

УДК 621.314: 621.391

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

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Кафедра ЗТиРИ, ФЭЛ, НТУУ «КПИ», г. Киев, Украина, E-mail: pww@ukr.net

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ УСИЛИТЕЛЯ КЛАССА D

Предложена эквивалентная схема усилителя класса D с элементами, обуславливающими создание и распространение кондуктивные помехи. Предложен простой метод получения параметров усилителя для компьютерного моделирования. Выполнено компьютерное моделирование усилителя класса D, содержащего паразитные элементы и подключенного к эквиваленту сети. В компьютерной модели учтены функциональные особенности исследуемого усилителя. Выполнено

сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными измерений помех. Результаты моделирования в целом соответствуют экспериментальным данным.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, усилитель класса D, электромагнитная совместимость.

Запропонована еквівалентна схема підсилювача класу D з елементами, обумовлюючими створення і поширення кондуктивних переходи. Запропонований простий метод здобуття параметрів підсилювача для комп'ютерного моделювання. Виконано комп'ютерне моделювання підсилювача класу D, що містить паразитні елементи і підключеного до еквіваленту мережі. У комп'ютерній моделі враховані функціональні особливості досліджуваного підсилювача. Виконано комп'ютерне моделювання підсилювача класу D, що містить паразитні елементи і підключеного до еквіваленту мережі. У комп'ютерній моделі враховані функціональні особливості досліджуваного підсилювача. Виконано порівняння результатів моделювання з експериментальними даними вимірів перехід. Результати моделювання в цілому відповідають експериментальним даним.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, підсилювач класу D, електромагнітна сумісність.

Введение

Современные усилители мощности класса D по своим акустическим и энергетическим характеристикам успешно конкурируют с линейными усилителями классов A и AB [1]. Ключевой режим работы усилителей класса D обеспечивает наибольшую энергоэффективность, но имеет существенный недостаток: значительный уровень электромагнитных помех (ЭМП), которые распространяются как по гальваническим цепям, так и в виде электромагнитной эмиссии [2].

Обеспечение соответствия усилителей класса D требованиям стандартов в области электромагнитной совместимости может быть достигнуто комплексным применением различных средств помехоподавления. Краткий обзор источников ЭМП и методов их подавления для усилителей класса D приведен в [3]. Возникновение и распространение ЭМП в усилителях класса D обусловлено импульсным режимом работы. На уровень ЭМП, генерируемых усилителями класса D также влияют факторы, связанные с модуляцией усиливаемого сигнала.

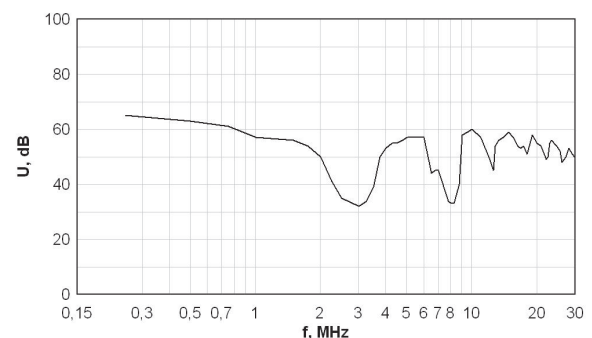
Анализу кондуктивных ЭМП, создаваемых усилителями класса D, посвящены работы [4, 5]. В статье [4] изложены результаты исследований интегрального усилителя в корпусе TQFP. Результаты расчетов практически совпадают с результатами измерений, особенно на низких и средних частотах, но оценка напряжений ЭМП проводилась только для выходного сигнала. В работе [5] использован метод представления пассивных компонентов (выходных фильтров и громкоговорителя) в виде матриц импеданса с последующим их объединением в одну и анализом выходных токов усилителя класса D. Данный метод тоже обладает высокой точностью, но требует измерения импеданса пассивных элементов с помощью дорогостоящего оборудования. Анализ кондуктивных помех, создаваемых интегральными усилителями класса D по цепям питания затруднен также тем, что в выходных каскадах таких усилителей часто используются специальные внутрисистемные средства для снижения уровня генерируемых помех [6, 7]. В статье [8] впервые предпринята попытка компьютерного анализа напряжений ЭМП усилителя класса D, измеренных селективным микровольтметром на выходе эквивалента сети в соответствии со стандартом CISPR 25 (для автомобильной электроники).

Целью данной статьи является разработка схемной модели усилителя класса D с паразитными параметрами компонентов (конденсаторов, транзисторов и др.), проводов и монтажа для анализа источников и путей распространения ЭМП. Для этого необходимо решить такие задачи - уточнить модель усилителя класса D с паразитными элементами для оценки уровней ЭМП; на ее основе выполнить моделирование уровней помех усилителя класса D, подключенного к эквиваленту сети; сравнить результаты моделирования с экспериментальными данными измерений помех.

Постановка задачи и определение условий компьютерного моделирования

Компьютерное моделирование усилителя класса D с учетом паразитных параметров может быть использовано для прогнозирования уровня генерируемых ЭМП на этапе разработки. Моделирование ЭМП усилителей класса D представляется полезным инструментом и позволяет упростить и удешевить процесс обеспечения ЭМС при производстве и отладке.

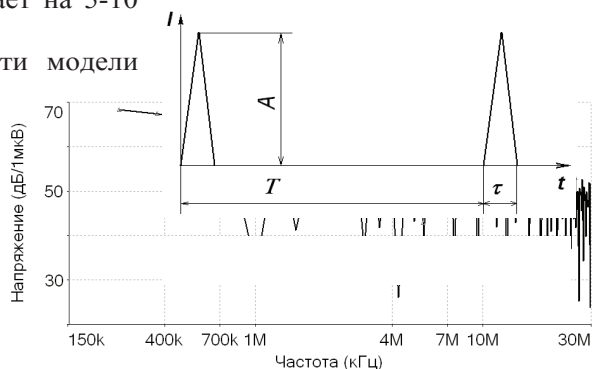
В настоящей статье предложено уточнение эквивалентной схемы и модели усилителя, подключенного к эквиваленту сети, рассмотренных в [8].



В качестве исходных данных для компьютерного анализа уровней ЭМП в различных условиях работы усилителя использовались результаты измерений, выполненных ранее [9]. На основании экспериментальных данных установлено, что уровень ЭМП усилителя класса D снижается при наличии входного сигнала, но мало зависит от коэффициента нелинейных искажений. Повышение частоты усиливаемого сигнала снижает на 5-10 дБ уровень ЭМП в области частот до 2МГц.

Таким образом, для оценки эффективности модели выбраны два режима: режим молчания (отсутствия входного сигнала) и режим выходной мощности, равной одной трети номинальной. Во втором случае частота усиливаемого сигнала выбиралась достаточно высокой (10 кГц) для уменьшения количества рассчитываемых гармоник и сокращения времени вычислений и требующей производительности компьютера. Для компьютерного анализа выбран усилитель на основе интегральной схемы ТРА3100D2.

В модели учтено то, что уровень помех усилителя класса D в интегральном исполнении определяется не только токами, протекающими по цепи «выходной транзистор-нагрузка», но и по цепям заряда накопительных конденсаторов (bootstrap capacitors), формирующих для этих транзисторов управляющие напряжения. Также принято во внимание то, что в усилителе введены небольшие «сквозные» токи для снижения помех и нелинейных искажений. В связи с этим проведены измерения уровня ЭМП усилителя класса D без нагрузки. Кривые напряжений помех усилителя класса D с отключенными выходными цепями приведены на рис. 1.



Измерение тока потребления усилителя с помощью датчика тока показало, что наибольший вклад в уровень ЭМП данного усилителя без нагрузки вносят «сквозные» токи и токи заряда накопительных конденсаторов. Длительность этих токов составляет порядка десятка наносекунд, при периоде следования 4 микросекунды.

Форму импульсов тока можно аппроксимировать треугольными импульсами, представленными на рис. 2.

Математически последовательность таких импульсов и ее спектр можно описать зависимостями вида [10]:

$$I(t) = A \frac{t}{\tau} \text{rect}\left(\frac{t - \tau/2}{\tau}\right) + A \left(t - \frac{\tau}{2}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau/2}{\tau}\right) \quad (1)$$

$$I(\omega) = A\tau \frac{\sin\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)}{\frac{\omega\tau}{2}}, \quad \text{где} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

По результатам анализа формы и параметров импульсов тока в программе «Multisim» смоделирован источник помех усилителя класса D без нагрузки, спектр которого представлен на рис. 3. Этот источник добавлен в уточненную модель. Производители характеристики переключения выходных транзисторов (длительности фронта и длительности спада выходного

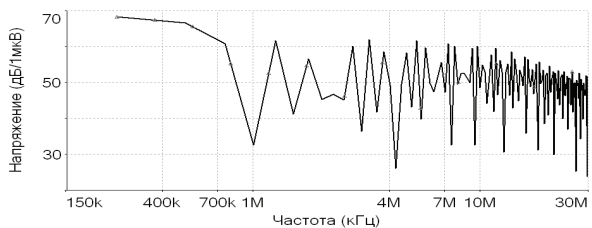


Рис.3

напряжения). Эти параметры измерены с помощью двух резисторов с минимальной индуктивностью, подключенных между выходом усилителя и полюсами питания. Таким же способом измерены сопротивления сток-исток выходных транзисторов. Измерения проводились при значениях сопротивлений резисторов, равных номинальному сопротивлению нагрузки. Схема измерения параметров выходного каскада усилителя класса D при активной нагрузке представлена на рис.4. В результате измерений получены следующие параметры выходного каскада:

Это рис.3 и

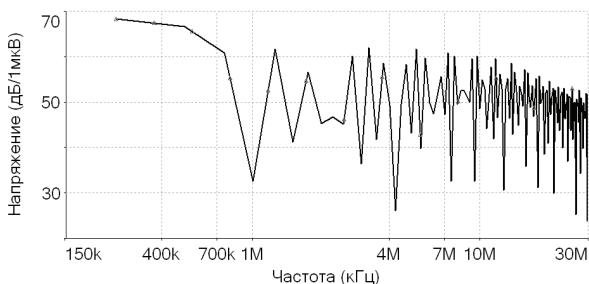
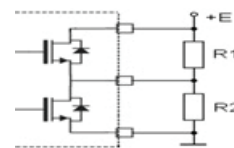


рис.4



время спада выходного напряжения 120 нс, сопротивление сток-исток транзисторов 0,18 Ом.

Эквивалентная схема усилителя класса D с учетом паразитных параметров.

Эквивалентная схема усилителя класса D для анализа ЭМП представлена на рис. 5.

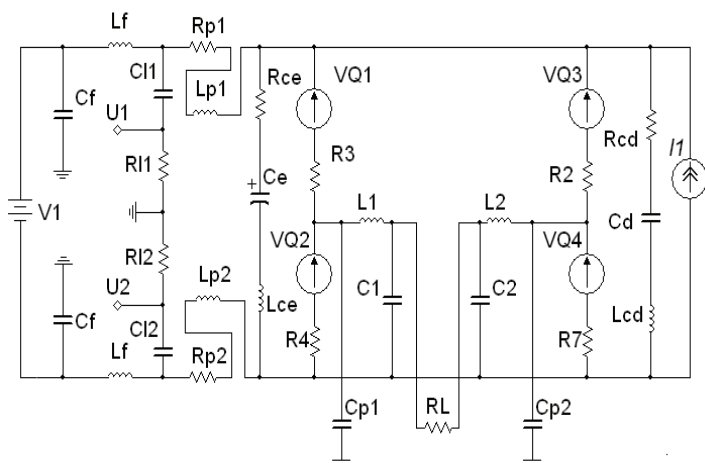


Рис. 5

C_d и электролитический C_e конденсаторы отображены на схеме со своими паразитными параметрами: дросселями L_{ce} , L_{cd} (индуктивность выводов) и резисторами R_{ce} , R_{cd} (внутреннее сопротивление) соответственно. Паразитными элементами являются конденсаторы C_{p1} и C_{p2} – это емкости между выходами усилителя и «землей».

Уточненная модель усилителя класса D с учетом паразитных параметров

Предложенная модель усилителя подключенного к V-образному эквиваленту сети приведена на рис. 6.

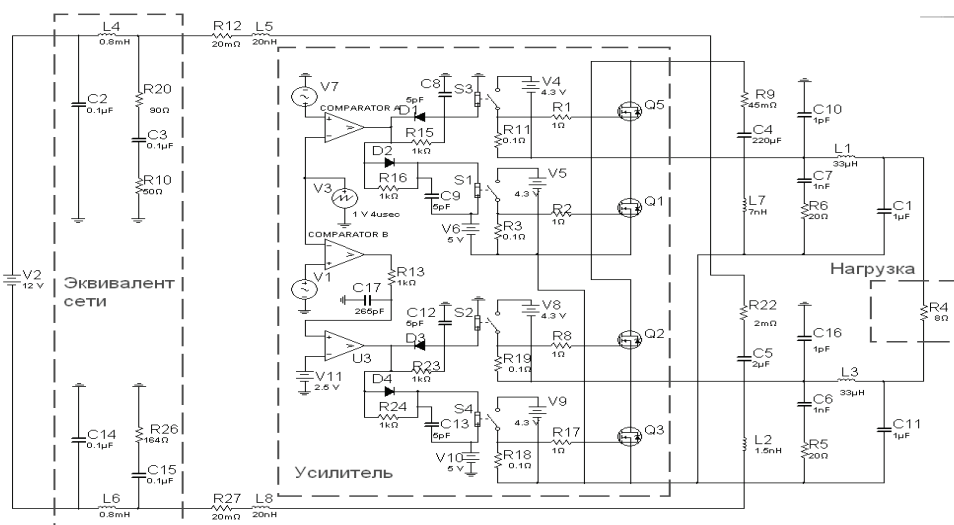


Рис. 6

Модель разрабатывалась в среде Multisim 11. В данной модели учтены паразитные параметры блокирующего и электролитического конденсаторов, индуктивность и сопротивление проводов. Характеристики переключения транзисторов выбраны равными измеренным. Кроме того, в модели реализован режим пониженного выходного тока при отсутствии сигнала, предусмотренный в микросхеме ТРА3100D2 [6].

На рис. 7 и рис. 8 представлены полученные в результате моделирования кривые напряжений электромагнитных помех на выходе эквивалента сети. На рис. 7 кривые соответствуют режиму без сигнала на входе усилителя. На рис. 8 кривые соответствует режиму мощности на выходе усилителя равна 6,5 Вт.

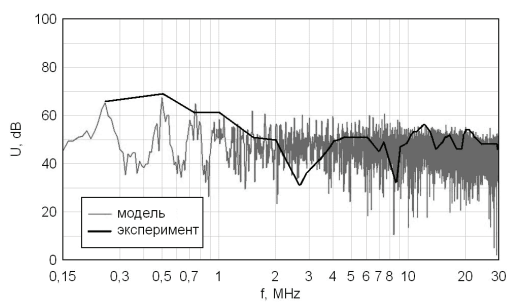


Рис. 7

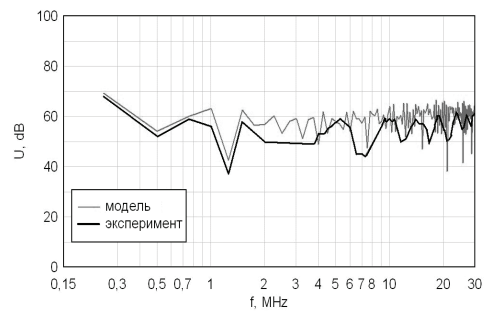


Рис. 8

Анализ зависимостей показывает, что на частотах свыше 4 МГц уровень помех ниже для режима усиления сигнала на некоторых частотах до 6...8 дБ, чем в режиме без сигнала. Кривые, полученные в результате моделирования, отличаются от экспериментальных в среднем не более чем на 8...10 дБ. Это подтверждает обоснованность выбора параметров для данной модели.

Выводы

Предложена эквивалентная схема усилителя класса D, которая содержит элементы, влияющие на создание и распространение кондуктивных помех. Для компьютерного моделирования разработана схемная модель усилителя класса D, содержащая паразитные элементы. Частотные зависимости расчетных и экспериментальных кривых в целом совпадают. В дальнейшем количество параметров, влияющих на уровень ЭМП, будет увеличено, что должно повысить точность моделирования. Это позволит выполнять прогноз электромагнитной обстановки и для других типов усилителей класса D в микросхемном исполнении.

Список литературы

1. *Karsten Nielsen* "A novel Audio Power Amplifier Topology with High Efficiency and State-of-the-art performance". 109th AES Convention, Los Angeles, USA, – 22– 25 September 2000
2. Интернет-ресурс www.analog.com/-library/analogDialogue/archives/40-06/class_d.pdf Analog Dialogue 40-06, June (2006). Class D Audio Amplifiers: What, Why, and How. By Eric Gaalaas
3. *Оникиенко Ю. А., Пилинский В. В., Швайченко В. Б.* Особенности обеспечения электромагнитной совместимости усилителей мощности класса D/ Технічна електродинаміка. Тем.вип. Силова електроніка і енергоефективність. 2011, Ч.1 – С.39–42.
4. *S. E. Adami, R. Mrad, F. Morel, C. Vollaire, G. Pillonnet, R. Cellier,* "Conducted EMI of Integrated Switching Audio Amplifier for Mobile Phone Applications", EMC Compo, nov. 2011
5. *R. Mrad, F. Morel, G. Pillonnet, C. Vollaire, A. Nagari,* "Conducted EMI Prediction for Integrated Class D Audio Amplifier", ICECS, dec. 2011
6. Патент США US6614297 'Modulation scheme for filterless switching amplifiers with reduced EMI', 2001
7. Патент США US6847257 'Efficient minimum pulse spread spectrum modulation for filterless class D amplifiers', 2005
8. *Y. Onikienko, V. Pilinsky, D. Probity, V. Shvaychenko,* "Simulation of Electromagnetic Environment of Class D Amplifier," ELNANO'2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference
9. *Оникиенко Ю.А., Пилинский В.В., Швайченко В.Б.* Анализ влияния параметров источника питания и входного сигнала на уровень кондуктивных помех усилителя класса D/ Технічна електродинаміка. Тем.вип. Силова електроніка і енергоефективність. 2012, Ч.1 – С.70–74.
10. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания/ *Г.С. Векслер, В.С. Недочетов, В.В. Пилинский* и др. – К.: Техніка, 1990. – 167 с.

SIMULATION OF CLASS D AMPLIFIER CONDUCTED INTERFERENCES

Y. Onikienko, V. Pilinsky, V. Shvaichenko

Audio Engineering and Registration of Information Department, Faculty of Electronics
NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine, E-mail: pww@ukr.net

The equivalent circuit of class D amplifier with elements that create and distribute conducted electromagnetic interferences is suggested. SPICE simulation of class D amplifier with parasitic parameters connected to LISN have been realized. The simple method to obtain the parameters of the amplifier are

used. Functional features of the integrated amplifier are incorporated into the simulation model. The results of computer simulation of the interferences measuring are confirmed by experimental data.

Key words: class D amplifiers, electromagnetic compatibility, EMI simulation.

1. Karsten Nielsen "A novel Audio Power Amplifier Topology with High Efficiency and State-of-the-art performance". 109th AES Convention, Los Angeles, USA, – 22 – 25 September 2000
2. www.analog.com/-library/analogDialogue/archives/40-06/class_d.pdf Analog Dialogue 40-06, June (2006). Class D Audio Amplifiers: What, Why, and How. By Eric Gaalaas
3. Onikienko Y., Pilinsky V., Shvaychenko V. "Features of Electromagnetic Compatibility of Class D Power Amplifiers"/ Tekhnichna elektrodynamika. Special Issue. Power Electronics and Energy Efficiency. 2011, Pt.1 – P.39–42. (Rus).
4. S. E. Adami, R. Mrad, F. Morel, C. Vollaire, G. Pillonnet, R. Cellier, "Conducted EMI of Integrated Switching Audio Amplifier for Mobile Phone Applications", EMC Compo, nov. 2011
5. R. Mrad, F. Morel, G. Pillonnet, C. Vollaire, A. Nagari, "Conducted EMI Prediction for Integrated Class D Audio Amplifier", ICECS, dec. 2011
6. US patent US6614297 'Modulation scheme for filterless switching amplifiers with reduced EMI', 2001
7. US patent US6847257 'Efficient minimum pulse spread spectrum modulation for filterless class D amplifiers', 2005
8. Y. Onikienko, V. Pilinsky, D. Probity, V. Shvaychenko, "Simulation of Electromagnetic Environment of Class D Amplifier," ELNANO'2013, IEEE XXXIII International Scientific Conference, 2013
9. Onikienko Y., Pilinsky V., Shvaychenko V. "Analysis of the Influence of the Power Supply and Input Signal Parameters on the Level of the Conducted Emissions of the Class D Amplifier" / Tekhnichna elektrodynamika. Special Issue. Power Electronics and Energy Efficiency. 2012, Pt.1 – P.70–74. (Rus.).
10. The Suppression of Electromagnetic Interference in the Power Supply Circuits / G.S.Veksler, V.S.Nedochotov, V.V. Pilinsky etc. – Kyiv: Tekhnika, 1990. – 167 p. (Rus.).