

bolshih impulsnykh tokov molnii. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnykh trudov. Tematicheskii vyipusk: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2004. No 4. 37-45 Print. **2.** Generator toka iskusstvennoy molnii dlya naturnykh ispytaniy tehnicheskikh ob'ektov. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Pribory i tekhnika eksperimenta. 2008. No 3. 1-5 Print. **3.** Povyshenie nadezhnosti raboty generatora impulsov toka iskusstvennoy molnii. O.S. Nedzelskiy, A.A. Petkov, A.V. Plichko, E.G. Ponuzhdaeva. Elektrotehnika i elektromehanika. 2010. No 2. 50-53 Print. **4.** Petkov A.A. Razryad dvuh emkostnykh nakopiteley energii na obschuyu nagruzku. A.A. Petkov. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnykh trudov. Tematicheskii vyipusk: Tekhnika i elektrofizika vyisokikh napryazheniy. Kharkiv: NTU "KhPI", 2007. No 34. 79-85 Print. **5.** Petkov A.A. Formirovanie impulsa toka s monotonnym narastaniem i spadom znacheniy pri parallelnoy rabote dvuh emkostnykh nakopiteley. A.A. Petkov. Elektrotehnika i elektromehanika. 2009. No 3. 65-69 Print. **6.** Oleynik O. V. Formirovanie aperiodicheskogo impulsa pri razryade dvuh emkostnykh nakopiteley energii na obschuyu nagruzku. O. V. Oleynik, A.A. Petkov. VIsnik NTU "KhPI". Zbirnik naukovih prats. Tematichnyi vipusk: Tekhnika i elektrofizika visokih naprug. Kharkiv: NTU "KhPI", 2009. No 11. 141-148 Print. **7.** Egorov A.E., Azarov G.N., Koval A.V. Issledovanie ustroystv i sistem avtomatiki metodom planirovaniya eksperimenta. Pod red. V.G. Voronova. Kharkiv: Vischa shkola. Izd-vo pri Khark. un-te, 1986. 240 Print. **8.** Petkov A.A. Modifikatsiya parametrov ispytatelnykh ustroystv pri perevode ih v novyyi rezhim ekspluatatsii. A.A. Petkov. Elektrotehnika i elektromehanika. 2009. No 6. 63-66 Print.

Поступила (received) 22.04.2015

УДК 621.314: 621.391

В.В. ПИЛИНСКИЙ, канд. техн. наук, проф. НТУУ «КПИ»;
Д.М. ПРОБИТЫЙ, аспирант НТУУ «КПИ»;
А. А. ДОВЖЕНКО, ассистент НТУУ «КПИ»

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЗВУКОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИМПУЛЬСНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ И УСИЛИТЕЛЯМИ КЛАССА D

Проведен анализ известных методов моделирования помех от блоков звукотехнических систем с ключевыми элементами. Предложен подход к созданию модели в среде открытого программного обеспечения LTSpice с учетом особенностей узлов ключевого типа и эквивалента сети для прогнозирования кондуктивных помех. Проведена оценка характеристик кондуктивных помех при изменении нагрузки на выходе источника вторичного электропитания ключевого типа в режиме Burst Mode. Разработанная модель позволяет оценивать параметры электромагнитной обстановки на этапе проектирования при различных значениях частоты звукового сигнала, нагрузки, видов модуляции усилителя класса D и режимов работы источника вторичного электропитания ключевого типа.

© В.В. Пилинский, Д.М. Пробитый, А. А. Довженко, 2015

Ключевые слова: электромагнитная обстановка, схемотехническое моделирование, усилитель класса D, источник питания ключевого типа, электромагнитная совместимость, сочетанное воздействие.

Введение. Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) в конкретной электромагнитной обстановке (ЭМО) по кондуктивным цепям требует применения конструктивных, схемотехнических и организационных мер и средств [1,2]. Звуковые усилители класса D имеют высокие энергетические и удельные массо-габаритные показатели, но создают электромагнитные помехи, усугубляя электромагнитную обстановку [3]. Ситуация усложняется при работе усилителей класса D совместно с источниками вторичного электропитания ключевого типа (ИВЭП КТ), также создающими электромагнитные помехи. Пример сочетанного формирования электромагнитной обстановки в кондуктивных цепях ИВЭП КТ при наличии информационных сигналов в силовых цепях (power line communication PLC) приведен в работе [4]. В таких и других аналогичных специфических условиях формирования ЭМО обеспечение электромагнитной совместимости требует разработки и использования новых нетривиальных подходов, а не только применения помеходавляющих фильтров. Это, в свою очередь, требует специальных методов моделирования электромагнитных процессов в таких цепях.

Таким образом проблема интеграции приведенных выше функциональных узлов в звукотехнической системе, в которой реализовано использование разных частот коммутации, требует разработки адекватных методов моделирования. В дальнейшем на их основе возможна реализация средств обеспечения ЭМС при сочетанном воздействии источников непреднамеренных помех, поэтому предлагаемая работа является актуальной.

Цель статьи – проанализировать методы моделирования электромагнитной обстановки, создаваемой звукотехническим объектом, состоящим из усилителя класса D и ИВЭП КТ с учетом диапазонов частот и способов коммутации для оценки характеристик системы на этапе проектирования.

Моделирование ЭМО, создаваемой источниками вторичного электропитания ключевого типа Для решения поставленной задачи, импульсный источник питания необходимо проектировать с учетом особенностей работы усилителя.

Исходя из исследований [5], следует, что уровень кондуктивных помех в преобразователях ключевого типа возрастает при отсутствии нагрузки на выходе (рис. 1).

Для уменьшения данного эффекта в исследуемых звукотехнических системах, целесообразно использовать источник питания, работающий в режиме малого времени открытого ключа (Burst Mode) [6], что позволяет значительно

но снизить уровень помех на выходе ИВЭП при малых токах потребления.

В модель, представленную на рис. 2, включен двухъячеечный эквивалент сети, рекомендованный CISPR [7], что позволяет исследовать зависимость ЭМО источника питания от выходной нагрузки и частоты модуляции.

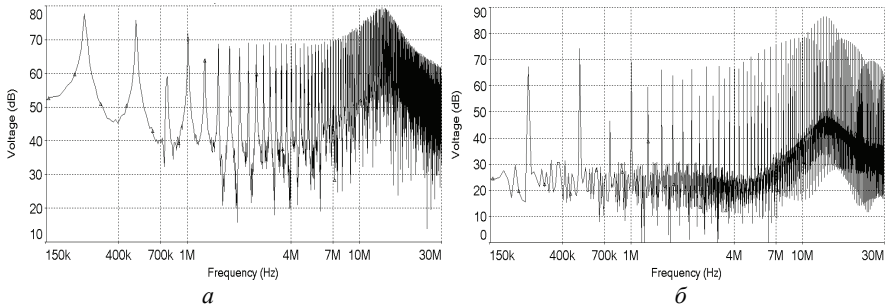


Рисунок 1 – Уровни кондуктивных помех преобразователя ключевого типа:
а – с нагрузкой; б – без нагрузки

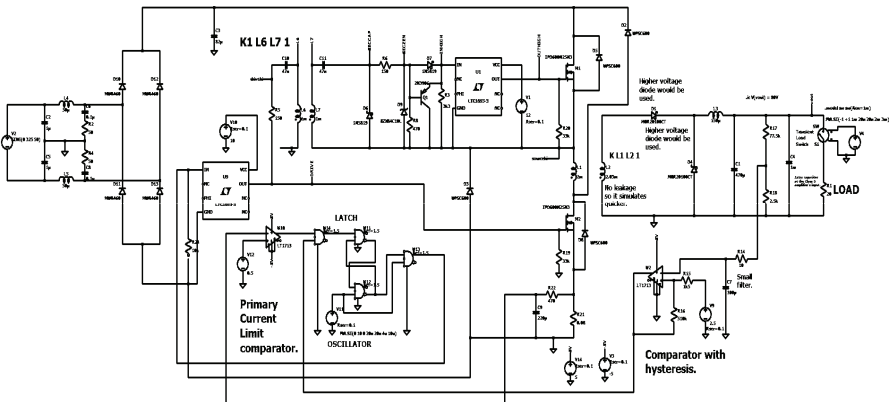


Рисунок 2 – Модель ИВЭП, работающего в режиме Burst mode

На рис. 3 показаны временные диаграммы напряжения на силовом каскаде и помехи, измеряемые на эквиваленте сети, от нагрузки на выходе ИВЭП при использовании режима Burst Mode. Таким образом, моделирование подтверждает эффективность использования данной техники в звукотехнических системах.

Влияние частоты модуляции на параметры ЭМО источника питания при постоянной нагрузке 100 Вт показано на рис. 4. При увеличении частоты модуляции ИВЭП уровни кондуктивных помех на эквиваленте сети снижаются в звуковом диапазоне частот.

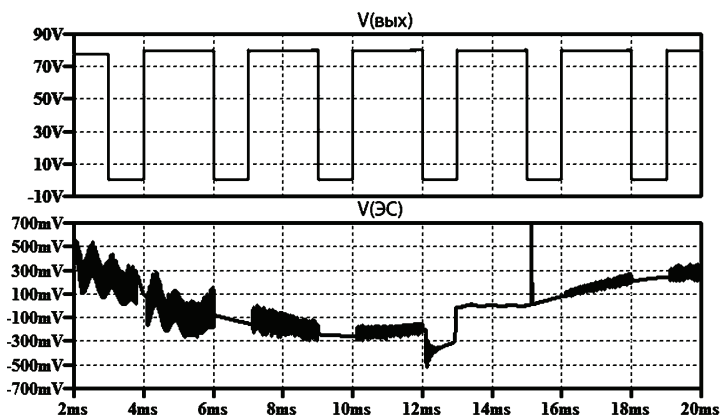


Рисунок 3 – Временные характеристики кондуктивных помех при изменении нагрузки на выходе ИВЭП в режиме Burst Mode

Моделирование ЭМО, создаваемой усилителем класса D. При проектировании звукотехнических систем часто отдают предпочтение усилителям класса D, построенным по технологии UcD (Universal class D) [8]. В отличие от типовой, данная схема позволяет использовать звуковой сигнал в качестве модулирующего, что приводит к уменьшению количества элементов схемы и, соответственно, путей распространения кондуктивных помех.

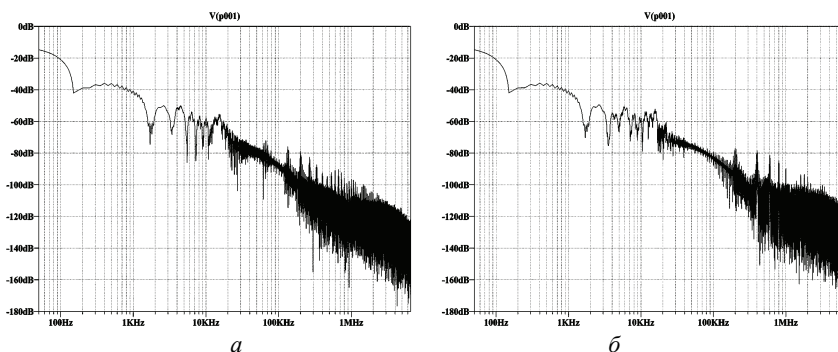


Рисунок 4 – Спектр кондуктивных помех модели ИВЭП:
 а – при частоте модуляции 66 кГц; б – при частоте модуляции 200 кГц

Модель, представленная на рис. 5, позволяет исследовать ЭМО усилителя класса D, а также спектр выходного сигнала, в зависимости от частоты и параметров входного сигнала.

На рис. 6 показаны спектрограммы выходного сигнала усилителя класса D при разной частоте входного звукового сигнала, из которых следует, что изменение частоты сигнала влияет на спектр помех усилителя.

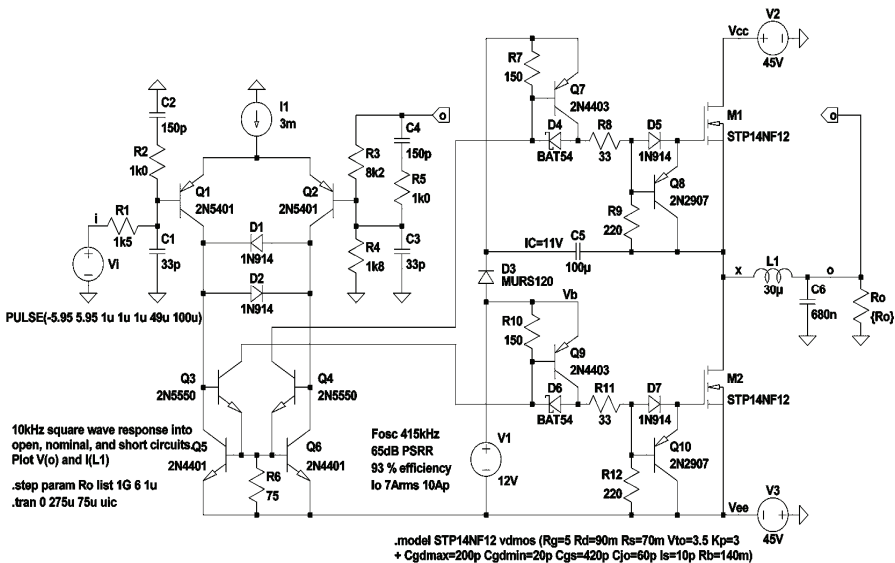


Рисунок 5 – Модель усилителя класса D, построенного по технологии Ucd8

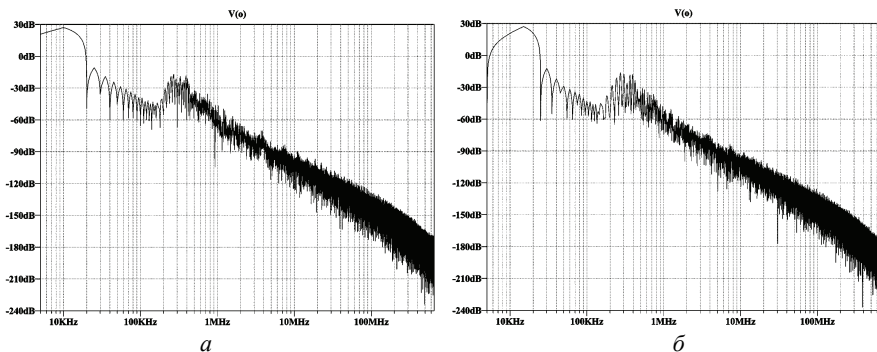


Рисунок 6 – Спектр выходного сигнала усилителя класса D:

а – при частоте входного звукового сигнала 10 кГц, б – при частоте 15 кГц

Моделирование ЭМО, создаваемой звукотехнической системой. Разработка звукотехнических устройств с использованием узлов с ключевым режимом работы требует особого внимания на этапе проектирования, поскольку может привести к появлению сочетанных неконтролируемых возбуждений

Для оценки ЭМО системы предложена модель, позволяющая оценить зависимость уровней кондуктивных помех в питающую сеть, спектр выходного звукового сигнала в зависимости от изменяемых параметров сигнала на

входе усилителя и режимов работы ИВЭП (рис. 7).

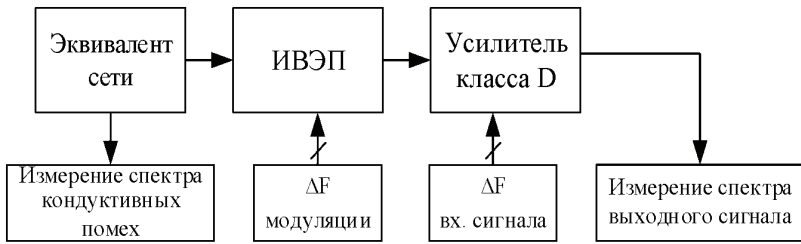


Рисунок 7 – Структурная схема модели для исследования сочетанного воздействия узлов ключевого типа звукотехнической системы.

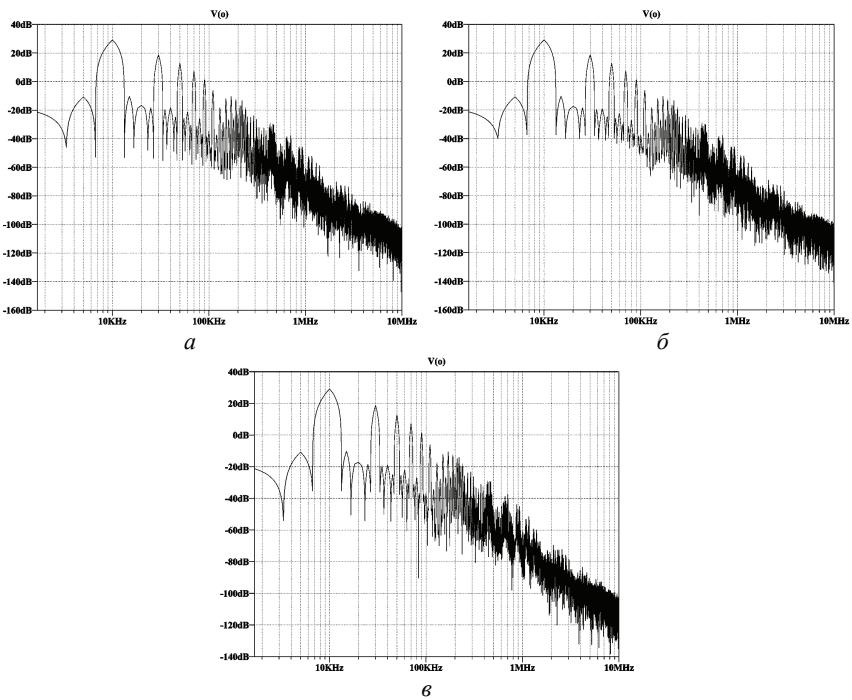


Рисунок 8 – Спектр сигнала на выходе усилителя: а – при частоте модуляции ИВЭП 100 кГц; б – при частоте модуляции 200; в – при частоте модуляции 415 кГц

Моделирование сочетанного воздействия системы приобретает особенное значение при использовании усилителей класса D типа UcD, поскольку возникает необходимость учитывать воздействие частоты самовозбуждения усилителя, которая зависит от частоты входного звукового сигнала [9]. Мо-

делирование работы усилителя показало, что при входном сигнале 10 кГц частота осцилляции составила 415 кГц (рис. 8).

Анализ результатов моделирования, обобщенных на рис. 9, показал принципиальную возможность уменьшения уровня помех на частоте 1 МГц на 20 дБ путем уменьшения частоты переключения ИВЭП КТ.

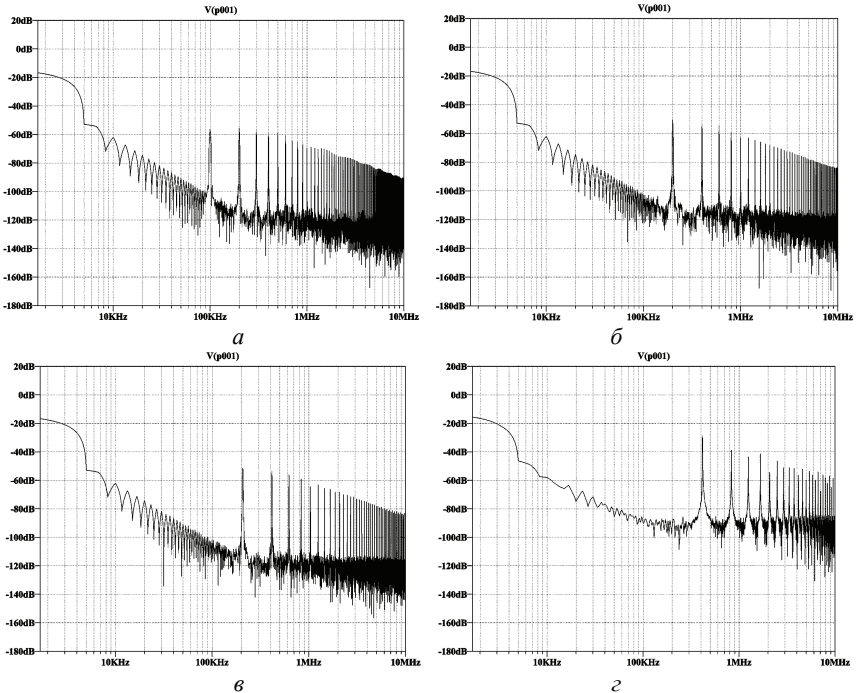


Рисунок 9 – Уровни кондуктивных помех системы: *а* – при частоте модуляции ИВЭП 100 кГц; *б* – при частоте 200 кГц; *в* – при частоте 207; *г* – при частоте 415 кГц

Выводы. Таким образом, на основе анализа известных методов моделирования кондуктивных помех ИВЭП КТ и усилителей звуковых частот класса D предложен метод моделирования звукотехнической системы, построенной на основе функциональных узлов ключевого типа, иллюстрирующий возможность исследования влияния сочетанного воздействия на электромагнитную обстановку и выходные параметры звукового сигнала. Поскольку модель разработана в открытой масштабируемой среде моделирования LTSpice, предложенный метод может быть использован при проектировании более сложных звукотехнических систем.

Список литературы: 1. Векслер Г.С. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания / Г.С. Векслер и др. – К.: Техніка, 1990. – 167 с. 2. Кечиев Л.Н. ЭМС и информационная

безопасность в системах телекоммуникации / Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. – 320 с. 3. *Оникієнко Ю.А.* Прогнозирование кондуктивных помех усилителя класса D / Ю.А. Оникієнко, В.В. Пилинский, В.В. Швайченко // Технологии электромагнитной совместимости. – 2014. – № 1 (48). – С. 3-9. 4. *Pilinsky V.* Assessment of Electromagnetic Environment Mains occurring by SMPS & PLC Systems / V. Pilinsky, A. Rozvadovsky, I. Zaicev // C 8-6. Proceedings of the 11-th Int. Symp. On EMC «EMC Europe 2012». – Rome, 2012. 5. *Onikienko Y.* Simulation of Electromagnetic Environment of Class D Amplifier / Y. Onikienko, V. Pilinsky, D. Probity, V. Shvaychenko // Electronics and Nanotechnology (ELNANO): IEEE Conf., 2013. – P. 396-398. 6. *Min-Sung Kim* Advanced Burst Mode Control to Reduce the Standby Power of Flyback Converter / *Min-Sung Kim* et al. // Scientific Research: Engineering, 2013. – P. 137-141 7. CISPR 22 Edition 6.0 2008-09 IEC STANDARDS+ Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement. – Режим доступа: http://webstore.iec.ch/p-preview/info_cispr22%7Bed5.2%7Den_d.pdf. 8. *McGarry* The standby power challenge / *McGarry* // Proc. Of IEEE AGEC, 2004. – P. 56-62. 9. *Bruno Putzeys* Simple Self-Oscillating Class D Amplifier with Full Output Filter Control // Spain: Audio Engineering Society Convention 118 – 2005. – Режим доступа: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=13169>.

Bibliography (transliterated): 1. Veksler G.S. et al. *Podavlenije elektromagnitnyh pomex v cepjah elektropitanija*. Kiev: Technika, 1990. Print. 2. Kechiev, L. N. , and Stepanov, P.V. EMS i informacionnaja bezopasnost' v sistemah telekommunikacij Moscow: Izdatelskij dom Tehnologiji, 2005. Print. 3. Y. Onikienko, V. Pilinsky, V. Shvaychenko. "Prognozirovanie konduktivnyh pomex usilitelya klassa D." *Technologii elektromagnitnoy sovmestimosti*. No 1 (48). 2014. 3-9. Print. 4. V. Pilinsky, A. Rozvadovsky, I. Zaicev. "Assessment of Electromagnetic Environment Mains occurring by SMPS & PLC Systems." Rome: Proceedings of the 11-th Int. Symp. On EMC «EMC Europe 2012». 2012. 8-6. Print. 5. Y. Onikienko, V. Pilinsky, D. Probity, V. Shvaychenko. "Simulation of Electromagnetic Environment of Class D Amplifier." *Electronics and Nanotechnology (ELNANO): IEEE Conf.* 2013. 396-398. Print. 6. Min-Sung Kim et al. "Advanced Burst Mode Control to Reduce the Standby Power of Flyback Converter" *Scientific Research: Engineering*, 2013. 137-141. Print. 7. CISPR 22 Edition 6.0 2008-09 IEC STANDARDS+ Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement. Web. 29 September 2014 <http://webstore.iec.ch/p-preview/info_cispr22%7Bed5.2%7Den_d.pdf>. 8. McGarry "The standby power challenge" *Proc. Of IEEE AGEC*. 2004. 56-62. Print. 9. Putzeys, Bruno "Simple Self-Oscillating Class D Amplifier with Full Output Filter Control" Spain: *Audio Engineering Society Convention 118*. Web. 1 May 2005 <<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=13169>>.

Поступила (received) 23.03.2015

УДК 621.314: 621.391

Методи моделювання для оцінки електромагнітної сумісності звукотехнічних систем з імпульсними джерелами живлення та підсилювачами класу D / В.В. Пілінський, Д.М. Пробитий, О.О. Довженко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 115-122. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведено аналіз відомих методів моделювання завад від блоків звукотехнічних систем з ключовими елементами. Запропоновано підхід до створення моделі в середовищі відкритого програмного забезпечення LTSpice, з урахуванням особливостей узлів ключового типу та еквівалента мережі для прогнозування кондуктивних завад. Проведено оцінку характеристик кондуктивних завад при зміні навантаження на виході джерела вторинного електроживлення ключового типу в режимі Burst Mode. Розроблена модель дозволяє оцінювати параметри електромагнітної обстановки на етапі проектування за різних значень частоти звукового сигналу, навантаження, видів модуляції підсилювача класу D та режимів роботи джерела вторинного електроживлення ключового типу.

Ключові слова: електромагнітне середовище, схемотехнічне моделювання, підсилювач класу D, джерело живлення ключового типу, електромагнітна сумісність, поєднаний вплив.

УДК 621.314: 621.391

Методи моделювання для оцінки електромагнітної сумісності звукотехнічних систем з імпульсними джерелами живлення та підсилювачами класу D / В.В. Пілінський, Д.М. Пробитий, А.А. Довженко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 115-122. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведен аналіз відомих методів моделювання поем от блоків звукотехнічних систем з ключовими елементами. Предложено подход к созданию модели в среде открытого программного обеспечения LTSpice с учетом особенностей узлов ключового типа и эквивалента сети для прогнозирования кондуктивных поем. Проведена оценка характеристик кондуктивных поем при изменении нагрузки на выходе источника вторичного электропитания ключового типа в режиме Burst Mode. Разработанная модель позволяет оценивать параметры электромагнитной обстановки на этапе проектирования при различных значениях частоты звукового сигнала, нагрузки, видов модуляции усилителя класса D и режимов работы источника вторичного электропитания ключового типа.

Ключевые слова: электромагнитная обстановка схемотехническое моделирование, усилитель класса D, источник питания ключового типа, электромагнитная совместимость, сочетанное воздействие.

Modeling techniques to estimate EMC of sound system with switched-mode power supply and Class-D amplifier / V. V. Pilinsky, D.M. Probity, A.A. Dovzhenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – С. 115-122. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

The known techniques of interference simulation in switching mode operating audio units analyzed. The approach to create a model in the freeware SPICE environment LTSpice offered, with the Line Impedance Stabilization Network and the sound system units' switched-mode operation issues taken into account for conducted interference prediction. Conducted interference estimation depending on the load changes at the output of the Burst Mode operating power source carried out. The developed model makes electromagnetic compatibility parameters estimation possible for different values of the audio frequency, load, class D modulation aspects and SMPS modes yet at the design stage. Analysis of simulation results summarized in the paper demonstrates the fundamental possibility of up to 20 dB output noise level reducing at the frequency of 1 MHz by means of the switched-mode power source oscillating frequency changing.

Keywords: electromagnetic environment, circuit simulation, Class D amplifier, switched-mode power supply, electromagnetic compatibility, combined effect.