

# Анализ современных методов расчета электрофизических параметров печатных плат и их соответствия современным требованиям при разработке быстродействующей электроники

*Кечиев Л.Н., Соловьев А.В.*

Современное развитие электронной аппаратуры характеризуется постоянно повышающимся быстродействием, миниатюризацией, возрастающей сложностью и интеграцией. Повышение тактовых частот до сотен мегагерц и выше ведет к тому, что на целостность сигнала начинают оказывать влияние электрофизические параметры проводников на печатных платах.

При распространении сигнала от кристалла к кристаллу в электронном модуле он проходит различные отрезки пути, электрические параметры которых влияют на него, вызывая те или иные искажения. Если эти искажения значительны и форма сигнала нарушается, то возможны сбои и другие нарушения функционирования цифрового устройства.

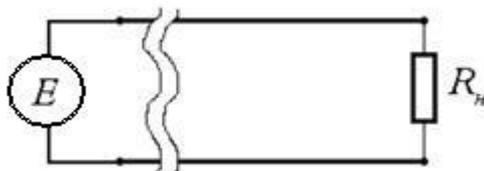
При выборе принципов построения телекоммуникационной аппаратуры и используемых при ее создании схемотехнических решений необходимо обязательно учитывать параметры линий передачи как направляющей системы электромагнитных колебаний, требования к которым возрастают с каждым днем.

Как показывает практика различные методы расчета электрофизических параметров печатных плат на этапе проектирования не являются на 100% точными, а различные технологии производства электронных модулей могут оказывать влияние на геометрию изделия, в то время как свойства технологических материалов могут варьироваться от производителя к производителю и от партии к партии.

В данной статье рассмотрены основные требования к целостности сигнала, проведен анализ точности различных методов расчета электрофизических параметров и анализ влияния различных технологических операций при производстве электроники на целостность сигнала.

## **Требования к целостности сигнала**

Известно, что одним из основных параметров линии связи является коэффициент отражения, характеризующий соотношение амплитуд падающего и отраженного от нагрузки  $R_n$  сигнала.



$$k_{omp} = \frac{Z - R_n}{Z + R_n}$$

Где  $R_n$  - сопротивление нагрузки,

$Z$  - волновое сопротивление линии.

Коэффициент отражения зависит от согласованности линии связи. Линия считается согласованной, если сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению линии.

Исходя из современных требований к печатным платам, коэффициент отражения в конце линии не должен превышать 5%, т.е.:

$$k_{omp} = \frac{Z - R_n}{Z + R_n} \leq 0,05$$

При этом появление отраженной волны означает несогласованность линии и  $Z \neq R_n$ .

Причиной рассогласованности линии является погрешность как волнового сопротивления, так и сопротивления нагрузки.

Погрешность сопротивления нагрузки зависит от выбора согласующего резистора: его типа и, соответственно, точности.

Погрешность волнового сопротивления может зависеть от точности расчета на этапе проектирования электронного модуля или отдельной печатной платы, а также на этапе производства из-за погрешностей различных технологических процессов.

При этом, согласно проведенным расчетам, при наличии согласующего резистора с погрешностью 5%, максимальная погрешность волнового сопротивления может составлять 5%, а при резисторе 1% максимальная погрешность волнового сопротивления – 9,4%.

Рассмотрим данные составляющие более подробно.

### ***Согласующие резисторы***

В таблице 1 и на гистограмме на рис. 1. приведено соотношение средних цен на резисторы поверхностного монтажа с погрешностью 5% и 1% в зависимости от типоразмера. Использовались данные для резисторов номиналов 51 Ом (с погрешностью 5%) и 49,9 Ом (с погрешностью 1%). [3]

**Таблица 1. Средняя стоимость резисторов поверхностного монтажа**

<b>Номинал, Ом</b>	<b>Корпус</b>	<b>Цена катушки, \$</b>
49,9	0201	1 000,00
(Погрешность 1%)	0402	83,33
	0603	57,14
	0805	60,00
	1206	75,00
51	0201	333,33
(Погрешность 5%)	0402	62,50
	0603	50,00
	0805	50,00
	1206	62,50

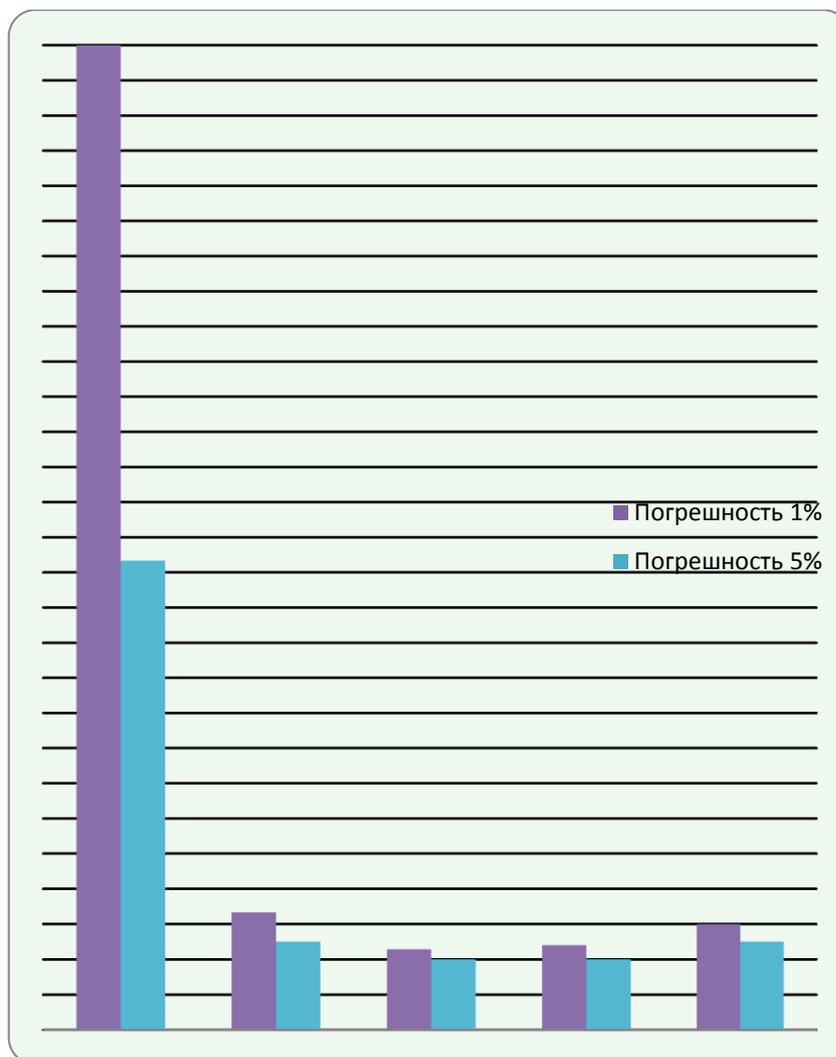


Рис. 1. Соотношение средней стоимости резисторов поверхностного монтажа в зависимости от типа корпуса и погрешности

Из полученных данных видно, что соотношение цена/погрешность номинала с учетом современных тенденций перехода на компоненты 0402, а в определенных случаях сверхплотного монтажа и на 0201, указывает на то, что при использовании 1% резисторов, себестоимость изделия значительно увеличивается, поэтому с экономической точки зрения эффективнее использовать в производстве резисторы с погрешностью 5%. Теперь посмотрим на это с точки зрения проектирования и производства печатных узлов.

### Анализ точности расчета волнового сопротивления различными методами

Проверка точности расчета волнового сопротивления линии связи на печатной плате (рис. 2) различными методами проводилась с учетом следующих общих условий:

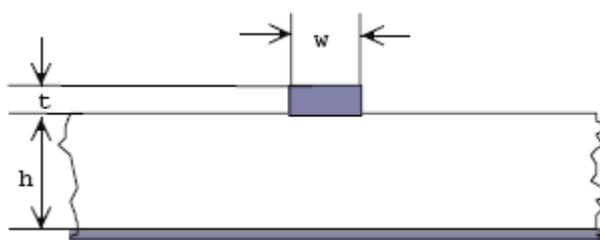


Рис. 2. Сечение микрополосковой линии связи (проводника)

Ширина проводника 1 мм при волновом сопротивлении 50 Ом (0,3 мм для случая с волновым сопротивлением 90 Ом).

Диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon=4$

Толщина подложки 0,5 мм  
Толщина проводника 0,035 мм  
Толщина слоя заземления 0,035 мм

### Методы расчета

1. ELCUT – программа моделирования двумерных полей методом конечных элементов;
2. Формулы расчета волнового сопротивления микрополосковых линий из стандарта IPC-2141A Design Guide for High Speed Controlled Impedance Circuit Boards (Руководство по проектированию высокоскоростных печатных плат с контролируемым импедансом);
3. Методика расчета для двух пластин, расположенных симметрично на границах диэлектрического слоя по методу Ю.Я. Йоссея из [4];
4. Программный комплекс SPEED2000 компании Signal Integrity (демо-версия);
5. Программный комплекс Compliance компании Quantic EMC (демо-версия);

### Расчет в программе ELCUT

В программе ELCUT используется численный метод конечных элементов. Метод конечных элементов является одним из самых мощных методов, пригодных для анализа самых разнообразных технических и научных задач. Он основан на разбиении всей расчетной области (в двумерной или трехмерной) на конечные элементы. Причем, чем мельче эти элементы, тем точнее описание процессов и явлений.

Данный инструмент расчета можно считать эталонным, т.к. в нем непосредственно моделируется электромагнитное поле и не используются какие-либо допущения или упрощения.

Для проверки точности расчета рассмотрим простой случай на примере цилиндрического конденсатора (рис. 3).

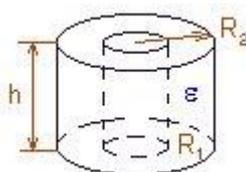


Рис. 3. Цилиндрический конденсатор

где: R1 – радиус внутреннего цилиндра,

R2 – радиус внешнего цилиндра,

h – высота цилиндров,

ε – диэлектрическая проницаемость между обкладками.

В стандартном случае емкость цилиндрического конденсатора рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 h}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

Модель в программе ELCUT показана на рис. 4:

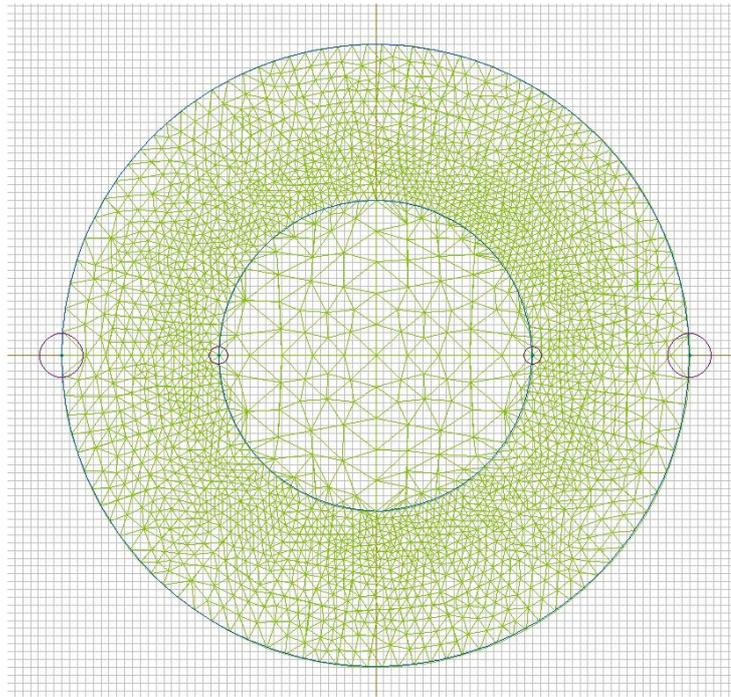


Рис. 4 Сетка конечных элементов в сечении цилиндрического конденсатора в программе ELCUT

Емкость цилиндрического конденсатора при:

$$R_1 = 10 \text{ мм}$$

$$R_2 = 20 \text{ мм}$$

$$h = 1 \text{ мм}$$

$$\varepsilon = 5$$

составляет  $C=4,011 \times 10^{-10} \Phi$ . Расчет в ELCUT дает результат:  $C=4,016 \times 10^{-10} \Phi$ . При этом относительная погрешность:  $\varepsilon_C = 0,125\%$

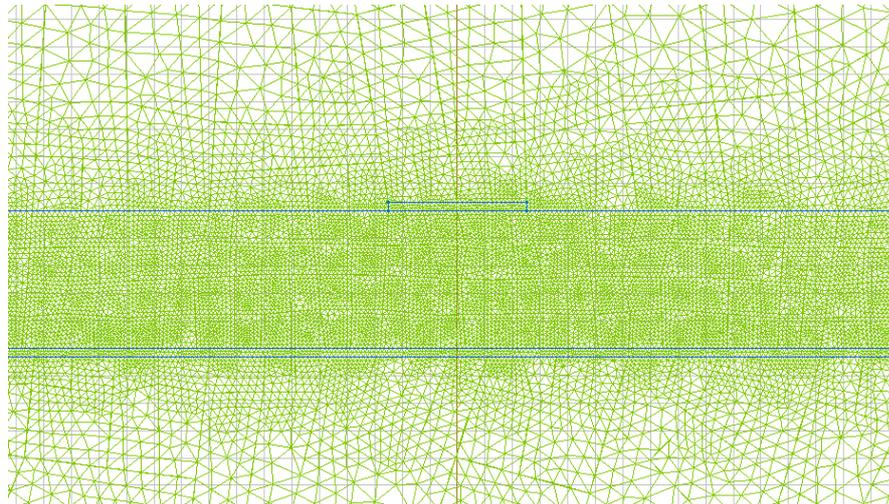


Рис. 5. Модель микрополосковой линии в программе ELCUT

Результаты расчета микрополосковой линии связи при различных условиях показаны в таблицах 2-4.

Табл. 2. Зависимость волнового сопротивления от ширины проводника при диэлектрической проницаемости 4

Ширина проводника, мм	Z ELCUT	Еэф ELCUT
12	7,09475	3,724
10	8,36974	3,685
7	11,50131	3,604

5	15,37247	3,520
4	18,50280	3,456
3	23,28961	3,370
2	31,56925	3,244
1	49,84038	3,033
0,7	60,84073	2,936
0,5	71,80091	2,857
0,3	88,83623	2,760
0,2	102,38822	2,696
0,1	124,37960	2,611
0,05	144,05371	2,534
0,01	177,27403	2,342

**Табл. 3. Зависимость волнового сопротивления от диэлектрической проницаемости при ширине проводника 1 мм**

Проницаемость	Z ELCUT	Еэф ELCUT
1	86,7779	1,000
2	66,7984	1,688
2,4	62,0144	1,958
2,8	58,1470	2,227
3,2	54,9289	2,496
3,6	52,1946	2,764
4	49,8339	3,032
4,4	47,7859	3,298
4,8	45,9544	3,566
5,2	44,3337	3,831
5,6	42,8595	4,099
6	41,5357	4,365
6,4	40,3160	4,633
6,8	39,2083	4,898
7,2	38,1871	5,164
7,6	37,2329	5,432

**Табл.4. Зависимость волнового сопротивления от толщины подложки при ширине проводника 1 мм и диэлектрической проницаемости 4**

Толщина подложки, мм	Z ELCUT	Еэф ELCUT
0,05	8,28857	3,665
0,07	11,16874	3,578
0,1	15,19363	3,487
0,2	26,53324	3,289
0,3	35,65647	3,170
0,4	43,29324	3,091
0,5	49,83389	3,032
0,6	55,51245	2,987
0,7	60,52994	2,951
0,8	65,01715	2,923
0,9	69,05975	2,901
1	72,73425	2,882
1,5	89,19822	2,699

### **Расчет по формулам стандарта IPC-2141A**

Формулы из стандарта IPC-2141A – аналитические выражения, полученные эмпирическим путем для расчета нескольких вариантов микрополосковых линий (открытая микрополосковая линия, микрополосковая линия в диэлектрике, между пластинами заземления и т.д.). В проведенном расчете использовались формулы для открытой микрополосковой линии.

$$Z_0 = \frac{\eta_0}{2\sqrt{2\pi}\sqrt{\varepsilon_{r,\text{эфф}} + 1}} \ln \left\{ 1 + 4 \frac{h}{w'} \left[ 4 \left( \frac{14\varepsilon_{r,\text{эфф}} + 8}{11\varepsilon_{r,\text{эфф}}} \right) \frac{h}{w'} + \sqrt{16 \left( \frac{14\varepsilon_{r,\text{эфф}} + 8}{11\varepsilon_{r,\text{эфф}}} \right)^2 \left( \frac{h}{w'} \right)^2 + \frac{\varepsilon_{r,\text{эфф}} + 1}{2\varepsilon_{r,\text{эфф}}} \pi^2} \right] \right\}$$

$$w' = w + \frac{t}{\pi} \ln \left\{ \frac{4e}{\sqrt{\left( \frac{t}{h} \right)^2 + \left( \frac{t}{w\pi + 1,1t\pi} \right)^2}} \left( \frac{\varepsilon_{r,\text{эфф}} + 1}{2\varepsilon_{r,\text{эфф}}} \right) \right\}$$

$$\varepsilon_{r,\text{эфф}} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{w}{w + 12h}} + 0,04 \left( 1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right\} & \frac{w}{h} < 1 \end{cases}$$

$$\varepsilon_{r,\text{эфф}} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \sqrt{\frac{w}{w + 12h}} & \frac{w}{h} > 1 \end{cases}$$

где:  $\eta_0 = 377 \text{ Ом}$  - волновое сопротивление вакуума,

$\varepsilon_r$  - диэлектрическая проницаемость,

$\varepsilon_{r,\text{эфф}}$  - эффективная диэлектрическая проницаемость,

$w$  - ширина проводника,

$w'$  - эффективная ширина проводника.

$t$  - толщина проводника,

Результаты расчета волнового сопротивления микрополосковой линии связи по формулам стандарта IPC2141A приведены в таблицах 5-7.

**Табл. 5. Зависимость волнового сопротивления от ширины проводника при диэлектрической проницаемости 4**

Ширина проводника, мм	Z IPC	Еэф IPC
12	7,365	3,686
10	8,73	3,686
7	12,097	3,601
5	16,299	3,511
4	19,742	3,449
3	25,068	3,366
2	34,461	3,250
1	55,77	3,067
0,7	68,856	2,985
0,5	81,993	2,916
0,3	102,392	2,837
0,2	118,366	2,791
0,1	144,285	2,730
0,05	167,374	2,685
0,01	204,266	2,619

**Табл.6. Зависимость волнового сопротивления от диэлектрической проницаемости при ширине проводника 1 мм**

Проницаемость	Z IPC	Еэф IPC
1	86,102	1,000
2	71,044	1,689
2,4	66,964	1,965
2,8	63,531	2,240

Проницаемость	Z IPC	Еэф IPC
3,2	60,587	2,516
3,6	58,025	2,791
4	55,767	3,067
4,4	53,757	3,343
4,8	51,952	3,618
5,2	50,319	3,894
5,6	48,832	4,169
6	47,471	4,445
6,4	46,218	4,721
6,8	45,06	4,996
7,2	43,986	5,272
7,6	42,985	5,547

Табл.7. Зависимость волнового сопротивления от толщины подложки при ширине проводника 1 мм и диэлектрической проницаемости 4

Толщина подложки, мм	Z IPC	Еэф IPC
0,05	8,616	3,686
0,07	11,719	3,606
0,1	16,084	3,511
0,2	28,706	3,313
0,3	39,17	3,199
0,4	48,07	3,123
0,5	55,767	3,067
0,6	62,512	3,024
0,7	68,492	2,989
0,8	73,85	2,961
0,9	78,693	2,937
1	83,106	2,916
1,5	100,545	2,851

### Расчет по методу Ю.Я. Йоссея

Методика расчета для двух пластин, расположенных симметрично на границах диэлектрического слоя по методу Йоссея Ю.Я. основана на применении для вывода аналитических выражений метода конформных преобразований.

Метод построен на конформных преобразованиях (раздел теории функции комплексного переменного). Суть метода заключается в существовании двух систем координат, определённым образом связанных между собой. Эта связь определяется некоторой функцией преобразования  $F$ . Если такая функция имеется, то мы всегда можем сопоставить некоторую точку в одной системе координат некоторой точке в другой системе координат.

Особенности метода:

Задача может быть решена в случае, если известна функция преобразования (из справочной литературы);

Метод применим только для решения электростатических задач. Для этого необходимо провести электродинамическую оценку задачи;

Метод применим только для однородных диэлектрических сред. Кусочно-однородные среды могут быть рассчитаны только в отдельных частных случаях;

Метод конформных преобразований, как правило, оперирует с пластинами (бесконечно тонкими элементами), поэтому исходная система электродов должна быть представлена в виде некоторой модели, содержащей бесконечно тонкие элементы;

Для случая двух пластин с общей плоскостью симметрии зависимость  $\frac{C_1}{\varepsilon} = f\left(\frac{b_2}{d}\right)$  при некоторых фиксированных значениях отношения ширины нижней пластины к верхней  $\frac{b_1}{b_2}$  представлена на рис.

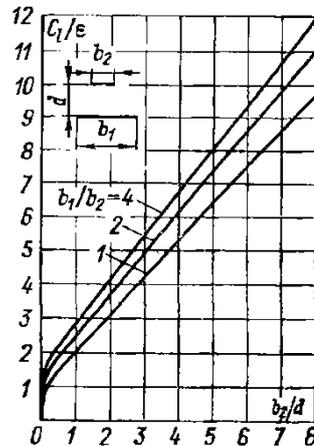


Рис. 6. Зависимость емкости двух параллельных пластин в вакууме для некоторых случаев

Для пластин, расположенных на границах диэлектрического слоя погонная емкость рассчитывается по формуле:

$$Cl \approx C_1(\varepsilon_1) + 2(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \frac{K'(k)}{K(k)}$$

где  $C_1$  - погонная емкость между двумя пластинами в вакууме,

$\varepsilon_1 = 1$  - диэлектрическая проницаемость вакуума,

$\varepsilon_2$  - диэлектрическая проницаемость подложки,

$K(k)$  и  $K'(k)$  - полные эллиптические интегралы первого рода.

Зная данную емкость, можно определить волновое сопротивление проводника:

$$Z = \frac{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_{эфф} \varepsilon_0}}{Cl}$$

Результаты расчета показаны в таблицах 8-10.

**Табл. 8. Зависимость волнового сопротивления от ширины проводника при диэлектрической проницаемости 4**

<b>Ширина проводника, мм</b>	<b>Z Йоссель</b>	<b>Еэф Йоссель</b>
12	8,305	1,897
10	9,462	2,067
7	12,034	2,490
5	14,831	3,023
4	17,445	3,244
3	22,422	3,215
2	31,375	3,164
1	51,864	3,087
0,7	64,411	3,050
0,5	77,27	2,979
0,3	96,759	2,862
0,2	112,427	2,698
0,1	137,168	2,386
0,05	157,007	2,122
0,01	182,593	1,790

**Табл. 9. Зависимость волнового сопротивления от диэлектрической проницаемости при ширине проводника 1 мм**

<b>Проницаемость</b>	<b>Z Йоссель</b>	<b>Еэф Йоссель</b>
1	89,696	1
2	69,1	1,685
2,4	64,086	1,959
2,8	60,025	2,233
3,2	56,65	2,507
3,6	53,787	2,781
4	51,319	3,055
4,4	49,161	3,329
4,8	47,255	3,603
5,2	45,555	3,877
5,6	44,026	4,151
6	42,641	4,425
6,4	41,379	4,699
6,8	40,223	4,973
7,2	39,159	5,247
7,6	38,174	5,521

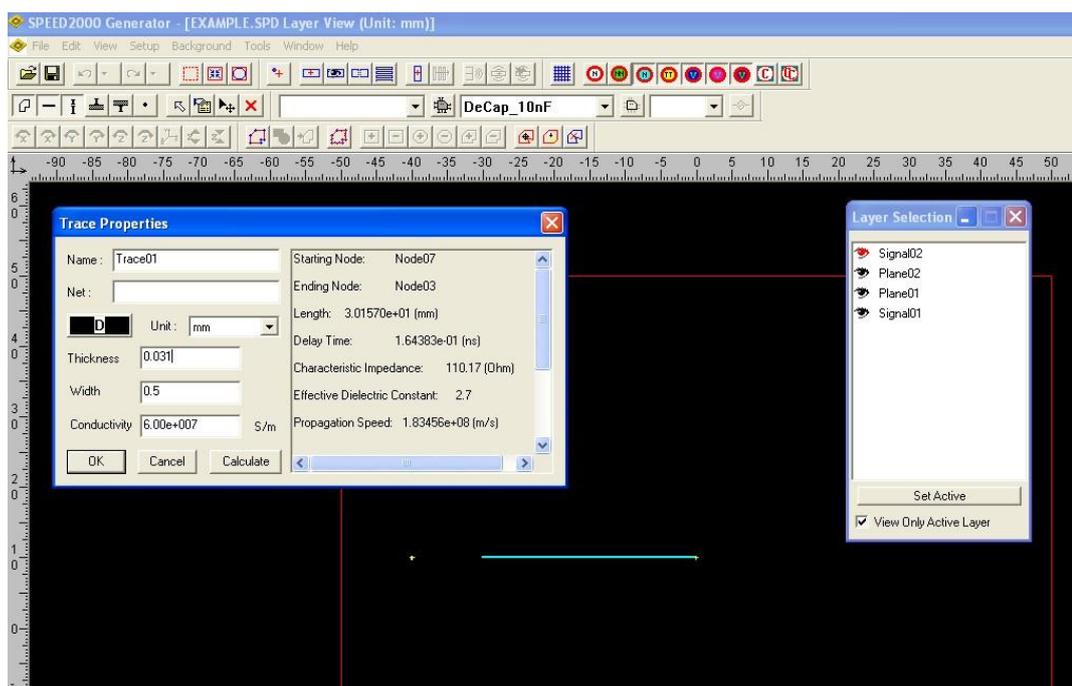
**Табл. 10. Зависимость волнового сопротивления от толщины подложки при ширине проводника 1 мм и диэлектрической проницаемости 4**

Толщина подложки, мм	Z Йоссель	Еэф Йоссель
0,05	9,460	2,067
0,07	11,875	2,462
0,1	14,831	3,023
0,2	26,121	3,202
0,3	36,152	3,151
0,4	44,544	3,117
0,5	51,864	3,087
0,6	57,913	3,066
0,7	63,672	3,046
0,8	68,670	3,029
0,9	72,988	3,020
1	77,907	2,930
1,5	92,572	2,892

### Расчет в программном комплексе SPEED2000

Программный комплекс SPEED2000 компании Signal Integrity (демо-версия), представляет собой интегрированную среду анализа целостности сигналов и перекрестных искажений на сложных печатных платах и кристаллах интегральных микросхем.

Параметры проводников могут быть рассчитаны в любой момент на этапе прорисовки структуры печатной платы в окне «Trace Properties» («Свойства проводника») (рис. 7).



*Рис. 7. Рабочее окно программы SPEED2000*

Результаты расчетов в SPEED2000 приведены в таблицах 11-13.

**Табл. 11. Зависимость волнового сопротивления от ширины проводника при диэлектрической проницаемости 4**

Ширина проводника, мм	Z Speed2000, Ом	Еэф Speed2000
12	7,66	3,4
10	9,06	3,4
7	12,48	3,3
5	16,74	3,2

Ширина проводника, мм	Z Speed2000, Ом	Еэф Speed2000
4	20,22	3,1
3	25,51	3,1
2	34,74	2,9
1	49,92	3,0
0,7	60,91	2,9
0,5	71,86	2,8
0,3	88,89	2,7
0,2	102,32	2,7
0,1	124,52	2,6
0,05	145,59	2,4
0,01	182,20	2,2

Табл. 12. Зависимость волнового сопротивления от диэлектрической проницаемости при ширине проводника 1 мм

Проницаемость	Z Speed2000, Ом	Еэф Speed2000
1	82,72	1,0
2	66,84	1,7
2,4	62,07	2,0
2,8	58,21	2,2
3,2	55,00	2,5
3,6	52,27	2,8
4	49,92	3,0
4,4	47,86	3,3
4,8	46,04	3,5
5,2	44,42	3,8
5,6	42,95	4,1
6	41,62	4,3
6,4	40,41	4,6
6,8	39,30	4,9
7,2	38,28	5,1
7,6	37,33	5,4

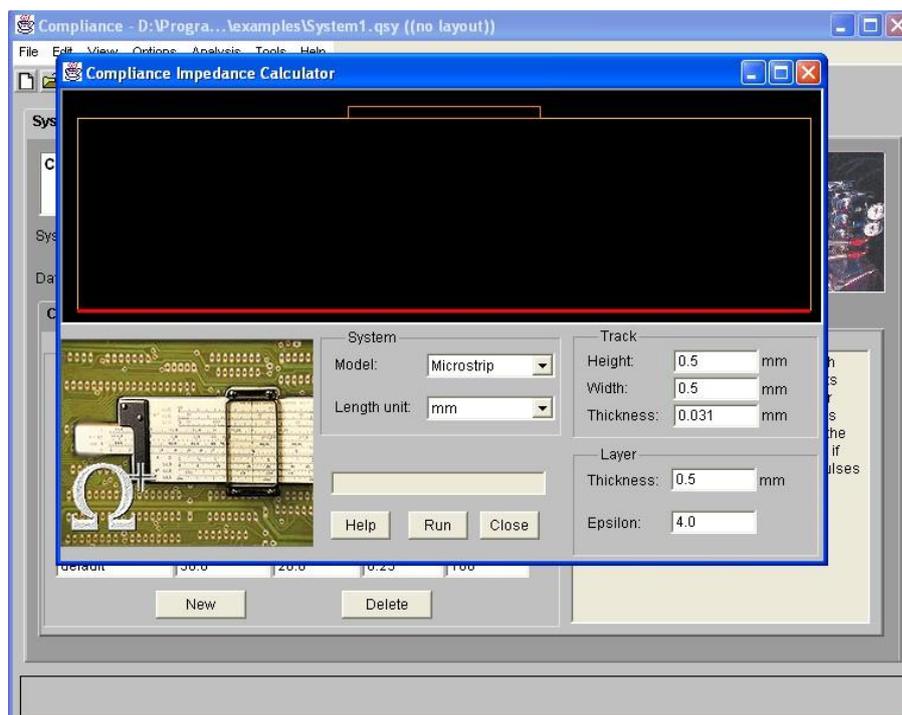
**Табл. 13. Зависимость волнового сопротивления от толщины подложки при ширине проводника 1 мм и диэлектрической проницаемости 4**

Толщина подложки, мм	Z Speed2000, Ом	Еэф Speed2000
0,05	8,28	3,6
0,07	11,18	3,6
0,1	15,22	3,5
0,2	26,59	3,3
0,3	35,74	3,2
0,4	43,39	3,1
0,5	49,92	3,0
0,6	55,61	3,0
0,7	60,63	2,9
0,8	65,12	2,9
0,9	69,17	2,9
1	72,85	2,9
1,5	87,45	2,8

### **Расчет в программном комплексе Compliance**

Программный комплекс Compliance компании Quantic EMC (демо-версия) предназначен для анализа электромагнитной совместимости, целостности сигналов и перекрестных искажений в печатных платах.

В данном комплексе имеется специальный модуль по расчету волнового сопротивления линии связи «Compliance Impedance Calculator» (рис. 8).



Результаты расчета волнового сопротивления в Compliance показаны в таблицах 14-16.

**Табл. 14. Зависимость волнового сопротивления от ширины проводника при диэлектрической проницаемости 4**

Ширина проводника, мм	Z Quantic EMC, Ом
12	7,14
10	8,43
7	11,62
5	15,56

Ширина проводника, мм	Z Quantic EMC, Ом
4	18,75
3	23,65
2	32,15
1	50,92
0,7	62,25
0,5	74,03
0,3	91,71
0,2	105,56
0,1	127,96
0,05	147,87
0,01	181,75

**Табл. 15. Зависимость волнового сопротивления от диэлектрической проницаемости при ширине проводника 1 мм**

Проницаемость	Z Quantic EMC, Ом
1	82,46
2	67,92
2,4	63,2
2,8	59,38
3,2	56,18
3,6	53,27
4	50,92
4,4	48,86
4,8	47,03
5,2	45,39
5,6	43,92
6	42,58
6,4	41,36
6,8	40,24
7,2	39,21
7,6	38,25

**Табл. 16. Зависимость волнового сопротивления от толщины подложки при ширине проводника 1 мм и диэлектрической проницаемости 4**

Толщина подложки, мм	Z Quantic EMC, Ом
0,05	8,34
0,07	11,27
0,1	15,35
0,2	26,92
0,3	36,30
0,4	44,17
0,5	50,92
0,6	56,81
0,7	62,03
0,8	66,70
0,9	71,37
1	75,24
1,5	90,66

**Сравнительные результаты расчетов**

**Табл. 17. Погрешности различных методов расчета волновых сопротивлений в зависимости от ширины проводника**

Ширина проводника, мм	ELCUT, Ом	IPC, Ом	Погрешность IPC, %	Йоссель, Ом	Погрешность по Йосселю, %	Speed2000, Ом	Погрешность, Speed2000, %	Compliance, Ом	Погрешность Compliance, %
12	7,09	7,37	3,81	8,31	17,06	7,66	7,97	7,14	0,64
10	8,37	8,73	4,30	9,46	13,05	9,06	8,25	8,43	0,72
7	11,50	12,10	5,18	12,03	4,63	12,48	8,51	11,62	1,03
5	15,37	16,30	6,03	14,83	-3,52	16,74	8,90	15,56	1,22
4	18,50	19,74	6,70	17,45	-5,72	20,22	9,28	18,75	1,34
3	23,29	25,07	7,64	22,42	-3,73	25,51	9,53	23,65	1,55
2	31,57	34,46	9,16	31,38	-0,62	34,74	10,04	32,15	1,84
1	49,84	55,77	11,90	51,86	4,06	49,92	0,16	50,92	2,17
0,7	60,84	68,86	13,17	64,41	5,87	60,91	0,11	62,25	2,32
0,5	71,80	81,99	14,19	77,27	7,62	71,86	0,08	74,03	3,10
0,3	88,84	102,39	15,26	96,76	8,92	88,89	0,06	91,71	3,23
0,2	102,39	118,37	15,61	112,43	9,80	102,32	-0,07	105,56	3,10
0,1	124,38	144,29	16,00	137,17	10,28	124,52	0,11	127,96	2,88
0,05	144,05	167,37	16,19	157,01	8,99	145,59	1,07	147,87	2,65
0,01	177,27	204,27	15,23	182,59	3,00	182,20	2,78	181,75	2,52

**Табл. 18. Погрешности различных методов расчета волновых сопротивлений в зависимости от диэлектрической проницаемости подложки**

Проницаемость	ELCUT, Ом	IPC, Ом	Погрешность IPC, %	Йоссель, Ом	Погрешность по Йосселю, %	Speed2000, Ом	Погрешность, Speed2000, %	Compliance, Ом	Погрешность Compliance, %
1	86,78	86,10	-0,78	89,70	3,36	82,72	-4,68	82,46	-4,98
2	66,80	71,04	6,36	69,10	3,45	66,84	0,06	67,92	1,68
2,4	62,01	66,96	7,98	64,09	3,34	62,07	0,09	63,20	1,91
2,8	58,15	63,53	9,26	60,03	3,23	58,21	0,11	59,38	2,12

3,2	54,93	60,59	10,30	56,65	3,13	55,00	0,13	56,18	2,28
3,6	52,19	58,03	11,17	53,79	3,05	52,27	0,14	53,27	2,06
4	49,83	55,77	11,91	51,32	2,98	49,92	0,17	50,92	2,18
4,4	47,79	53,76	12,50	49,16	2,88	47,86	0,16	48,86	2,25
4,8	45,95	51,95	13,05	47,26	2,83	46,04	0,19	47,03	2,34
5,2	44,33	50,32	13,50	45,56	2,75	44,42	0,19	45,39	2,38
5,6	42,86	48,83	13,93	44,03	2,72	42,95	0,21	43,92	2,47
6	41,54	47,47	14,29	42,64	2,66	41,62	0,20	42,58	2,51
6,4	40,32	46,22	14,64	41,38	2,64	40,41	0,23	41,36	2,59
6,8	39,21	45,06	14,92	40,22	2,59	39,30	0,23	40,24	2,63
7,2	38,19	43,99	15,19	39,16	2,55	38,28	0,24	39,21	2,68
7,6	37,23	42,99	15,45	38,17	2,53	37,33	0,26	38,25	2,73

**Табл. 19. Погрешности различных методов расчета волновых сопротивлений в зависимости от толщины подложки**

Толщина подложки, мм	ELCUT, Ом	IPC, Ом	Погрешность IPC, %	Йоссель, Ом	Погрешность по Йосселю, %	Speed2000, Ом	Погрешность, Speed2000, %	Compliance, Ом	Погрешность Compliance, %
0,05	8,29	8,62	3,95	9,46	14,13	8,28	-0,10	8,34	0,62
0,07	11,17	11,72	4,93	11,88	6,32	11,18	0,10	11,27	0,91
0,1	15,19	16,08	5,86	14,83	-2,39	15,22	0,17	15,35	1,03
0,2	26,53	28,71	8,19	26,12	-1,55	26,59	0,21	26,92	1,46
0,3	35,66	39,17	9,85	36,15	1,39	35,74	0,23	36,30	1,80
0,4	43,29	48,07	11,03	44,54	2,89	43,39	0,22	44,17	2,03
0,5	49,83	55,77	11,91	51,86	4,07	49,92	0,17	50,92	2,18
0,6	55,51	62,51	12,61	57,91	4,32	55,61	0,18	56,81	2,34
0,7	60,53	68,49	13,15	63,67	5,19	60,63	0,17	62,03	2,48
0,8	65,02	73,85	13,59	68,67	5,62	65,12	0,16	66,70	2,59
0,9	69,06	78,69	13,95	72,99	5,69	69,17	0,16	71,37	3,35
1	72,73	83,11	14,26	77,91	7,11	72,85	0,16	75,24	3,45
1,5	89,20	100,55	12,72	92,57	3,78	87,45	-1,96	90,66	1,64

Исходя из полученных зависимостей и анализа погрешностей расчета различными методами можно сделать следующие выводы:

1. Формулы расчета волнового сопротивления по стандарту IPC2141A являются лишь прикидочными и никак не могут использоваться при проектировании печатных плат высокого быстродействия. Погрешность для случая волнового сопротивления 50 Ом составила более 11%, а для случая 90 Ом – более 15%. Кроме того данные формулы не учитывают наличие паяльной маски или влагозащитного покрытия и также поэтому не могут использоваться при ответственных расчетах.
2. Метод Йосселя, основанный на конформных преобразованиях показал большую точность, по сравнению со стандартом IPC: Для случая 50 Ом погрешность составила около 4%, а для случая 90 Ом – не превысила 9%, что не превышает рамок, установленных при наличии согласующих резисторов погрешностью, соответственно, 1% и 5%. Однако данный метод может использоваться лишь для строго ограниченного круга задач, часть из которых решается по экспериментальным данным, приведенным в литературе в виде графиков. Из-за этого, а также из-за необходимости высчитывать значения эллиптических интегралов первого рода (табличные значения) данный метод неприемлем для решения задач проектирования электронных модулей.
3. Программный комплекс Speed2000 показал наибольшую точность расчета. Для случая 50 Ом погрешность составила около 0,15%, а для 90 Ом – менее 0,1%. Однако, данный метод имеет ограниченную область расчета, вне которой, а также при граничных условиях, погрешность достаточно велика. Кроме того, как и любой

специализированный зарубежный программный продукт Speed2000 имеет немалую стоимость и не может быть использован, в том числе, небольшими компаниями, а также требует отдельного многоступенчатого обучения.

- И, наконец, комплекс Compliance компании Quantic EMC показал меньшую точность расчета, однако в данном случае погрешность не превысила 3,3%. Однако данный способ имеет все те же самые минусы, которые были описаны для Speed2000.

### **Анализ погрешностей привносимых технологическими процессами производства**

Как показано в [5] определенный и довольно существенный вклад в варьирование значения волнового сопротивления, а, следовательно, и коэффициента отражения, вносят технологические процессы производства печатных плат и электронных модулей. Вот лишь некоторые данные о погрешностях электрофизических параметров, вносимых различными производственными операциями:

- Нанесение паяльной маски: порядка 0,2% при изменении толщины паяльной маски на 5 мкм;
- Варьирование материала паяльной маски от производителя к производителю и от партии к партии: порядка 0,238% при изменении величины диэлектрической проницаемости на 0,4;
- Варьирование материала печатных плат от производителя к производителю и от партии к партии: порядка 0,918% при изменении величины диэлектрической проницаемости всего на 0,1;
- Варьирование материала влагозащитного покрытия от производителя к производителю и от партии к партии: порядка 0,27% при изменении величины диэлектрической проницаемости на 0,4;

Нанесение влагозащитного покрытия: порядка 0,69% при изменении толщины влагозащитного покрытия на 50 мкм

Таким образом, если просуммировать полученные отклонения, то погрешность, вносимая только на этапе производства, может достигать в среднем 2,316% и более. И это не считая погрешностями, вносимыми конструкцией проводников: сужение длины, подтравы, неровности и т.д.

Тогда с учетом оговоренных ранее условий, накладываемых требованиями к коэффициенту отражения и погрешностью согласующих резисторов, получается, что на погрешность расчета по самым оптимистичным прогнозам не может превышать:

- В случае согласующего резистора с погрешностью 5%:  $5\% - 2,316\% = 2,684\%$
- В случае согласующего резистора с погрешностью 1%:  $9,4\% - 2,316\% = 6,716\%$

### **Вывод**

Полученные данные свидетельствуют о том, что с постоянным усложнением электронных изделий, повышением быстродействия нужно особенно внимательно и ответственно подходить к вопросу правильного выбора инструментария при разработке современных высокотехнологичных продуктов. Методы, успешно использовавшиеся еще несколько лет назад, уже не отвечают современным требованиям, предъявляемым к разработкам.

Сложные зарубежные программные комплексы требуют больших инвестиций и обучения специалистов. Данные комплексы не могут использоваться в качестве помощника на всех этапах проектирования и производства электронных модулей. Для преодоления этих трудностей необходим российский продукт, который позволит не только сделать анализ электрофизических параметров печатных плат более доступным, но также, благодаря непосредственному расчету электростатических полей, обеспечить необходимую точность при любых изменениях и нововведениях в проектировании и производстве электроники.

### **Литература**

- Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. – М.: Издательский Дом "Технологии", 2006.
- IPC-2141A Design Guide for High Speed Controlled Impedance Circuit Boards
- <http://www.mouser.com/>

7. Ю.Я. Йоссель, Э. С. Кочанов, М.Г. Струнский. Расчет электрической емкости. – 2-е изд. Перераб. И доп. – Л.: Энергоиздат. 1981.
8. Дипломная работа Соловьева А.В. «Анализ влияния технологии производства электронных модулей на их функционирование» МИЭМ., Москва, 2006.
9. Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., 1970.