

МОДИФИЦІРОВАНА МОДЕЛЬ BUTTERWORTH-VAN-DYKE (MBVD) ДЛЯ АНАЛІЗА НЕЛИНЕЙНИХ СВОЙСТВ РЕЗОНАТОРОВ НА ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Лучанинов А.И., Булага В.А.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, кафедра компьютерной радиоинженерии и систем технической защиты информации, Украина.

E-mail: anatoly.luchaninov@nure.ua

Abstract

The report describes a modification of the resonators model based on Bulk Acoustic Waves (BAW), designed to analyze the nonlinear properties of filters based on them. The nonlinear properties of the resonator are modeled by two controlled current sources included in the linear resonator model, for which the modified Butterworth-Van-Dyke (MBVD) model is used. The proposed model allows to use the standard CADs software for analyzing the nonlinear properties of complex structures devices, such as filters. The model is verified by comparing the simulation results with the experimental and theoretical results of other authors. As an example of this model, the results of BAW filters analysis of the ladder structure are presented.

Введение

В настоящее время наблюдается интенсивное внедрение устройств, в частности фильтров и дуплексоров, на объемных акустических волнах (ОАВ), имеющих хорошие характеристики избирательности в диапазоне вплоть до нескольких ГГц. Требования, предъявляемые к этим устройствам становятся все более жесткими. Одним из важнейших требований является уровень интермодуляционных искажений, который в ряде случаев ограничивает область применения подобных устройств в современных устройствах связи. При проектировании фильтров широко используется процедура оптимизации. Для оптимизации конструкции ОАВ фильтров требуются адекватные модели, которые позволяют достаточно корректно определить отклик резонатора ОАВ (РОАВ) в достаточно широком диапазоне частот. Если модель, используемая для анализа РОАВ, является достаточно точной и может предсказывать свойства, присущие таким устройствам, в том числе и нелинейные [1-4], то на этапе оптимизации имеется возможность получить требуемые частотные характеристики проектируемого устройства.

Модифицированная нелинейная модель РОАВ

Анализ литературных источников показывает, что корректный анализ нелинейных свойств фильтров на РОАВ возможен только на основе комплексного использования методов электродинамического и схмотехнического моделирования [3]. Следует учесть, что нелинейные характеристики устройства определяются путем схмотехнического моделирования. При этом электродинамическая структура устройства и РОАВ выступают в виде компонентов схемы, модели которых должны быть заранее известны. Модель электродинамической структуры обычно определяется на этапе электродинамического моделирования. Для исследования нелинейных свойств РОАВ используются несколько типов моделей. Наиболее часто подобные исследования базируются либо на модифицированной модели Butterworth-Van-Dyke (MBVD) (см. например, [5-8]), либо на физической модели Мэсона (см. например, [9-13]) или их модификациях. Каждая модель имеет свою область применимости. В процессе проектирования и разработки РОАВ и фильтров на них зачастую эти модели используются на различных этапах проектирования и взаимно дополняют друг друга. Модели MBVD и Мэсона являются более эффективными с вычислительной точки зрения, и широко используются при оптимизации фильтров. Однако эквивалентные схемы на основе модифицированной MBVD модели и модель Мэсона не всегда удовлетворя-

ють требуемой точности при моделировании нелинейных характеристик РОАВ и поэтому постоянно появляются работы по их усовершенствованию.

В настоящей работе изложены результаты исследования возможности применения MBVD модели для прогнозирования нелинейных характеристик РОАВ с целью последующего использования их при синтезе и проектировании фильтров произвольной топологии.

Схемотехническая реализация линейной модели MBVD показана на рис. 1 [1]. Здесь C_0 - статическая или межэлектродная емкость, R_m - кинетическое сопротивление (акустические потери), L_m - кинетическая индуктивность, C_m - кинетическая емкость, R_s - сопротивление паразитных потерь электродов, R_0 - сопротивление паразитных акустических потерь. При анализе нелинейных характеристик РОАВ обычно полагается [1, 5-7], что один или несколько из элементов C_m , L_m или R_m являются элементами с нелинейными характеристиками. Результаты моделирования показывают,

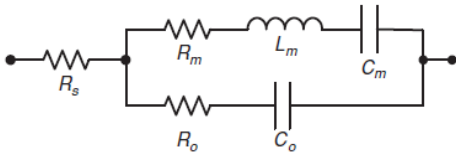


Рис. 1. Эквивалентная схема MBVD модели РОАВ

что такая нелинейная модель не позволяет достаточно корректно прогнозировать нелинейные характеристики РОАВ в диапазоне частот. Кроме этого, еще одним из недостатков данной модели является большое количество параметров, подлежащих идентификации, что делает данную процедуру довольно трудоемкой. Учитывая это можно сформулировать требования, которым должна удовлетворять нелинейная модель MBVD резонатора – во-первых, иметь минимальное количество настраиваемых параметров, во-вторых, желательно, чтобы каждый из этих параметров, по возможности, влиял только на одну из рассматриваемых нелинейных характеристик резонатора. В некоторой мере удовлетворить поставленным требованиям может модель, в которой:

- значения нелинейных токов зависят не от параметров нелинейных элементов, а от параметров их линейной части;

- образовавшиеся из-за нелинейности токи гармоник (или комбинационных составляющих) должны суммироваться с током основной частоты непосредственно в нагрузке резонатора.

Схемотехническая реализация подобной модели в пакете AWRDE показана на рис. 2. Как видно, нелинейные свойства моделируются двумя управляемыми источниками нелинейного тока VC1 и VC2,

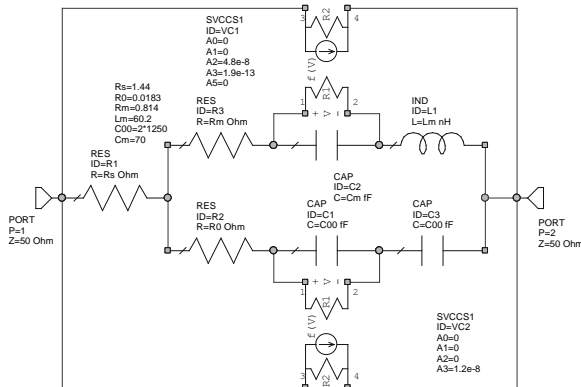


Рис. 2. Эквивалентная схема нелинейной модели РОАВ с управляемыми источниками тока

включенными непосредственно к выходным клеммам резонатора. В качестве таких источников использованы управляемые источники SPICE, в которых ток источника $I(V)$ имеет полиномиальную зависимость от управляемого параметра. В управляемых источниках SPICE (элемент SVCCS1 в пакете AWRDE) зависимость управляемого параметра от управляющего описывается полиномами, определенными во временной области, то есть описывают зависимость между мгновенными значениями управляющего и управляемого параметрами, следовательно, корректно описывают такой нелинейный эффект, как образование новых спектральных составляющих в отклике устройства. Поэтому в нелинейной модели MBVD использован именно данный тип управляемых источников.

Результаты моделирования

Для верификации модели были с использованием пакета AWRDE [14] было проведено моделирование нелинейных характеристик конкретных типов РОАВ и сравнение их с результатами экспериментальных измерений. Предполагалось, что источниками нелинейного тока являются только квадратичная и кубическая нелинейности. В результате этого в модели имеется только четыре настраиваемых параметра. Основная цель - показать, что предложенная модифицированная нелинейная модель с источниками тока управляемыми напряжениями (НМИТУН), позволяет корректно описать основные нели-

нейные характеристики устройств такого типа, а также пригодна для прогнозирования нелинейных свойств устройств более сложной топологии.

На рис. 3 приведены результаты расчета частотных зависимостей мощности второй $P(2f)$ и третьей $P(3f)$ гармоник для различных нелинейных моделей РОАВ.

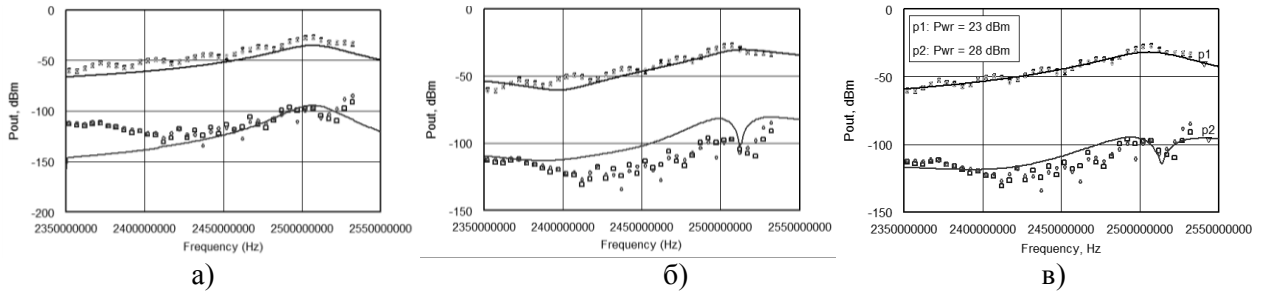


Рис. 3. Частотные зависимости мощности второй и третьей гармоник вычисленные для различных моделей РОАВ: (а) – модель MBVD, нелинейная емкость C_m ; (б) – модель MBVD, нелинейные элементы C_m, L_m и R_m ; (в) – предлагаемая модель

На графиках сплошными линиями обозначены мощности второй и третьей гармоник, вычисленные по результатам моделирования, а точками – результаты экспериментальных измерений. Сравнение полученных результатов показывает, что модифицированная нелинейная модель с управляемыми источниками тока обеспечивает более корректное (рис. 3,б) моделирование нелинейных свойств РОАВ.

Исследовались также нелинейные характеристики Г-образного звена фильтра на РОАВ. С этой целью были выбраны параметры звена, исследования которого приведены в работе [2]. Для удобства сравнения результатов ниже использованы обозначения работы [2]. Авторами [2] исследовалось звено с центральной частотой $f_0 = 1.95$ ГГц и шириной полосы пропускания $2\Delta f = 80$ МГц ($2\Delta f / f_0 \approx 4\%$). Нами исследовались характеристики звена с центральной частотой $f_0 = 2.45$ ГГц и шириной полосы пропускания - $2\Delta f \approx 100$ МГц ($2\Delta f / f_0 \approx 4\%$).

Расчитанные частотные зависимости напряжения второй гармоники $V_2^{(2a)}$, при мощности входного сигнала 26 дБм, полученные в [2] приведены на рис. 4,а.

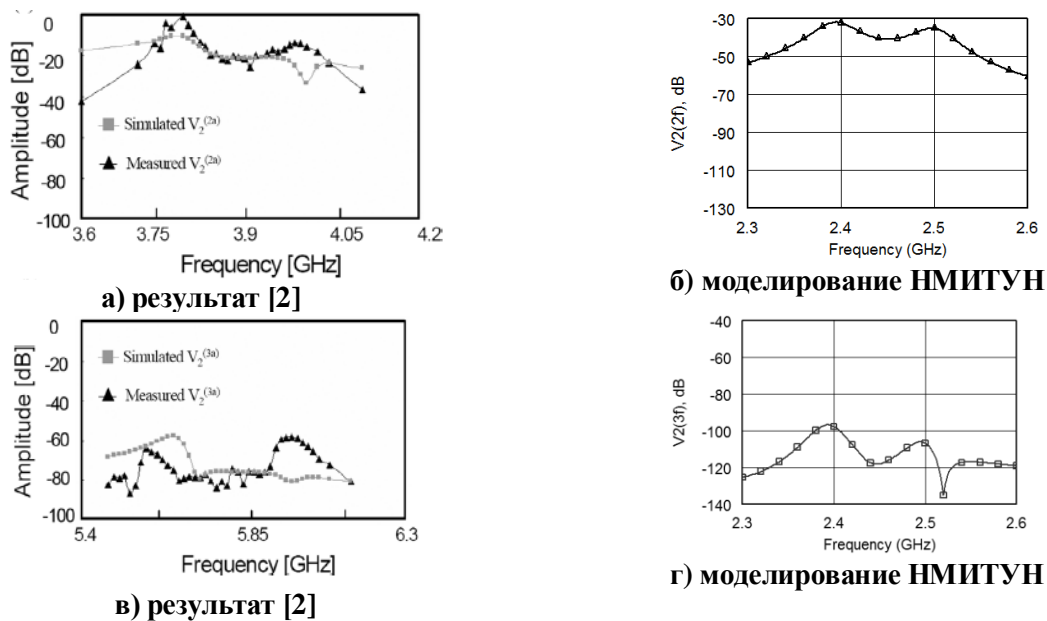


Рис. 4. Частотные зависимости напряжений второй и третьей гармоник в нагрузке BAW фильтра: а), б) - вторая гармоника; в), г) - третья гармоника

В соответствии с моделью [2], согласно которой величина нелинейного продукта управляется величиной линейной составляющей тока через резонатор, $V_2^{(2a)}$ велико вблизи частоты последовательного резонанса, когда линейный ток через этот резонатор становится большим. В то же время $V_2^{(2a)}$ мало вблизи частоты параллельного резонанса, так как в этом случае линейный ток через этот резонатор становится малым. На рис. 4,а показан также результат экспериментальных измерений. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными в полосе пропускания звена. Однако, вблизи частоты параллельного резонанса (вблизи частоты ~ 4 ГГц) поведение экспериментальной и полученной в [2] теоретической частотных зависимостей $V_2^{(2a)}$ качественно отличается. В тоже время, поведение частотной зависимости $V_2^{(2a)}$, рассчитанной по НМИТУН (см. рис. 4,б), более корректно описывает поведение зависимости, полученной в [2] экспериментально. Различие заключается в уровне напряжения второй гармоники, что, объясняется различными резонаторами фильтров, технологией их изготовления и т.п.. Теоретически также был оценен уровень третьей гармоники $V_2^{(3a)}$ и результат (рис. 4,г) сравнивался с теоретическим и экспериментальными результатами работы [2] (рис. 4,в). Сравнивая зависимости рис. 4,г и рис. 4,в можно видеть, что поведение зависимости $V_2^{(3a)}(f_a)$, рассчитанной по НМИТУН, более адекватно описывает поведение экспериментальной зависимости, приведенной в [2], чем теоретические результаты, полученные авторами цитируемой работы. Различие, также, как и для второй гармоники, заключается в уровне напряжения третьей гармоники $V_2^{(3a)}$.

Литература:

1. Ueda M., Iwaki M., Nishihara T., Satoh Y., Hashimoto K. Investigation on Nonlinear Distortion of Acoustic Devices for Radio-Frequency Applications and Its Suppression // 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings. P. 876-879.
2. Ueda M., Iwaki M., Nishihara T., Satoh Y., Hashimoto K. A Circuit Model for Nonlinear Simulation of Radio-Frequency Filters Using Bulk Acoustic Wave Resonators // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2008. Vol. 55. No. 4. P. 849-856.
3. Tag A., Chauhan V., Huck C., Bader B., Karolewski D., Pitschi F.M., Weigel R., Hagelauer A. A Method for Accurate Modeling of BAW Filters at High Power Levels // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2016. Vol. 63. No. 12. P. 2207-2214.
4. Tag A., Chauhan V., Weigel R., Hagelauer A. Bader B., Huck C., Pitschi F.M., Karolewski D. Multiphysics Modeling of BAW Filters // 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings. P. 1-4.
5. Segovia-Fernandez J., Tazzoli A., Rinaldi M., Piazza G. Nonlinear lumped electrical model for contour mode AlN resonators // IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). 2011. P. 1846-1849.
6. Gheorghe A.-G., Constantinescu F., Stroe G., Nitescu M., Llopis O. Behavioral Models for the Anti-series and Anti-parallel Connections of two Power BAW Resonators // 2012 Sixth UKSim/AMSS European Symposium on Computer Modeling and Simulation. P. 401-405.
7. Constantinescu F., Taus O., Gheorghe A.-G. A New Behavioral Model for Frequency Domain Analysis of Power BAW Filters // 2015 13th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES). P. 1-4.
8. Yang Q., Pang W., Zhang D., Zhang H. A Modified Lattice Configuration Design for Compact Wideband Bulk Acoustic Wave Filter Applications // Micromachines 2016. 7, 133. P. 1-11.
9. Feld D.A. One-Parameter Nonlinear Mason Model for Predicting 2nd & 3rd Order Nonlinearities in BAW Devices // 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings. P. 1082-1087.
10. Feld D.A., Shim D.S. Determination of the Nonlinear Physical Constants in a Piezoelectric AlN Film // 2010 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings. P. 277-282.
11. Rocas E., Collado C., Padilla A., Mateu J., O'Callaghan M. Nonlinear distributed model for IMD prediction in BAW resonators // 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings. P. 1557-1560.
12. Collado C., Rocas E., Verdú J., Mateu J., Hueltes A., Aigner R. A Lateral Modes Model for BAW Resonators // 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings. P. 1497-1500.
13. Rocas E., Mateu J., Collado C., Hueltes A., Verdu J., Billard C., David J.-B., Reinhardt A. Nonlinear Performance of BAW Filters Including BST Capacitors // Radioengineering. 2014. Vol. 23. No. 1. P. 369-374.
14. NI AWR Design Environment [Электронный ресурс] // National Instruments, 2017. Режим доступа: <https://www.awrcorp.com/products/ni-awr-design-environment/microwave-office-software>.