

Стохастическая оптимизация RLC-модели вывода корпуса с целью увеличения ее достоверности на высоких частотах

Е.Н. Белов, А.В. Швец

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия
АО «ПКК Миландр», г. Москва, Россия*

Belov.e@milandr.ru

Матрица рассеивания многополюсника (или S -параметры) широко используется для описания электрических схем в виде черного ящика. Применение S -параметров позволяет охарактеризовать схему в любом частотном диапазоне. Однако стандартные симуляторы электрических цепей не работают с S -параметрами. Кроме того, чем больше выводов у схемы и чем больший частотный диапазон требуется охарактеризовать, тем большего размера матрицу приходится решать. В работе рассмотрена классическая модель вывода корпуса на основе собственной емкости, индуктивности и емкости связи между соседними выводами, которую можно построить на основе имеющихся S -параметров. Однако в данной модели нельзя учесть ВЧ- и СВЧ-эффекты, поэтому она имеет низкую точность на высоких частотах. Приведен метод оптимизации классической модели на основе стохастического алгоритма оптимизации с целью достижения большей точности модели на высоких частотах. Применение данной оптимизации позволяет повысить точность модели на высоких частотах более чем в 3 раза по сравнению с классической RLC-моделью.

Ключевые слова: линия передачи RLGC; S -параметры; стохастическая оптимизация; Spectre; функция штрафа; импеданс

Для цитирования: Белов Е.Н., Швец А.В. Стохастическая оптимизация RLC-модели вывода корпуса с целью увеличения ее достоверности на высоких частотах // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 4. С. 320–329. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-320-329

Stochastic Optimization of RLC-Model of IC Package Pin to Increase Its Veracity at High Frequencies

E.N. Belov, A.V. Shvets

*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
JSC «ICC Milandr», Moscow, Russia*

Belov.e@milandr.ru

Abstract: The scattering matrix of a multipole switch or the matrix of S-parameters is widely used to describe the electrical circuits in the form of a black box. The application of S-parameters permits to characterize the circuit in any frequency range. However, the standard simulators of electric circuits do not work with S-parameters. In addition, with the increase of the number circuit's pins and the working frequency range, the complexity of the matrix grows in times. The classical IC package pin's model based on self-capacitance, inductance and capacitance of the connection between the adjacent terminals, which can be constructed from the existing S-parameters, has been considered in this work. As a result it is impossible to take into account the RF and microwave effects. In this model it is characterized by low accuracy at high frequencies. The method of the classical model optimization, based on the stochastic optimization algorithm with the purpose to achieve higher accuracy of the model, has been presented. The application of this optimization allows a more than 3 times increase of the model accuracy compared with the classical RLC-model.

Keywords: transmission line RLGC; scattering parameters; stochastic optimization; Spectre; fitness function; impedance

For citation: Belov E.N., Shvets A.V. Stochastic optimization of RLC-model of IC package pin to increase its veracity at high frequencies. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 320–329. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-320-329

Введение. При уменьшении размеров кристаллов и увеличении их рабочих частот начинают проявляться негативные эффекты, связанные с целостностью сигнала, например перекрестные помехи, резонансы, вызываемые одновременным переключением цифровых блоков, шумы и др. Эти эффекты усложняют процесс разработки внутрикристалльной топологии высокочастотных микросхем, требования к корпусам микросхемы, а также разводке печатной платы. И если плата является конечным продуктом либо функциональным узлом системы, то один и тот же корпус можно использовать для корпусирования разных микросхем. Разработка схемотехники с учетом параметров используемого корпуса позволяет экономить на создании нового корпуса и минимизировать его негативное влияние на работу микросхем. Отсюда возникают две задачи: 1) выбор эквивалентной схемы корпуса и создание модели для симуляции, которая будет учитывать параметры корпуса; 2) определение параметров модели в широком диапазоне рабочих частот, в том числе частот предполагаемой микросхемы.

В настоящей работе рассматривается алгоритм оптимизации стохастическим методом классической модели, использующей понятия собственной емкости вывода индуктивности проводника и емкости связи с целью достижения большего соответствия модели исследуемому корпусу с минимальным повышением ее вычислительной сложности.

Построение модели корпуса для программы моделирования электрических цепей. В работах [1, 2] проведено исследование корпуса для определения параметров его межсоединений. В работе [3] исследованы межсоединения корпуса и их влияние на качество передачи сигнала на уровне печатной платы. Процесс подготовки модели корпуса для схемотехнического редактора условно делится на два больших этапа:

1) получение матрицы S -параметров выводов корпуса расчетным методом или путем измерения реального прибора. Желательно провести и расчет, и измерения, чтобы результаты, полученные двумя независимыми методами, подтверждали и дополняли друг друга;

2) выбор соответствующей модели межсоединений, в которой будут учитываться внутренние проводники корпуса, проволока классической технологии разварки кристаллов или элементы разварки технологии flip-chip, а также внешние проводники, с помощью которых микросхема крепится к плате; преобразование полученной на первом этапе матрицы S -параметров, т.е. матрицы комплексных чисел размера $2N \times 2N$, где N – количество выводов корпуса, для каждого значения частоты к параметрам используемой для симуляции модели. При этом следует учитывать, что каждому значению частоты матрицы S -параметров будут соответствовать свои значения емкостей, индуктивностей и сопротивлений модели.

В настоящей работе для экстракции параметров корпуса проводится трехмерное электромагнитное моделирование в частотной области. Трехмерная модель корпуса строится на основе имеющихся чертежей корпуса и внутренней разводки межсоединений. На основе полученных при электромагнитном моделировании S -параметров строится пригодная для программы моделирования электрическая цепь. Для простоты рассматриваются только два центральных вывода одной из сторон корпуса.

Самый простой вариант – моделирование электрической схемы с учетом полученных при электромагнитном моделировании S -параметров. Однако не все программы моделирования работают напрямую с S -параметрами. К тому же размер матрицы S -параметров прямо пропорционален количеству портов модели и частотному диапазону, поэтому расчет по такой модели во временной области (анализ переходных процессов) существенно увеличивает время моделирования. В процессе разработки блоков следует избегать увеличения времени моделирования, однако это может быть допустимо при валидации конечного решения. Таким образом, необходима упрощенная модель, поведение которой будет соответствовать поведению, описываемому S -параметрами, но вычислительная сложность будет на порядок ниже. Наиболее распространенная модель тракта линии передачи, которым является проводник вывода корпуса, – RLGC-модель линии передачи [4, 5]. Преимущество данной модели состоит в возможности ее работы как с распределенными, так и с сосредоточенными параметрами. Модель с сосредоточенными параметрами пригодна для симуляции и имеет достаточную степень достоверности для низких и средних частот. Используя RLGC-модель как основу, можно получить более простые или более сложные модели путем изъятия либо добавления новых элементов.

На рис.1 представлена эквивалентная RLC-модель вывода корпуса. Это упрощенная RLGC-модель, где выводы Inner и Outer соответствуют внутреннему и внешнему контактам корпуса, R_s и L_s – сопротивление и индуктивность проводника вывода корпуса, C_{GND} – емкость вывода относительно земельного полигона корпуса, C_p – емкость связи с соседним выводом. Сопротивление, имитирующее утечки емкости между выводом и землей, отсутствует ввиду большого номинала и низкого влияния на динамические процессы.

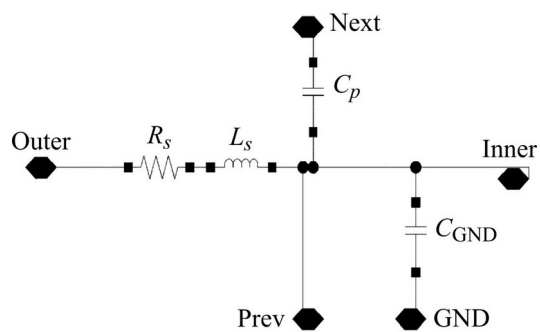


Рис.1. Стандартная эквивалентная RLC-модель вывода корпуса
Fig.1. Classic RLC equivalent circuit of package pin

Индуктивность связи в RLC-модели отсутствует в силу практической сложности ее измерения, а параметры разварочной проволоки не учитываются, так как положение проволоки в корпусе и ее параметры должны определяться для каждого конкретного варианта разварки отдельно.

На рис.2 представлены частотные зависимости импедансов (коэффициенты матриц Z- и Y-параметров) в диапазоне частот 1–10 ГГц для центрального вывода одной из сторон исследуемого корпуса. На основе представленных параметров по следующим формулам строится эквивалентная RLC-модель вывода:

$$C = \text{imag}(1/Z_{22})/(2\pi f), \quad (1)$$

$$L = \text{imag}(1/Y_{11})/(2\pi f), \quad (2)$$

$$R(DC) = \text{real}(1/Y_{11}), \quad (3)$$

где Y_{ij} и Z_{ij} – параметры матрицы Z- и Y-параметров соответственно (Y-параметр представлен в минус первой степени для удобства восприятия).

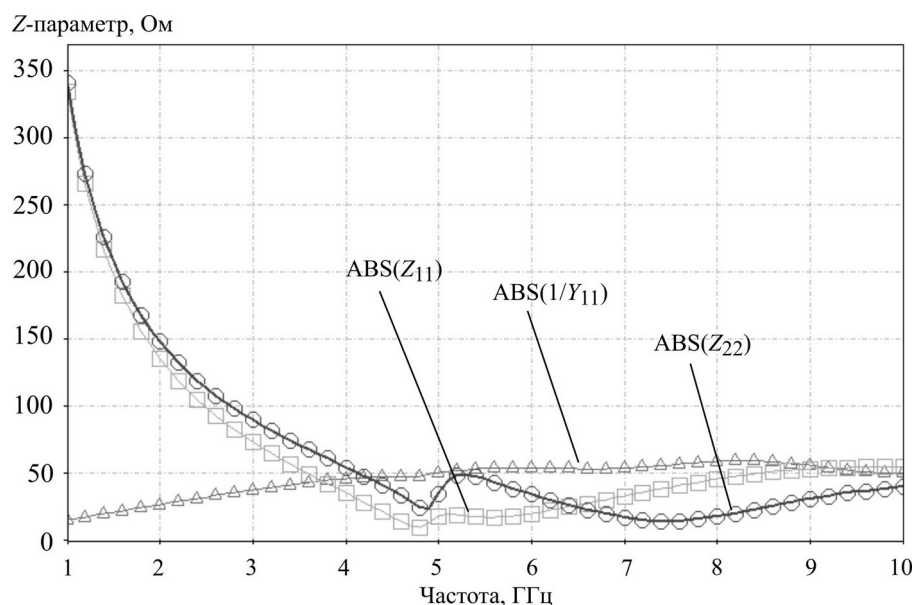


Рис.2. Z-параметры центрального вывода одной из сторон корпуса
Fig.2. Z-parameters of central pin of package's side

Однако данные зависимости не похожи на частотные зависимости индуктивности или емкости в чистом виде. Так, в диапазоне частот 1–10 ГГц в рамках классической RLC-модели индуктивность вывода изменяется в диапазоне 1,8–2,4 нГн, а собственная емкость меняется в диапазоне 0,4–0,8 пФ. По достижении определенной частоты RLC-модель перестает соответствовать физическому объекту. Также импеданс исследуемого вывода в диапазоне частот 4,5–7,5 ГГц не оптимизирован (см. рис.2).

Оптимизация классического подхода. Классическую RLC-модель можно использовать на низких и средних частотах, на высоких частотах ее применять не рекомендуется. Заменяя элементарные элементы данной модели более сложными резонансными цепочками, можно добиться большего соответствия импеданса модели импедансу реального вывода. Однако возникает проблема определения параметров модели, так как неизвестных элементов в модели окажется больше, чем возможных уравнений. Цепь из простейших элементов, суммарный импеданс которых будет точно соответствовать импедансу вывода корпуса на всем диапазоне рабочих частот, может оказаться достаточно большой и состоять из тысячи или десятков тысяч элементов и более. Построенная на основе таких цепей модель будет иметь вычислительную сложность, сопоставимую со СБИС, т.е. переход от S -параметров к эквивалентной модели повышает уровень вычислительной сложности модели и увеличивает время моделирования. Простой в плане вычислительной сложности и одновременно точно соответствующей исходным S -параметрам цепи может не существовать, и ее поиск является некорректно поставленной задачей [6], которая не имеет решения.

Для решения подобных задач существуют следующие группы методов [7]: итерационные, стохастические [8] и эволюционные алгоритмы [9]. Для нахождения параметров цепи (рис.3) будем применять стохастический метод [10], основанный на представленном на рис.4 алгоритме. В начале работы алгоритма параметры элементов цепи выбираются случайным образом, на каждой итерации происходит случайное изменение параметров элементов согласно формуле

$$X_k = X_{k-1} (1 + CM),$$

где X – параметр элемента (сопротивление, индуктивность или емкость); k – номер итерации; C – коэффициент изменения; M – случайное число в диапазоне $[-1; 1]$.

Далее для вновь полученного решения рассчитывается функция штрафа по формуле

$$X_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N ((R(\omega_n) - R)^2 + (\chi(\omega_n) - \chi)^2)},$$

где N – количество точек (используемых значений частот); R – действительная часть импеданса; χ – мнимая часть импеданса; ω – частота.

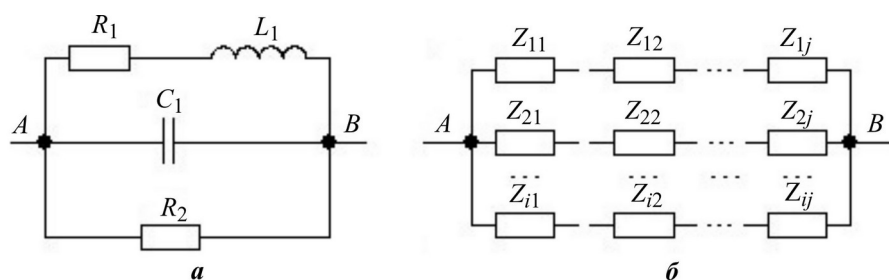


Рис.3. Ячейка оптимизируемой цепи (а) и оптимизируемая цепь (б)

Fig.3. Cell of the optimized circuit (a) and optimized circuit (b)

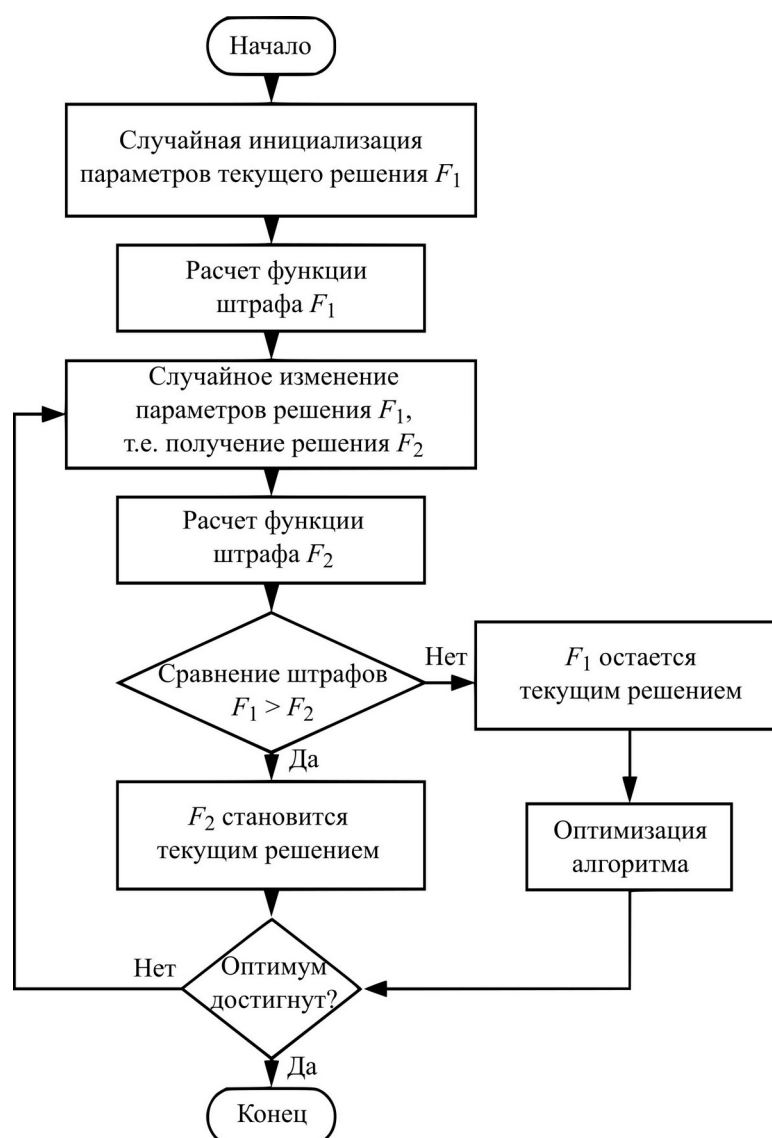


Рис.4. Этапы решения задачи оптимизации стохастическим методом
Fig.4. Stages of solving the optimization problem by the stochastic method

Если новое решение оказывается лучше, оно переходит на следующую итерацию. В противном случае на новую итерацию переходит старое решение, а параметры алгоритма при необходимости оптимизируются. Если на протяжении множества итераций решение остается неизменным либо функция штрафа решения на итерации $i + 1$ мало отличается от функции штрафа решения итерации i , то алгоритм близок к достижению оптимума. В таком случае требуются дополнительные оптимизации:

- уменьшение коэффициента C , что сузит множество допустимых решений, т.е. новое решение ищется вблизи текущего;
- удаление элементов со слишком большими или маленькими параметрами;
- удаление элементов, вклад которых нивелируется соседними элементами цепи;
- объединение элементов цепи, которые позволяют это делать.

Результат работы данного алгоритма применительно к цепи на рис.3 с параметрами $i = j = 5$ и $C = 1$ – цепь, представленная на рис.5, где блок Z_{self} – эквивалент собственной емкости вывода, блок Z_{mutual} – импеданс связи исследуемого вывода с соседним, блок

Z_{lead} – импеданс проводника вывода. Из 200 начальных элементов, имитирующих емкость связи и собственную емкость вывода, осталось 10 и 11 элементов соответственно. Количество элементов, имитирующих проводник вывода, равно 3. В табл.1 представлены параметры моделей с эталоном – результатом преобразования S -параметров на частоте 10 ГГц. Для расчета использовались формулы (1)–(3), RLC-модель более точно соответствует S -параметрам по активному сопротивлению, но при этом значительно проигрывает по индуктивности и емкости.

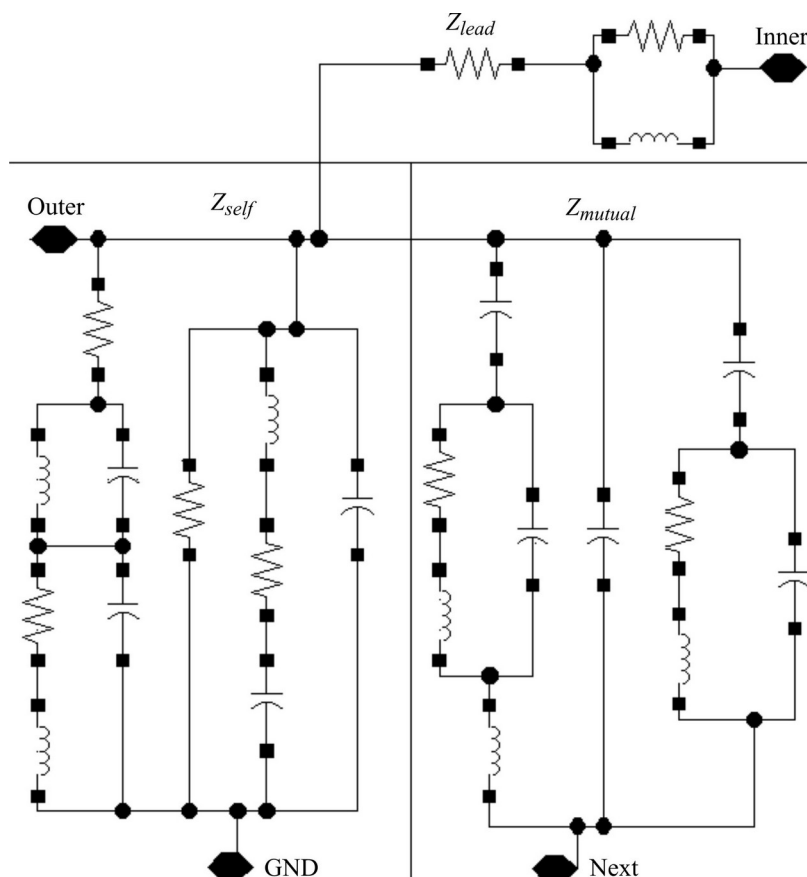


Рис.5. Итоговая модель одиночного вывода корпуса
Fig.5. The final model of the package's pin

Параметры моделей на частоте 10 ГГц

Таблица 1

Model's parameters at 10 GHz frequency

Table 1

Параметр	Классическая RLC-модель	Улучшенная модель	Преобразование S - параметров на конкретной частоте
Собственная емкость, пФ	0,49	0,25	0,29
Емкость связи, пФ	0,13	0,30	0,35
Индуктивность, нГн	2,30	1,52	1,67
Сопротивление, Ом	0,13	0,34	0,14

Сравнение результатов. На рис.6 приведены графики частотной зависимости импеданса вывода при разных включениях. Фактически представленные параметры являются паразитными для микросхемы, помещенной в данный корпус, соответственно, их учет при разработке схмотехники позволит улучшить параметры схемы.

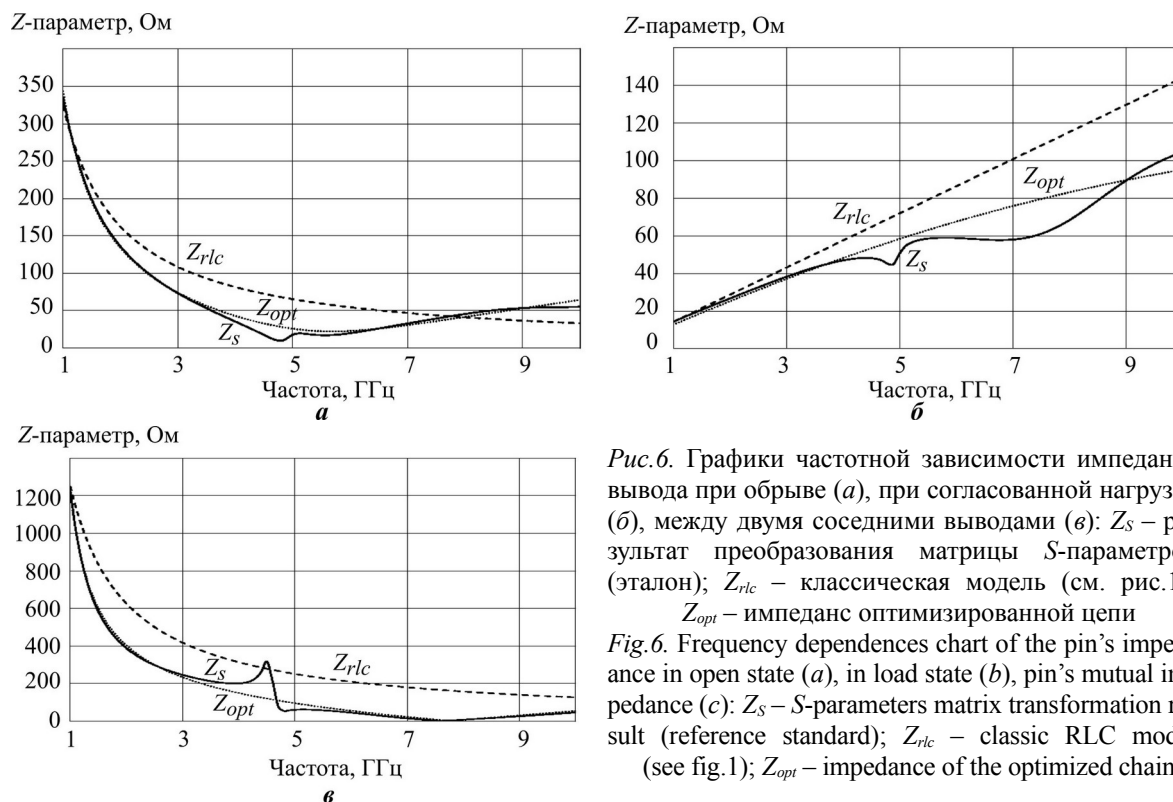


Рис.6. Графики частотной зависимости импеданса вывода при обрыве (а), при согласованной нагрузке (б), между двумя соседними выводами (в): Z_s – результат преобразования матрицы S-параметров (эталон); Z_{rlc} – классическая модель (см. рис.1); Z_{opt} – импеданс оптимизированной цепи

Fig.6. Frequency dependences chart of the pin's impedance in open state (a), in load state (b), pin's mutual impedance (c): Z_s – S-parameters matrix transformation result (reference standard); Z_{rlc} – classic RLC model (see fig.1); Z_{opt} – impedance of the optimized chain

Поведение оптимизированной модели (см. рис.5) более соответствует S-параметрам, чем поведение модели, основанной на классическом подходе. В табл.2 представлены значения среднего относительного отклонения импедансов обеих моделей от эталона и среднеквадратического отклонения (СКО). Эталоном в данном случае являются S-параметры, сравнение проводится в частотном диапазоне 1–10 ГГц.

Сравнение точности моделей

Таблица 2

Model's accuracy comparison

Table 2

Параметр	Классическая RLC-модель		Улучшенная модель	
	Среднее отклонение, %	СКО	Среднее отклонение, %	СКО
Входной импеданс	97,24	31,04	18,37	6,02
Импеданс проводника	37,35	29,33	11,55	8,81
Импеданс связи	1084,51	162,06	41,14	34,99

Таким образом, классическая модель с 4 элементами, дополненная 20 элементами, позволила повысить соответствие модели эталону в 3–5 раз (справедливо только для данного случая).

Заключение. Достоверность электрической модели вывода корпуса, построенной на основе рассчитанных цепей, на высоких частотах в 3–5 раз больше, чем достоверность классической RLC-модели. Сходство полученной модели с эталоном оказалось неидеальным, так как невозможно заменить СВЧ-тракт эквивалентной электрической цепью, остается возможность поиска более оптимальной конфигурации элементов в цепи. Если строить модель на основе S -параметров корпуса с элементами разварки (проволочки, шарики припоя и т.д.), полученных путем измерения или моделирования, можно учесть и элементы разварки.

Литература

1. **Han J., Swaminathan M.** Combined integral equation based circuit modeling of interconnections in electronic packaging // 2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC). Miami, 2016. P. 11.
2. **Xiao Q.** Characterization of bond wire interconnects in QFN packages // 48th European Microwave Conference (EUMC). Madrid, 2018. P. 1265–1268.
3. **Zonouz F.V., Masoumi N., Mehri M.** Effect of IC package on radiated susceptibility of board level interconnection // International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), 2015. P. 1–4.
4. **Naik B.H., Misbahuddin M., Paidimarry C.S.** S -parameter modeling and analysis of RGLC interconnect for signal integrity // International Conference on Recent Trends in Electrical, Electronics and Computing Technologies (icrteect). Warangal, India, 2017. P. 11–16.
5. **Bakoglu H.B.** Circuits, interconnections, and packaging for Vlsi. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1990. 527 p.
6. **Niezmatova N.A.** Numerical solution of incorrectly posed problems using natural algorithms // Scientific-Innovative Center of Information and Communication Technologies at the Tashkent University of Information Technologies Named after Muhammad al-Khwarizmi, 2018. P. 96–103.
7. Дифракционная компьютерная оптика / **Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский и др.** Самара: Физматлит, 2007. 735 с.
8. **Wang S., Ji Y., Yang S.** Astochasticcombinatorial optimization model for test sequence optimization // ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. Sanya, China, 2009. P. 311–315.
9. **Ishani L., Shubham K.C., Divya U., Richa G.** Comparative study on nature inspired algorithms for optimization problem // International Conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). Coimbatore, India, 2017. P. 143–147.
10. **Kryzhanovsky D.I.** Nonlinear parametric identification method using stochastic optimization algorithms // News of Volgograd State Technical University, 2008. P. 38–41.

Поступила в редакцию 18.03.2020 г.; после доработки 18.05.2020; принята к публикации 16.06.2020 г.

Белов Егор Николаевич – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер-программист АО «ПКК Миландр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр., 5), Belov.e@milandr.ru

Швец Александр Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ведущий инженер АО «ПКК Миландр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр., 5), 2sh@mail.ru

References

1. Han J., Swaminathan M. Combined Integral Equation Based Circuit Modeling of Interconnections in Electronic Packaging. *2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*. Miami, 2016. P. 11.
2. Xiao Q. Characterization of Bond Wire Interconnects in QFN Packages. *48th European Microwave Conference (EuMC)*. Madrid, 2018, pp. 1265–1268.
3. Zonouz F.V., Masoumi N., Mehri M. Effect of IC package on radiated susceptibility of board level interconnection. *International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*. 2015. pp. 1–4.
4. Naik B.H., Misbahuddin M., Paidimarry C.S. S-Parameter Modeling and Analysis of RGLC Interconnect for Signal Integrity. *International Conference on Recent Trends in Electrical, Electronics and Computing Technologies (ICRTEECT)*. Warangal, India. 2017, pp. 11–16.
5. Bakoglu H. B. *Circuits, Interconnections, and Packaging for Vlsi*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1990. 527 p.
6. Niezmatova N.A. Numerical solution of incorrectly posed problems using natural algorithms. *Scientific-innovative center of information and communication technologies at the Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi*, 2018. pp. 96–103.
7. Golovashkin D.L., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L.et. al. *Diffraction computer optics*. Samara: PHYS-MATLIT Publ., 2007. 735 pp. (in Russian).
8. Wang S., Ji Y., Yang S. A stochastic combinatorial optimization model for test sequence optimization. *ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management*. Sanya, China. 2009, pp. 311–315.
9. Ishani L., Shubham K.C., Divya U., Richa G. Comparative study on nature inspired algorithms for optimization problem. *International conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. Coimbatore, India. 2017, pp. 143–147.
10. Kryzhanovsky D.I. Nonlinear parametric identification method using stochastic optimization algorithms. *News of Volgograd State Technical University*, 2008. pp. 38–41.

Received 18.03.2020; Revised 18.05.2020; Accepted 16.06.2020.

Information about the authors:

Egor N. Belov – PhD student of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Software Engineer, JSC «ICC Milandr» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Georgievsky Av., 5), Belov.e@milandr.ru

Alexander V. Shvets – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1) Leading Engineer, JSC «ICC Milandr» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Georgievsky Av., 5), 2sh@mail.ru