



# Расчет волнового сопротивления

Руководство по Altium Designer

The image shows a 3D cutaway of a PCB with 14 internal layers. A table is overlaid on the cutaway, listing the properties of each layer. The table has columns for #, Name, Material, Type, Weight, and Thickness. The layers are numbered 1 through 14, with names like 1\_Top, 2\_int1\_(gnd), 3\_int2\_(power), etc. The materials are TU-883, and the types are Signal, Core, or Prepreg. The weights are 1/2oz, and the thicknesses are 0.127mm, 0.178mm, or 0.203mm.

#	Name	Material	Type	Weight	Thickness
	Top Overlay		Overlay		0.0001mm
	Top Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.1mm
1	1_Top	TU-883	Signal	1/2oz	0.127mm
	Dielectric 1		Core		0.178mm
2	2_int1_(gnd)	TU-883	Signal	1/2oz	0.127mm
	Dielectric 2		Core		0.178mm
3	3_int2_(power)	TU-883	Signal	1/2oz	0.127mm
	Dielectric 3		Core		0.178mm
4	4_int3_(gnd)	TU-883	Signal	1/2oz	0.127mm
	Dielectric 4		Core		0.178mm
5	5_int4_(sign)	TU-883	Signal	1/2oz	0.127mm
	Dielectric 5		Core		0.178mm
6	6_int5_(power)	TU-883	Signal	1/2oz	0.127mm
	Dielectric 6		Core		0.178mm
7	7_int6_(sign)	TU-883	Signal	1/2oz	0.127mm
	Dielectric 7		Core		0.178mm
8	8_int7_(power)	TU-883	Signal	1/2oz	0.127mm
	Dielectric 8		Core		0.178mm
9	9_int8_(gnd)	TU-883	Signal	1/2oz	0.127mm
	Dielectric 9		Core		0.178mm
10	10_int9_(sign)	TU-883	Signal	1/2oz	0.127mm
	Dielectric 10		Core		0.178mm
11	11_int10_(gnd)	TU-883	Signal	1/2oz	0.127mm
	Dielectric 11		Core		0.178mm
12	12_int11_(sign)	TU-883	Signal	1/2oz	0.127mm
	Dielectric 12		Core		0.178mm
13	13_int12_(gnd)	TU-883	Signal	1/2oz	0.127mm
	Dielectric 13		Core		0.178mm
14	14_int13_(power)	TU-883	Signal	1/2oz	0.127mm
	Dielectric 14		Core		0.178mm
	14_int14_(gnd)	TU-883	Signal	1/2oz	0.127mm

## ВВЕДЕНИЕ

В современных устройствах сигналы смещаются в область все более высоких частот, сокращается фронт сигнала (1 нс и менее), повышается быстродействие (десятки ГГц). Это требует применения печатных плат (ПП) с контролируемым импедансом – для предотвращения искажений сигнала при передаче его по проводникам.

Проводник на ПП – это уже не просто дорожка, связывающая контактные площадки и переходные отверстия, а линия передачи (ЛП), которая должна передавать сигнал с малыми потерями формы, амплитуды и скорости.

При проектировании ПП, разработчик должен определить, в каких слоях располагаются проводники (или дифференциальные пары) с контролем импеданса, а в каких слоях – опорные полигоны земли и питания. Задача разработчика – провести предварительные вычисления структуры печатной платы и спроектировать ее с учетом рассчитанных значений ширины проводника в заданных слоях.

Современная САПР для проектирования ПП должна поддерживать различные структуры ЛП, учитывать как можно больше параметров, которые могут повлиять на расчет импеданса. Калькулятор импедансов должен использовать максимально точные формулы для расчета.

Контролируемый импеданс на ПП поднимает на новый уровень сам процесс проектирования, выбора материала, структуры, а также производство печатных плат.

## ПРЕИМУЩЕСТВА КАЛЬКУЛЯТОРА ИМПЕДАНСА В ALTIUM DESIGNER

- Использование библиотеки материалов
- Расчет линий передач для нескольких значений импеданса (в том числе на одном слое)
- Автоматический расчет импеданса
- Представление полной информации о ЛП, включая состав слоев с параметрами и конструкцией ЛП (взаимосвязь стека ПП и ЛП)
- Расчет для разных конструкций линий: одиночных, дифференциальных и копланарных
- Поддержка различных структур линий:
  - микрополосковые – это внешние слои
  - полосковые – линии, которые находятся внутри стека, в том числе и несимметричные.
  - заглубленные – слой, который может быть покрыт диэлектриком с внешней стороны
- Поддержка несколько диэлектриков с разными толщинами и разной диэлектрической проницаемостью (Dk)
- Учет бокового подтравива проводника
- Учет толщины маски над проводником и над платой
- Выбор модели и параметров шероховатости
- Расчет задержки ЛП
- Расчет индуктивности ЛП
- Расчет емкости ЛП

# РАСЧЕТ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В САПР ALTIUM DESIGNER

## ПРИМЕР РАСЧЕТА ИМПЕДАНСА ДЛЯ ЛП

Проектируя ПП с контролируемым волновым сопротивлением, разработчику необходимо свести к минимуму затраты на изготовление, поэтому уже на начальной стадии инженер ориентируется на определенные параметры толщины проводника и зазора. Далее под выбранные параметры разработчик старается подобрать материалы и стек печатной платы. Ниже приведен пример, как можно это сделать, используя Layer Stack Manager (LSM), и расчет импеданса. Стоит отметить, что возможна и обратная ситуация в проектах, когда стек является константой и пользователь должен определить ширину проводника и зазор.

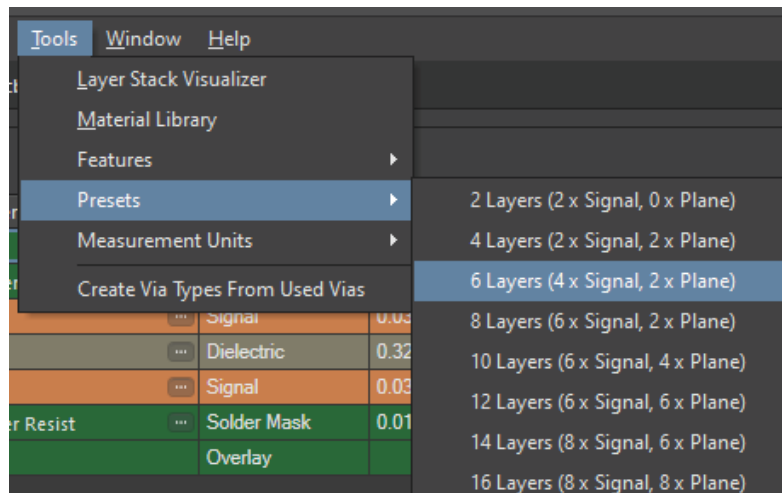
### Пример:

Необходимо спроектировать микрополосковые дифференциальные ЛП на внешних слоях в составе 6 слойной платы. Даны исходные параметры линии:

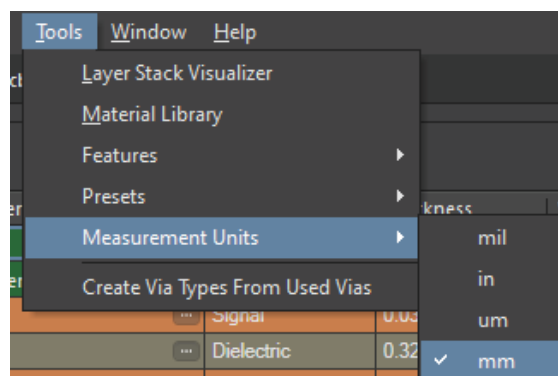
- ширина линии 0,2 мм
- зазор между линиями 0,2 мм
- импеданс 100 Ом, допуск не более 5%

Необходимо подобрать материалы для стека.

1. Загрузить в LSM стек ПП 6 слоев.

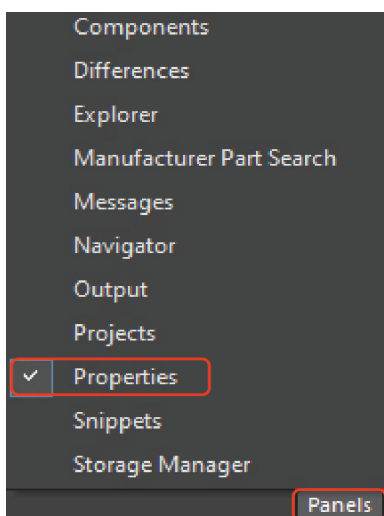


2. Переключить систему единиц на mm (миллиметры).

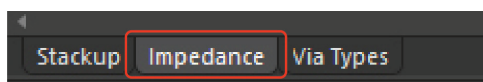


# РАСЧЕТ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В САПР ALTIUM DESIGNER

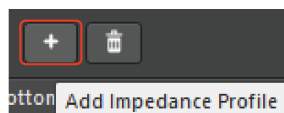
- Открыть панель *Properties* с помощью кнопки **Panels**, которая находится внизу справа от рабочей области, выбрав пункт **Properties** в меню кнопки. Данная панель должна быть всегда открыта при работе в LSM.



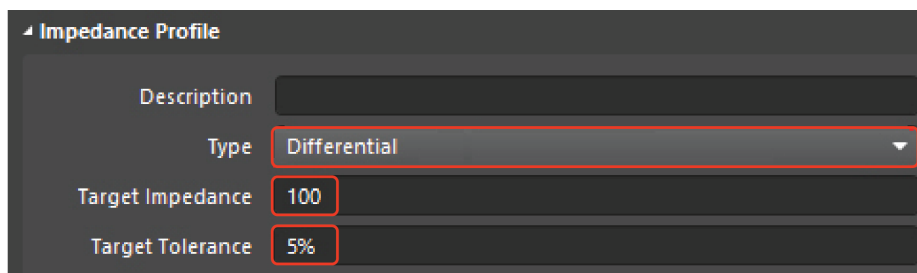
- Выбрать вкладку **Impedance** в LSM.



- Добавить профиль импеданса.



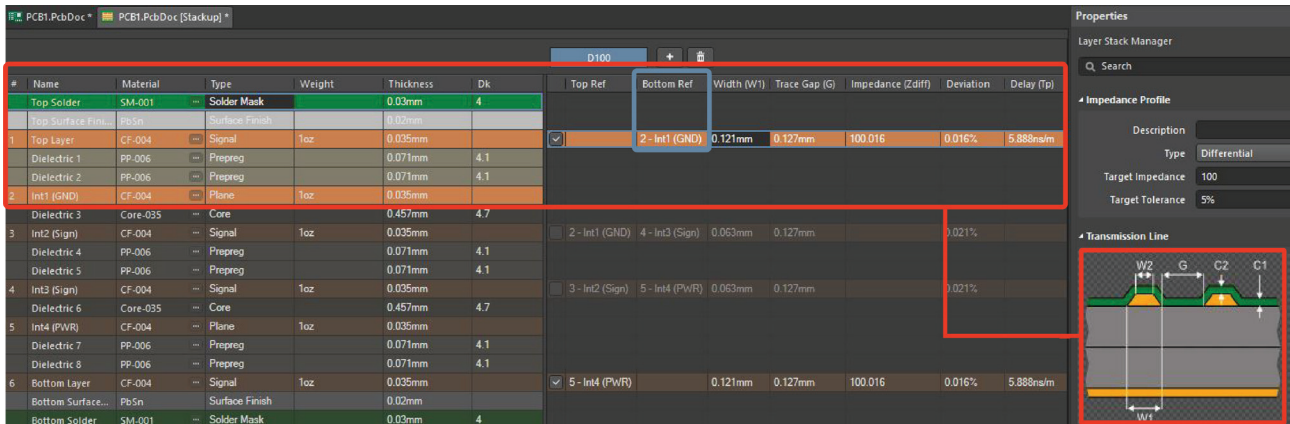
- В панели *Properties* в разделе **Impedance Profile** выбрать тип линии **Differential**.
- В поле **Target Impedance** установить значение целевого импеданса **100**.
- В поле **Target Tolerance** установить допуск расчета **5**.



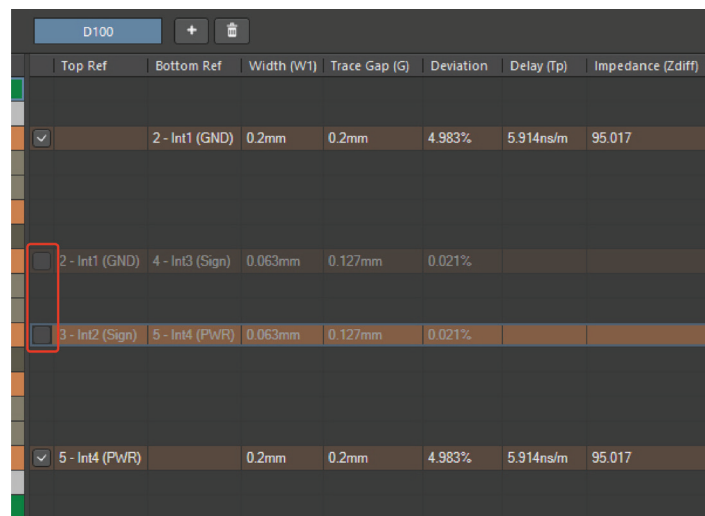
# РАСЧЕТ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В САПР ALTIUM DESIGNER

- Выбрать слой, в котором будет располагаться ЛП. Для примера нужно указать первый слой (Top Layer) в профиле импеданса – подсветятся все слои в стеке, которые участвуют в расчете данной ЛП (отображают состав и параметры ЛП). В профиле импеданса в колонке **Bottom Ref** – выбрать ближайший опорный слой 2 - Int1 (GND).

В панели *Properties* в разделе **Transmission Line**, отображается выбранная конструкция ЛП.

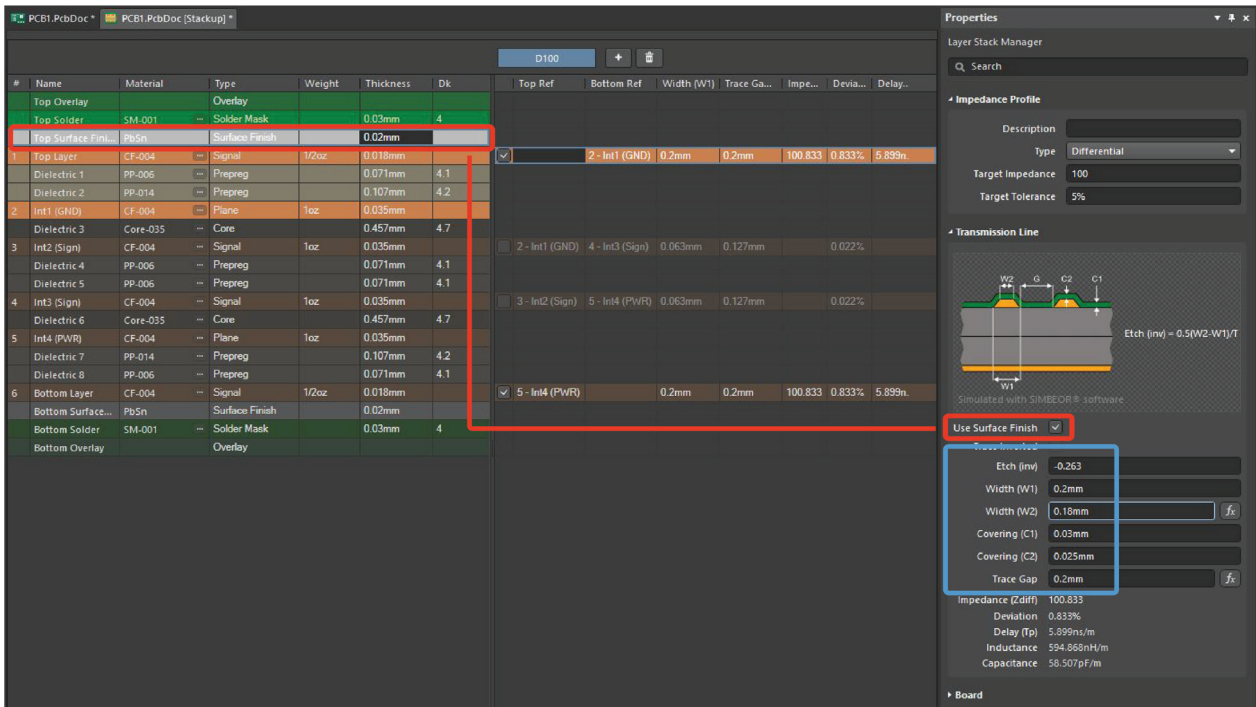


- Отключить слои 3-Int2 (Sign) и 4-Int3 (Sign) в профиле, так как исходная задача предполагает расчет только микрополосковых ЛП.

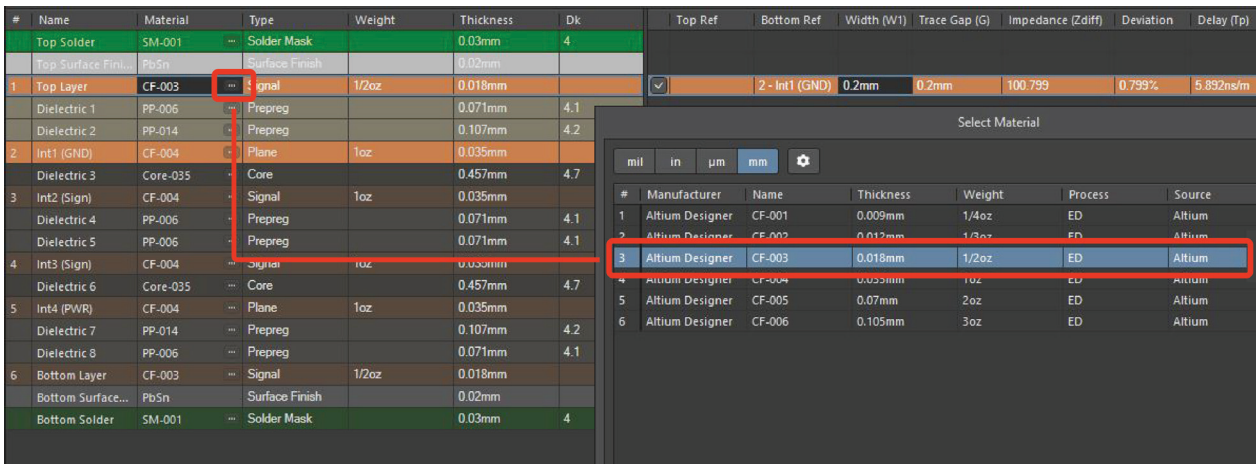


- Поставить флаг использования финишного покрытия в панели *Properties*, для этого в стеке должен присутствовать слой финишного покрытия.
- В панели *Properties* изменить ширину линии  $W1 = 0.2\text{mm}$ ,  $W2 = 0.18\text{mm}$ . Боковой подтрав ( $W2$ ) устанавливается в зависимости от технологических особенностей завода.
- Изменить толщину маски над платой  $C1 = 0.03\text{mm}$ , над проводником  $C2 = 0.025\text{mm}$ . Параметр зависит от материала и технологических особенностей завода, как правило толщина маски над диэлектриком и над проводником отличаются.
- Установить зазор между линиями в дифференциальной паре  $G = 0.2\text{mm}$ .

# РАСЧЕТ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В САПР ALTIUM DESIGNER

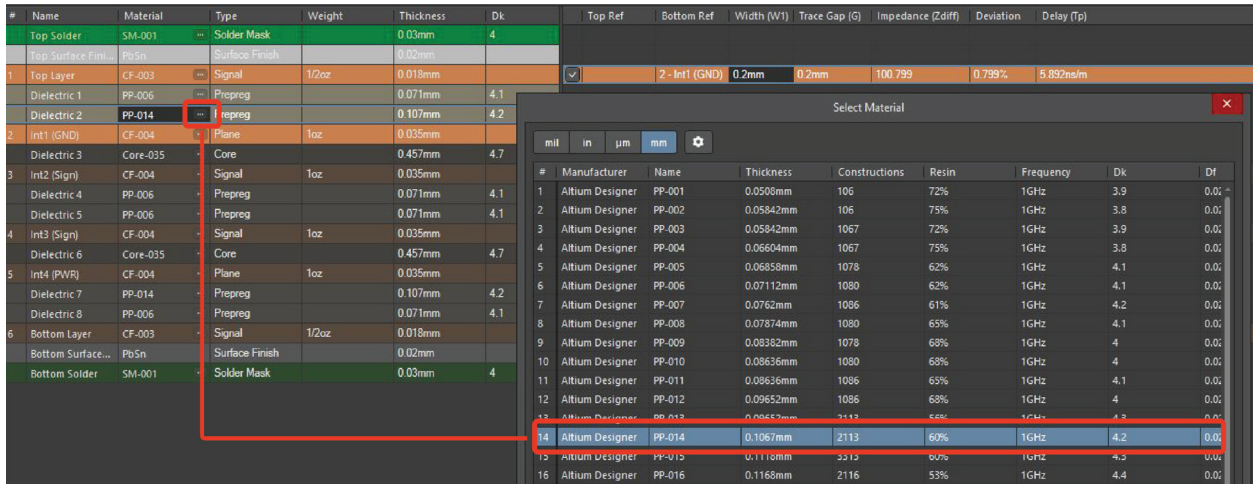


15. Для меди на внешних слоях выбрать из библиотеки материал со значением **Weight = 1/2 oz (Thickness = 0.018mm)**. Так как толщина меди влияет на импеданс, а общая толщина на внешних слоях металлического слоя будет складываться из толщины меди и финишного покрытия, то возможно изменить толщину меди, чтобы подогнать расчет под заданный импеданс. Такой материал должен быть доступен на заводе.

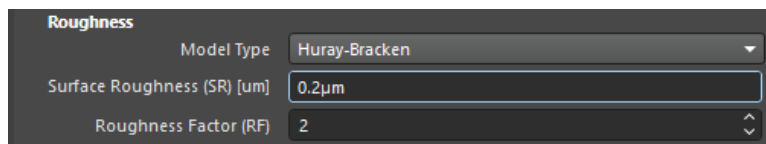


16. Изменить препрег для слоя Dielectric 2 на PP-014 (Thickness = 0.107mm и Dk = 4.2). Также на расчет импеданса в большей степени влияет толщина диэлектрика, ширина проводника и в меньшей степени параметр Dk. В данном примере нужно поднять уровень импеданса, при этом ширину проводника менять не можем. Самое простое решение – использовать более толстый диэлектрик. Конечно, инженеру необходимо постоянно контактировать с заводом, чтобы материал был в наличии и такое решение было технологичным.

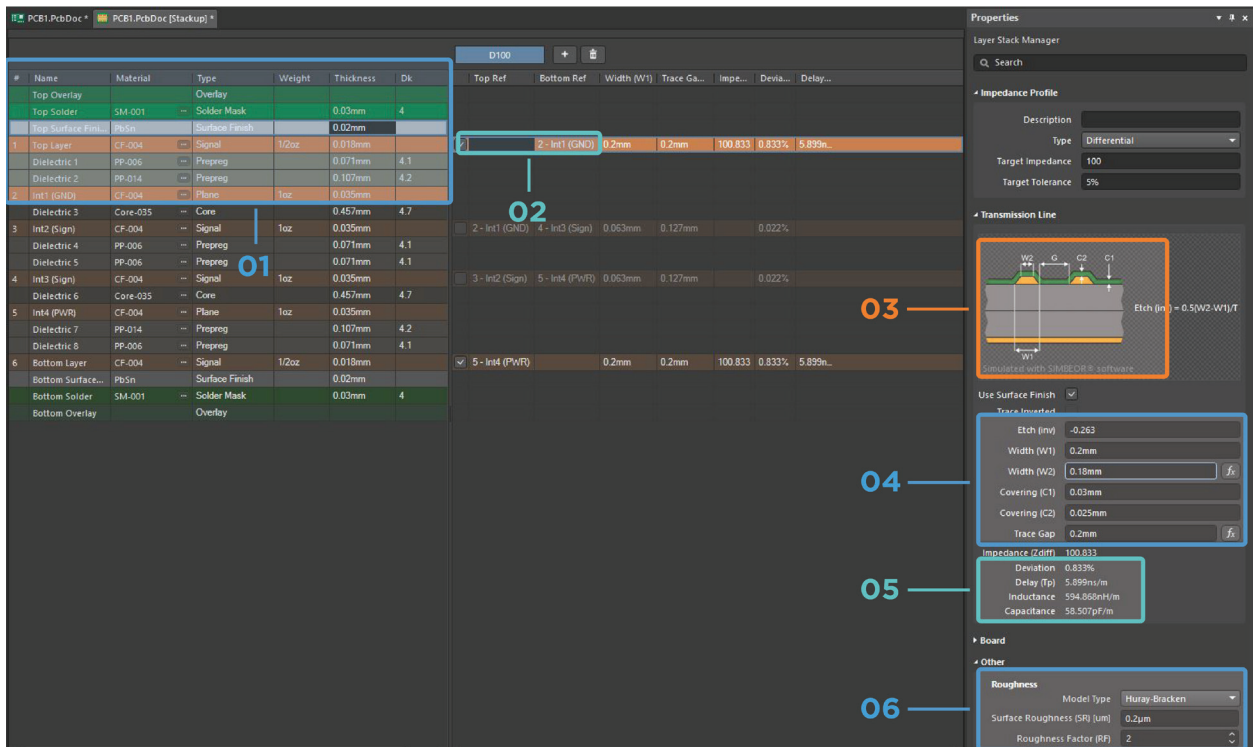
# РАСЧЕТ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В САПР ALTIUM DESIGNER



17. В панели *Properties* в разделе **Other** задать модель и параметры шероховатости. Для примера настройки шероховатости меди использовать **Model Type** – Huray-Bracken, **SR** = 0.2mm, **RF** = 2. Данный параметр задается для высокоскоростных линий передач.



18. Вид вкладки **Impedance** после изменений всех расчетов:



01 - Состав линии передачи

03 - Структура линии передачи

05 - Параметры линии передачи

02 - Опорные слои

04 - Дополнительные параметры

06 - Шероховатость

# РАСЧЕТ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В САПР ALTIUM DESIGNER

## 19. Итоговый расчет импеданса

Параметры	Описание	Zdiff (расчетное), Ом
Все параметры учтены (базовый расчет)	Заданное значение импеданса: Zdiff = 100 Ом	
	Параметры стека: H1 = 0,107 мм, Dk1 = 4,2, H2 = 0,071 мм, Dk2 = 4,1, T=0,038 мм, W1 = 0,2 мм W2 = 0,18 мм, Trace Gap (G) = 0,2 мм, Surface Finish = 0,02 мм	100,8
	Паяльная маска: C1 = 0,03 мм, C2 = 0,025 мм, CDk = 4	
	Шероховатость: Model Type – Huray-Bracken, SR = 0,2 мкм, RF = 2	
Маска одной высоты	C1 = C2 = 0,03 мм, другие параметры без изменений по сравнению с базовым расчетом	100,7
Без учета шероховатости меди	Если тип модели <b>Flat Conductors</b> и SR = 0,1мкм, другие параметры без изменений по сравнению с базовым расчетом	100,6
Без учета бокового подтрава	Если W2 = 0,2 мм, другие параметры без изменений по сравнению с базовым расчетом	98,6
Без учета финишного покрытия	Параметр Surface Finish отключен, другие параметры без изменений по сравнению с базовым расчетом	105,1

Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Top Ref	Bottom Ref	Width (W1)	Trace Ga...	Impedance (Zdiff)	Deviation
Top Overlay		Overlay									
Top Solder	SM-001	Solder Mask		0.03mm	C1 4 CDk						
Top Surface Finish	PbSn	Surface Finish		0.02mm							
Top Layer	CF-003	Signal	1/2oz	0.018mm		2 - Int1 (GND)		0.2mm	0.2mm	100.799	0.799%
Dielectric 1	PP-006	Prepreg		0.071mm	H2, 4.1 Dk2						
Dielectric 2	PP-014	Prepreg		0.107mm	H1 4.2 Dk1						
Int1 (GND)	CF-004	Plane	1oz	0.035mm							

Parameter	Value	Condition
Use Surface Finish	<input checked="" type="checkbox"/>	*5 if no use SF
Trace Inverted		
Etch (inv)	-0.263	
Width (W1)	0.2mm	
Width (W2)	0.18mm	*4 if W2 = 0.2 mm
Covering (C1)	0.03mm	
Covering (C2)	0.025mm	*2 if C2 = 0.03 mm
Trace Gap	0.2mm	
Impedance (Zdiff)	100.799	*1 default value Zdiff = 100.8
Deviation	0.799%	*2 then Zdiff = 100.7
Delay (Tp)	5.9ns/m	*3 then Zdiff = 100.6
Inductance	594.698nH/m	*4 then Zdiff = 98.6
Capacitance	58.529pF/m	*5 then Zdiff = 105.1
<b>Board</b>		
<b>Other</b>		
<b>Roughness</b>	Model Type	Huray-Bracken *3 if Flat Conductors
	Surface Roughness (SR) [um]	0.2um *3 if 0.1um
	Roughness Factor (RF)	2



# РАСЧЕТ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В САПР ALTIUM DESIGNER

## СРАВНЕНИЕ ОСНОВНЫХ КАЛЬКУЛЯТОРОВ ПО ФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ВОЗМОЖНОСТЯМ

№	Параметры	Altium Designer	Калькулятор высшего класса	Калькулятор, встроенный в САПР ПП	Онлайн-калькулятор
1	Полосковые/микроросковые ЛП	✓	✓	✓	✓
2	Библиотека материалов	✓	-	-	✓
3	Взаимосвязь стека и ЛП	✓	-	✓	-
4	Копланарные ЛП	✓	✓	-	-
5	Диэлектрики с разными толщинами и разным Dk	✓	✓	✓	-
6	Расчет подтравы проводника	✓	✓	✓	-
7	Расчет толщины маски над проводником и над платой	✓	✓	-	-
8	Возможно выбрать модель и задать параметры шероховатости	✓	✓	✓	-
9	Цена	Бесплатно	\$\$\$	\$	Бесплатно
10	Поставка	В составе САПР ПП	Отдельное ПО	В составе САПР ПП	Веб-страница

## СРАВНЕНИЕ ОСНОВНЫХ КАЛЬКУЛЯТОРОВ ПО ТОЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ

### Исходные данные:

- Модель и значения шероховатости для меди не задается. В Altium Designer используется модель по умолчанию Flat Conductors (SR = 0,1 мкм, RF = 2)
- T – высота меди с учетом финишного покрытия (мм)
- H – высота диэлектрика (мм), 1,2,3... нумерация диэлектриков снизу вверх в ЛП
- Dk – диэлектрическая постоянная, 1,2,3... нумерация соответствующих диэлектриков
- W1 – ширина линии без учета подтравы (мм)
- W2 – ширина линии с учетом подтравы (мм)
- C1 – толщина маски над диэлектриком (мм)
- C2 – толщина маски над проводником (мм)
- G – зазор между линиями в дифференциальной паре (мм)
- S – зазор до опорного слоя для копланарных линий (мм)

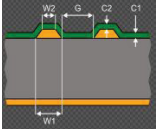
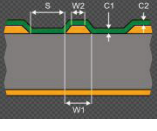
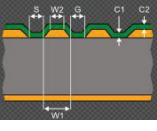
### Пример:

#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Top Ref	Bottom Ref	Width (W1)	Impedance (Z0)
	Top Solder	SM-001	Solder Mask		0.03mm	C1				
	Top Surface Fini...	PbSn	Surface Finish		0.02mm					
1	Top Layer	CF-004	Signal	1oz	0.035mm	T				
	Dielectric 1	PP-006	Prepreg		0.071mm	H3				
	Dielectric 2	PP-013	Prepreg		0.097mm	H2				
	Dielectric 9	PP-019	Prepreg		0.165mm	H1				
2	Int1 (GND)	CF-004	Plane	1oz	0.035mm				0.55mm	51.2

# РАСЧЕТ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В САПР ALTIUM DESIGNER

№	Тип линии передачи и исходные данные	Altium Designer	Калькулятор высшего класса	Калькулятор, встроенный в САПР ПП	Онлайн-калькулятор
		Значение импеданса, Ом			
Одиночная ЛП (целевой импеданс = 50 Ом)					
1	 <p><math>T = 0.055, H1 = 0.1,</math> <math>Dk1 = 4.6, W1 = 0.16,</math> <math>W2 = 0.14</math></p>	50,34	49,35	49,7	49,52 (без W2)
Одиночная ЛП (целевой импеданс = 50 Ом)					
2	 <p><math>T = 0.055, H1 = 0.1,</math> <math>Dk1 = 4.5, W1 = 0.14,</math> <math>W2 = 0.12, C1 = 0.03,</math> <math>C2 = 0.02, CDk = 4</math></p>	50,05	49,52	49,00 $C1 = C2 =$ 0,03	48,46 (без W2,C1, CDk)
Одиночная ЛП (целевой импеданс = 50 Ом)					
3	 <p><math>T = 0.055, H1 = 0.08,</math> <math>Dk1 = 4.2, H2 = 0.12,</math> <math>Dk2 = 4.4, H3 = 0.1,</math> <math>Dk3 = 4.6, W1 = 0.5,</math> <math>W2 = 0.48, C1 = 0.03,</math> <math>C2 = 0.02, CDk = 4</math></p>	50,07	не поддерживается	49,9 $C1 = C2 =$ 0,03	не поддерживается
Одиночная ЛП (целевой импеданс = 50 Ом)					
4	 <p><math>T = 0.035, H1 = 0.2,</math> <math>Dk1 = 4.2, H2 = 0.2,</math> <math>Dk2 = 4.2, W1 = 0.3,</math> <math>W2 = 0.28</math></p>	49,85	49,74	49,4	48,68 (без W2)
Одиночная ЛП (целевой импеданс = 50 Ом)					
5	 <p><math>T = 0.035, H1 = 0.2,</math> <math>Dk1 = 4.4, H2 = 0.2,</math> <math>Dk2 = 4.4, W1 = 0.15,</math> <math>W2 = 0.13</math></p>	50,11	50,80	49,00	47,89 (без W2)
Одиночная ЛП (целевой импеданс = 50 Ом)					
6	 <p><math>T = 0.035, H1 = 0.18,</math> <math>Dk1 = 4, H2 = 0.16,</math> <math>Dk2 = 4.2, H3 = 0.14,</math> <math>Dk3 = 4.4, H4 = 0.12,</math> <math>Dk3 = 4.6, W1 = 0.13,</math> <math>W2 = 0.11</math></p>	50,40	не поддерживается	49,40	не поддерживается

# РАСЧЕТ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В САПР ALTIUM DESIGNER

№	Тип линии передачи и исходные данные	Altium Designer	Калькулятор высшего класса	Калькулятор, встроенный в САПР ПП	Онлайн-калькулятор	Значение импеданса, Ом	
Дифференциальная ЛП (целевой импеданс = 100 Ом)							
7	 <p> <math>T = 0.055</math>, <math>H1 = 0.2</math>,  <math>Dk1 = 4</math>, <math>W1 = 0.14</math>,  <math>W2 = 0.12</math>, <math>C1 = 0.03</math>,  <math>C2 = 0.02</math>, <math>CDk = 4</math>,  <math>G = 0.13</math> </p>	99,99	99,58	99,5 $C1 = C2 =$ 0,03	105,74 (без W2, C1, CDk)		
Одиночная копланарная ЛП (целевой импеданс = 50 Ом)							
8	 <p> <math>T = 0.055</math>, <math>H1 = 0.17</math>,  <math>Dk1 = 4.5</math>, <math>W1 = 0.14</math>,  <math>W2 = 0.12</math>, <math>C1 = 0.03</math>,  <math>C2 = 0.02</math>, <math>CDk = 4</math>,  <math>S = 0.1</math> </p>	50,07	50,24	не поддерживается	не поддерживается		
Дифференциальная копланарная ЛП (целевой импеданс = 100 Ом)							
9	 <p> <math>T = 0.055</math>, <math>H1 = 0.5</math>,  <math>Dk1 = 4.3</math>, <math>W1 = 0.16</math>,  <math>W2 = 0.14</math>, <math>C1 = 0.03</math>,  <math>C2 = 0.02</math>, <math>CDk = 4</math>,  <math>S = 0.1</math>, <math>G = 0.2</math> </p>	99,90	100,2	не поддерживается	не поддерживается		

## ВЫВОДЫ

- Для проектирования высокоскоростных и высокочастотных устройств современная САПР должна поддерживать различные структуры ЛП. В отличие от других систем, Altium Designer поддерживает большинство из них.
- Для точного расчета волнового сопротивления необходимо учитывать различные параметры, такие как высота маски, подтрав, шероховатость. Это особенно актуально для высокоскоростных устройств. Altium Designer в полной мере позволяет это делать.
- Расчет импеданса ЛП происходит в составе всего стека, что позволяет инженеру видеть картину в целом.
- Волновое сопротивление во многом зависит от материала. Такие параметры, как содержание смолы, плотность сетки, влияют на диэлектрическую проницаемость, а значит и на импеданс. Применение библиотеки позволяет быстро подобрать необходимый материал и тем самым сократить время проектирования структуры линии передачи.
- При проектировании аппаратуры с контролируемым волновым сопротивлением используют расчеты, позволяющие прогнозировать емкость и индуктивность, от которых зависит волновое сопротивление. Формулы, используемые в Altium Designer, основаны на эмпирических зависимостях и уникальны для различных конфигураций.