrum Techniques / A. Knitter, J.Luszcz, P.J. Chrzan // Compatibility in Power Electronics: IEEE Conf., 1 June 2005: proc. of conf. – [s.l.], 2005. – P. 166-171.
14. Paramesh Jeyanandh Use of Sigma-Delta Modulation to Control EMI from Switch-Mode Power Supplies / Jeyanandh Paramesh, Annette von Jouanne // IEEE Transactions On Industrial Electronics. – February 2001. – Vol. 48, No. 1. – P. 111-117.
15. Li H. A chaotic peak current-mode boost converter for EMI reduction and ripple suppression / H. Li, W. K. S. Tang, Z. Li, W. A. Halang // IEEE Transactions on Circuits and Systems II. – Aug. 2008. – Vol.55, №. 8. – P. 763-767.

*Автор статті*

**Оникієнко Юрій Олексійович** – кандидат технічних наук, асистент кафедри звукотехніки і реєстрації інформації, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна. Тел.: +380 096 443 89 90. E-mail: [razrobotka@ukr.net](mailto:razrobotka@ukr.net)

*Author of the article*

**Onykyienko Yuriy Oleksiyovych** – candidate of sciences (technical), assistant of the Audio Engineering and Registration of Information Department, National technical university of Ukraine “Kiev polytechnic institute”, Kyiv, Ukraine. Tel.: +380 096 443 89 90. E-mail: [razrobotka@ukr.net](mailto:razrobotka@ukr.net)

Дата надходження в редакцію: 20.12.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Ю.Г. Савченко