

УДК 621.314: 621.391

**Ю. А. Оникиенко, В. В. Пилинский, В. Б. Швайченко**

## **Прогнозирование кондуктивных помех усилителя класса D**

*Предложено программное обеспечение для расчета кондуктивных электромагнитных помех (ЭМП) усилителя класса D. В основу программы положен метод моделирования ЭМП на основе анализа эквивалентной схемы усилителя с элементами, определяющими создание и распространение кондуктивных помех. Для расчета используются параметры, которые можно задать или измерить экспериментально: амплитуда, период следования и длительность импульсов выходного напряжения, а также длительность фронта импульсов и пр. Программное обеспечение имеет удобный дружественный интерфейс и обеспечивает точность, достаточную для оценочного расчета.*

**Ключевые слова:** моделирование электромагнитных помех, программа для моделирования помех, усилитель класса D, электромагнитная совместимость

### **Введение**

В последние годы звуковые усилители класса D, имеющие высокий к.п.д. и лучшие удельные массогабаритные показатели, получили широкое распространение в IT-индустрии, бытовой и автомобильной аудиотехнике. Однако им присущ существенный недостаток: высокий уровень создаваемых электромагнитных помех (ЭМП). Международные и национальные стандарты в области электромагнитной совместимости (ЭМС) предъявляют жесткие требования к уровню электромагнитной эмиссии импульсных устройств (например, нормы кондуктивных помех для автомобильной электроники [1]). Это вынуждает разработчиков обеспечивать ЭМС импульсных преобразователей с другими устройствами [2]. В связи с этим моделирование уровней ЭМП проектируемых устройств, в частности усилителей класса D, становится важным инструментом, позволяющим значительно уменьшить затраты времени и средств при проектировании и особенно на стадии доработки.

Помочь разработчикам импульсных преобразователей оценить уровни кондуктивных помех, которые эти устройства создают или будут создавать, может специализированное программное обеспечение (ПО). Основой такого ПО является математическая модель преобразователя, учитывающая источники возникновения и пути распространения ЭМП.

В настоящее время для моделирования уровней кондуктивных ЭМП используют методы эквивалентных цепей. Преобразователь представляют совокупностью источников тока и/или напряжения помех и эквивалентных импедансов, параметры которых могут быть заданы при расчете или определены в результате измерения. Количество источников и импедансов зависит от типа преобразователя и точности модели. Существует подход, когда преобразователь представляют в виде «черного ящика». В этом случае число активных и пассивных элементов цепи сводится к минимуму, а их параметры определяют измерением [3, 4, 5]. Количество измерений зависит от сложности «черного ящика». Достоинство такого подхода – высокая точность модели, определяемая только точностью измерительного оборудования. Недостатки – процесс измерений необходимо многократно повторять при изменениях режимов работы устройства и предсказать можно только помехи от уже собранного устройства. На простоту реализации метода влияет также то, в какой области – во временной или частотной, выполняется моделирование уровней ЭМП. Преимущества временного анализа [6] – более высокая разрешающая способность и точность. Недостатки – большое время вычислений и возможные проблемы сходимости. Методы частотного анализа [7, 8] позволяют значительно уменьшить время вычислений, не имеют проблемы сходимости, но их сложно использовать при моделировании высокочастотной части спектра. Существуют также комбинированные методы анализа, как во временной, так и в частотной области [9].

В зависимости от цели моделирование ЭМП выполняется в виде сигнала на выходе эквивалента сети [10] или с разделением напряжения помех на симметричную и несимметричную составляющие [8]. Разделение помех позволяет упростить анализ путей их распространения и проектирование помехоподавляющих фильтров.

Зачастую, особенно на стадии проектирования, необходима приблизительная, но быстрая оценка уровней помех при выборе конструкции или схемных решений. Большинство методов расчета уровней ЭМП типа «черного ящика» сложно использовать в инженерной практике из-за необходимости выполнять большое количество измерений и/или сложности математического аппарата. Таким образом, оценочная модель устройства, как источника ЭМП, должна быть не критичной к вычислительным ресурсам и позволять быстро рассчитывать уровни ЭМП с достаточной точностью. Соответственно ПО должно быть простым в использовании и рассчитанным на не специалиста в области ЭМС. Например, в [11] предложено прикладное программное обеспечение, позволяющее рассчитать уровни кондуктивных электромагнитных помех и подобрать сетевой помехоподавляющий фильтр для обратного источника электропитания.

Цель данной работы – представить ПО для расчета ЭМП усилителей класса D, требующее минимальных компьютерных ресурсов для вычислений и обеспечивающее точность результатов, достаточную для предварительной оценки уровней помех. ПО разработано на основе эквивалентной схемы усилителя класса D, подключенного к эквиваленту сети с учетом паразитных параметров. Программой выполняется расчет напряжений ЭМП на выходе эквивалента сети на основе данных, полученных путем измерения и/или использования расчетных параметров выходного напряжения усилителя: амплитуды, периода следования и длительности импульсов, длительности фронта-спада импульсов и пр.

### Усилитель класса D с учетом паразитных параметров

Схема выходного мостового каскада усилителя класса D, подключенного к V-образному эквиваленту сети приведена на рис. 1. На схеме изображены регулярные элементы усиления сигнала и элементы, определяющие уровень ЭМП. Регулярные элементы – элементы фильтра  $L1$ ,  $C1$ ,  $L2$ ,  $C2$  и нагрузочный резистор  $RL$ . Транзисторы  $VT1$ – $VT4$  это и регулярные элементы, и источники напряжения помех. Рецепторы ЭМП – резисторы эквивалента сети  $R1$  и  $R2$ . Электромагнитные помехи распространяются по проводам питания, в которых учтены сопротивления  $Rp1$ ,  $Rp2$  и индуктивности  $Lp1$  и  $Lp2$  и проводникам печатной платы с индуктивностями  $Lp3$  и  $Lp4$ . Развязывающий конденсатор  $Cd$  обозначен на схеме с паразитными параметрами: дросселем  $Lcd$  (индуктивность выводов) и резистором  $Rcd$  (внутреннее сопротивление). Паразитные емкости между выходами усилителя и «землей» представлены конденсаторами  $Cp1$ ,  $Cp2$ ,  $Cp3$  и  $Cp4$ .

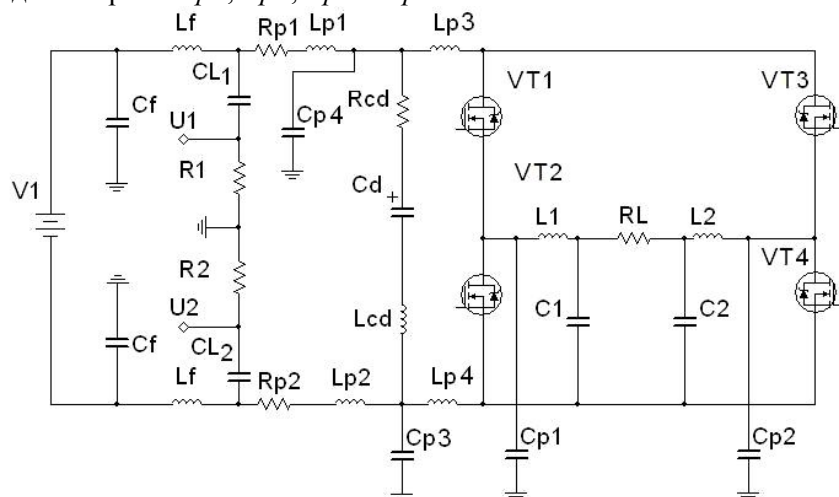


Рис. 1. Схема усилителя класса D, подключенного к эквиваленту сети

Основными критериями при выборе эквивалентной схемы усилителя класса D являются: минимальное количество параметров, достаточное для оценочного расчета; выполнение вычислений с минимальными затратами ресурсов компьютера; простота и удобство пользования ПО. Поэтому для уменьшения времени и количества вычислений анализ помех выполнен в частотной области. Так как

напряжения ЭМП рассчитаны на выходе эквивалента сети, то в эквивалентной схеме разделение на симметричную и несимметричную составляющие не проводилось. Учитывая то, что амплитуда напряжения помех между проводами питания и «землей» на несколько порядков меньше, чем между выходами усилителя и «землей», токи несимметричных помех через конденсаторы  $Cp3$  и  $Cp4$  в расчетных формулах не учитывались.

### Эквивалентная схема усилителя класса D

Эквивалентная схема усилителя класса D с учетом паразитных параметров, подключенного к эквиваленту сети приведена на рис. 2. Для определения напряжений на резисторах эквивалента сети  $R1$  и  $R2$  необходимо вычислить значения токов, протекающих в соответствующих контурах. Для нахождения токов составлена система уравнений: источники помех представлены вектором  $\mathbf{E}$ , пути распространения помех – матрицей  $[\mathbf{Z}]$ , токи кондуктивных помех – вектором  $\mathbf{I}$ . Система уравнений в матричной форме для схемы на рис. 2. имеет вид:

$$\begin{bmatrix} Z_1 + Z_3 & -Z_3 & 0 & 0 \\ -Z_3 & Z_3 + Z_4 + Z_5 & -Z_4 & -Z_5 \\ 0 & -Z_4 & Z_2 + Z_4 & 0 \\ 0 & -Z_5 & 0 & Z_5 + Z_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{R1} \\ I_L \\ I_{R2} \\ I_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ -E_1 - E_3 \\ -E_2 \\ E_2 + E_3 - I_1 Z_6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

На схеме обозначены:  $Z1$  – импеданс эквивалента сети (элементы  $CL1, R1$ ) последовательно с импедансом положительного провода питания ( $Rp1, Lp1$ );  $Z2$  – импеданс эквивалента сети ( $CL2, R2$ ) последовательно с импедансом отрицательного провода питания ( $Rp1, Lp1$ );  $Z3$  – импеданс конденсатора  $Cp1$ ;  $Z4$  – импеданс конденсатора  $Cp2$ ;  $Z5$  – импеданс нагрузки и выходного фильтра ( $RL, L1, C1, L2, C2$ );  $Z6$  – импеданс развязывающего конденсатора  $Cd$  и индуктивности проводников печатной платы  $Lp3$  и  $Lp4$ ;  $E1, E2$  и  $E3$  – источники напряжений помех на выходах усилителя, представлены амплитудными спектрами импульсов трапецеидальной формы. Источники напряжения  $E2$  и  $E3$  формируют ток через нагрузочную цепь  $Z5$  (симметричная составляющая помех), источники  $E1$  и  $E2$  формируют токи через паразитные емкости  $Z3$  и  $Z4$  на «землю» (несимметричная составляющая). Источник тока  $I1$  представлен амплитудным спектром импульсов треугольной формы и моделирует сумму токов, протекающих через диоды выходных транзисторов в режиме активно-индуктивной нагрузки и режиме подключения нагрузки через  $LC$ -фильтр, а также «сквозных» токов при переключении выходных транзисторов усилителя [12], если таковые имеются.

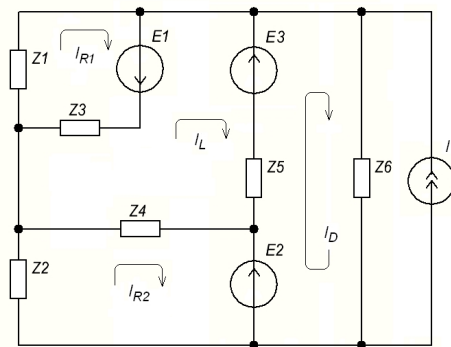


Рис. 2. Эквивалентная схема усилителя класса D с учетом паразитных параметров, подключенного к эквиваленту сети

В результате вычисления токов  $IR1$  и  $IR2$  получаем значения напряжений помех на выходных резисторах эквивалента сети  $R1$  и  $R2$ . Симметричная  $U_{DM}$  и несимметричная  $U_{CM}$  составляющие помех, необходимые для расчета ППФ, получены из известных выражений [13]. С учетом направлений токов в схеме на рис. 2 формулы имеют следующий вид:

$$U_{DM} = R_1 \left( \frac{I_{R1} + I_{R2}}{2} \right), \quad U_{CM} = R_1 \left( \frac{I_{R1} - I_{R2}}{2} \right)$$

На рис. 3 представлены кривые напряжений электромагнитных помех на выходе эквивалента сети, полученные экспериментально и в результате моделирования с использованием эквивалентной схемы на рис. 2. Кривые соответствуют режиму активной нагрузки на выходе усилителя класса D на основе интегральной схемы MAX9714. Напряжение питания усилителя 12 В. Расчеты помех выполнены для активной нагрузки сопротивлением 8 Ом, когда  $Z_S = RL$ . Этот режим характеризуется тем, что токи через нагрузку  $RL$  максимальны и уровень помех в этом случае наибольший.

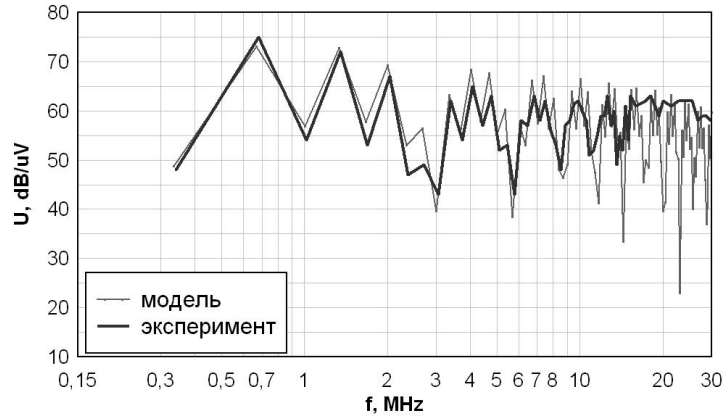


Рис. 3. Кривые напряжений электромагнитных помех на выходе эквивалента сети

Как видно из графиков расчетный уровень помех и расположение экстремумов частотной характеристики совпадают с измеренными почти во всем диапазоне частот. Превышение расчетного уровня помех над измеренным на некоторых частотах составляет 2–5 дБ. Таким образом, приведенная модель усилителя класса D как источника ЭМП является простой в вычислениях и достаточно точной для оценочных расчетов. На основе данной модели разработана программа для вычисления уровней ЭМП и построения соответствующих графиков.

#### Программа для расчета уровней кондуктивных помех

На рис. 4, 5 и 6 представлены соответственно главное окно, окно графиков и алгоритм работы программы для расчета и построения кривых напряжений кондуктивных ЭМП, генерируемых усилителем класса D.

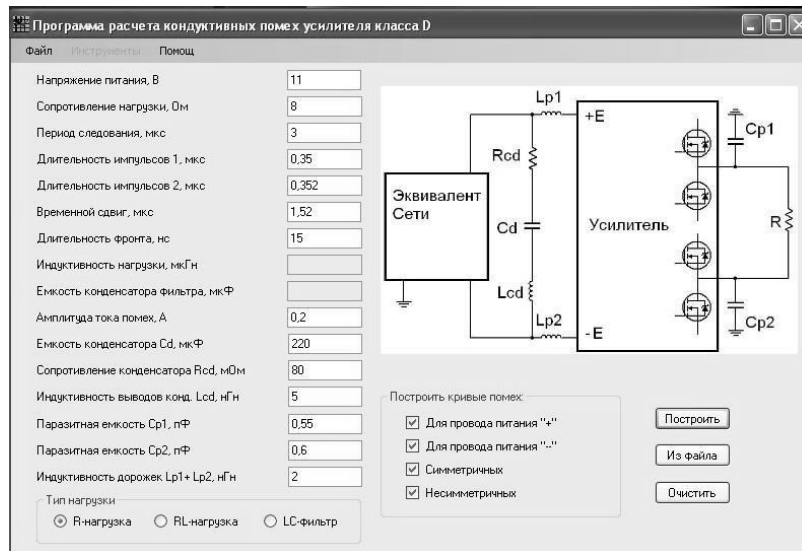


Рис. 4. Главное окно программы расчета

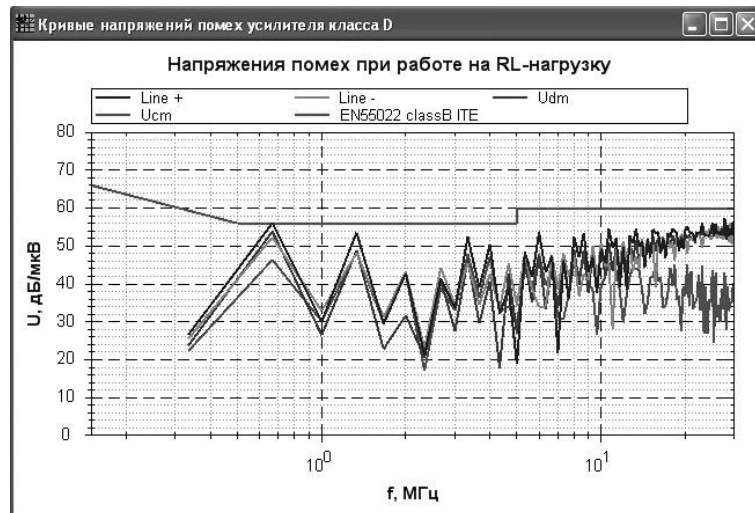


Рис. 5. Окно графиков программы расчета

Программа позволяет пользователю получить значения уровней кондуктивных помех усилителя класса D на выходе эквивалента сети. Для этого в текстовые поля главного окна программы необходимо ввести данные для расчета. Всего вводимых параметров 19. Параметры выходного сигнала для расчёта (амплитуда, периода следования и длительность импульсов, длительность фронта-спада импульсов) можно измерить с помощью осциллографа. Паразитные параметры: емкости между выходами усилителя и «землей», индуктивность выводов и внутреннее сопротивление развязывающего конденсатора могут быть измерены и рассчитаны методом «генератор – вольтметр».

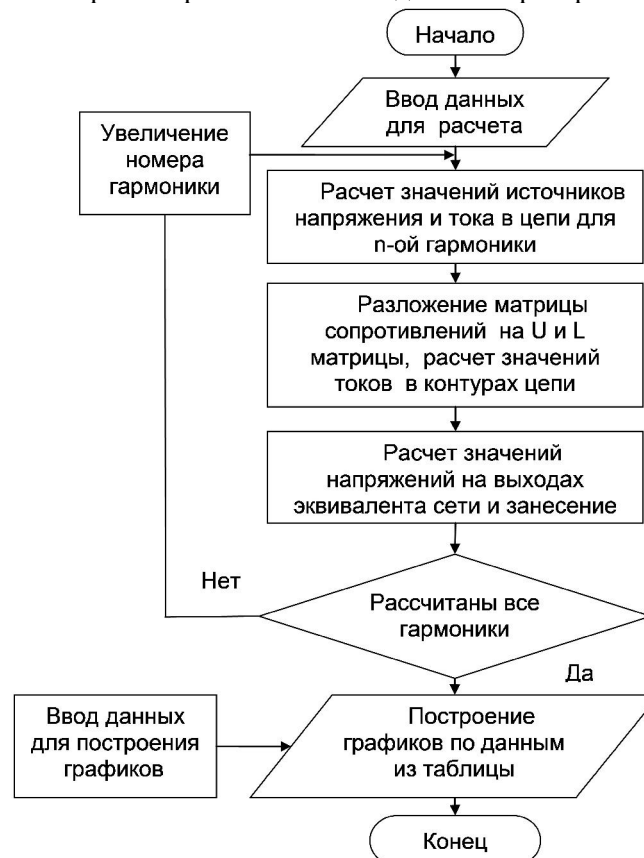


Рис. 6. Алгоритм работы программы для расчета ЭМП

Программа имеет следующие особенности:

- возможность расчета уровней помех для трех типов нагрузки: активной, активно-индуктивной и нагрузки, подключенной через  $LC$ -фильтр;

- рассчитанные кривые напряжений кондуктивных помех в диапазоне 0,15–30 МГц выводятся в отдельном окне;
- на графиках также могут быть отображены кривые, построенные по данным, взятым из файла. Например, уровни помех, полученные экспериментально, и нормы на допустимые уровни помех;
- данные для расчетов можно загрузить из файла и сохранить в файл. Кривые напряжений помех можно распечатать.

Для расчета уровней помех использована эквивалентная схема на рис. 2 и система уравнений (1). Система уравнений решена методом декомпозиции или LU-разложения, когда матрица сопротивлений представляется в виде произведения двух матриц:  $L$  – нижней треугольной матрицы и  $U$  – верхней треугольной матрицы.

Программа работает по следующему алгоритму (рис. 6): после задания данных для расчета в полях ввода основного окна программы вычисляются значения напряжений и токов в каждой ветви, затем решается система уравнений, вычисляются контурные токи и определяются напряжения на резисторах эквивалента сети. Процедура повторяется для каждой гармоники в диапазоне частот от частоты переключения до 30 МГц. Полученный массив значений передается в окно графиков и используется для построения кривых напряжений ЭМП.

### Выводы

Предлагаемое программное обеспечение позволяет быстро и с минимальными компьютерными затратами рассчитать уровень кондуктивных помех, создаваемых усилителем класса D. В программе используется упрощенный метод расчета кондуктивных ЭМП усилителя класса D. Точность математической модели усилителя класса D как источника ЭМП, на которой базируется ПО, достаточна для оценочных расчетов. Для вычислений напряжений ЭМП требуется минимальное количество данных. Данные для расчета могут быть взяты из документации или получены путем измерений. Метод обеспечивает высокую точность результатов при активной нагрузке и превышение расчетного уровня помех над измеренным при индуктивной нагрузке и при подключении нагрузки через LC-фильтр. Полученные результаты могут быть использованы при компьютерном моделировании помех, создаваемых усилителями класса D [14]. В дальнейшем представляется целесообразным развитие метода и доработка ПО для прогнозирования кондуктивных помех, создаваемых другими преобразователями постоянного напряжения, например, мостовыми.

### Список литературы

1. Radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles, boats, and on devices – Limits and methods of measurement: CISPR 25 Edition 3.0, 2008 – March, 2008.
2. Векслер Г.С. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания / Г.С. Векслер, В.С. Недочетов, В.В. Пилинский и др. – К.: Техника, 1990. – 167 с.
3. Foissac M. Compact EMC model of power electronics converter for conducted EMC studies in embedded networks / M. Foissac, J.L. Schanen, C.J. Vollaire // J. Automotive Power Electronics (2009).
4. Li H. Conducted EMI Simulation of Switched Mode Power Supply / H. Li, D. Pommerenke, W. Pan, Sh. Xu, H. Ren, F. Meng, X. Zhang // International Symposium on Electromagnetic Compatibility: IEEE Conf., 17-21 Aug. 2009: proc. of conf. – [s.l.], 2009. – P. 155–160.
5. Bishnoi H. EMI modeling of half-bridge inverter using a generalized terminal model / H. Bishnoi, A.-C. Baisden, P. Mattavelli, D. Boroyevich // Applied Power Electronics Conference and Exposition: IEEE Conf., 6-11 March 2011: proc. of conf. – [s.l.], 2011. – P. 468–474.
6. Zhao D. Hierarchical EMC Analysis Approach for Power Electronics Applications / D. Zhao, B. Ferreira, A. Roc'h, F. Leferink // Power Electronics Specialists Conference : IEEE Conf., 15–19 Jun. 2008: proc. of conf. – [s.l.], 2008. – P. 1176–1182.
7. Le Bunetel J.-Ch. Design of power supply in function of EMI assessment / J.-Ch. Le Bunetel, D. Gonzalez // International Symposium on Industrial Electronics: IEEE Conf., 4–7 Jun. 2007: proc. of conf. – [s.l.], 2007. – P. 2540–2543.
8. Gonzalez D. New simplified method for the simulation of conducted EMI generated by switched power converters / D. Gonzalez, J. Gago, J. Balcells // IEEE Trans. Industrial Electronics – Dec. 2003. – vol.50, no.6. – P. 1078–1084.

9. Espina J. EMI model of an AC/AC power converter / J. Espina, J.Balcells, A.Arias, C.Ortega, N.Berbel // Vehicle Power and Propulsion Conference: IEEE Conf., 1–3 Sept. 2010: proc. of conf. – [s.l.], 2010. – P. 1–6.
10. Qian Liu, Fei Wang, Boroyevich D. «Modular-Terminal-Behavioral (MTB) Model for Characterizing Switching Module Conducted EMI Generation in Converter Systems», Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 21, 2006, pp. 1804–1814.
11. Zheng Changbeng. A simulation platform of Switched-mode Power Supplies for EMI filter design / Changbeng Zheng, Chen Chen; Henglin Chen // Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2012 Asia-Pacific Symposium : IEEE Conf., 21-24 May 2012: proc. of conf. – [s.l.], 2012. – P. 641–644.
12. US patent US7190225B2 ‘Efficient low EMI switching output stages and methods’, 2007.
13. Ott H.W. Electromagnetic Compatibility Engineering / H.W. Ott New York: Wiley, 2009. – 872 p.
14. Onikienko Y. Simulation of Electromagnetic Environment of Class D Amplifier / Y. Onikienko, V. Pilinsky, D. Probity, V. Shvaychenko // Electronics and Nanotechnology (ELNANO): IEEE Conf., 16–19 April 2013 : proc. of conf. – [s.l.], 2013. – P. 396–398.

*Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут»  
Статья поступила 19.12.2013.*

*Onikienko Y., Pilinsky V., Shvaychenko V.*

#### **Conductive Interference Prediction of Class D Amplifier**

Paper presents a software for class D amplifier conductive electromagnetic interferences (EMI) calculations. The method of EMI sources and pathways analysis is used in the program. The method based on the equivalent circuit which contains EMI voltages and currents sources, impedances of elements, impedances of disturbances pathways and electromagnetic interferences receptors in the form of Line Impedance Stabilization Network (LISN) resistors. Data for the calculation (amplitude, period, duty ratio, rise-fall time) can be taken from the documentation or obtained by measurements. The software has a convenient user-friendly interface and ensures sufficient accuracy for the estimating calculation.

**Keywords: Class D Amplifier, Electromagnetic Compatibility, EMI modeling, EMI simulation Software**

*National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute»*