

Расчет волнового сопротивления в САПР Altium Designer

Кухарук В.С.

Введение

В современных устройствах сигналы смещаются в область все более высоких частот, сокращается фронт сигнала (1 нс и менее), повышается быстродействие (десятки ГГц). Этот факт 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 импеданса 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 нескольких 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

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 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.

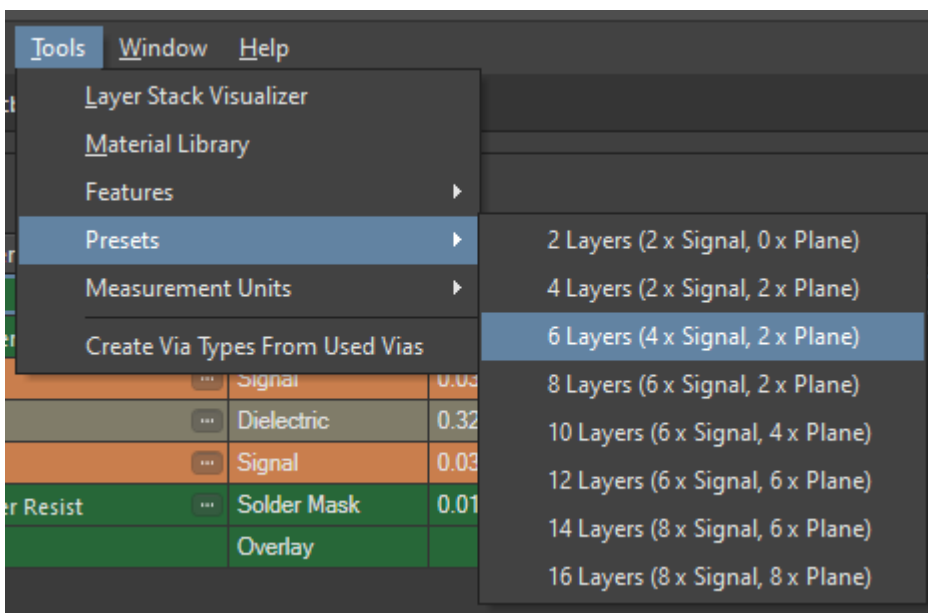
Пример:

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

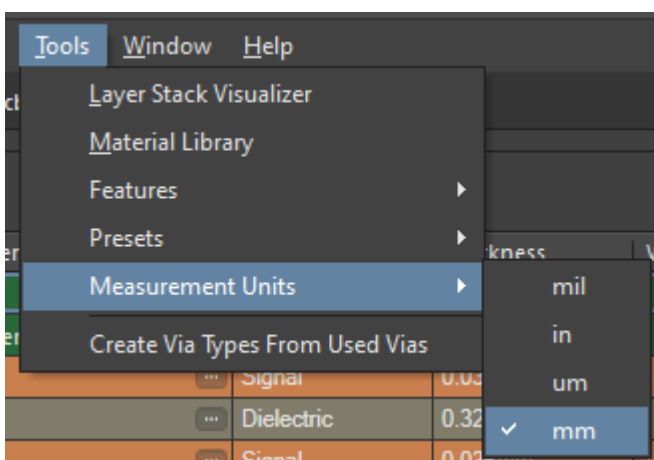
- ширина линии 0,2 мм
- зазор между линиями 0.2 мм
- импеданс 100 Ом, допуск не более 5%

Необходимо подобрать материалы для стека.

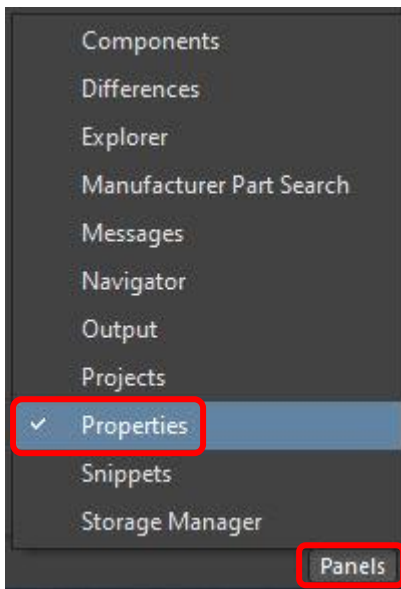
1. Загрузить стек ПП 6 слоев в LSM.



2. Переключить систему единиц на мм



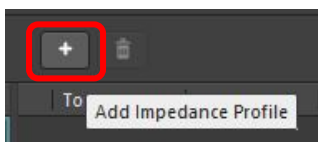
3. Через панель **Panels**, которая находится внизу - слева рабочей области, выбрать панель **Properties**. Данная панель должна быть всегда открыта при работе в LSM.



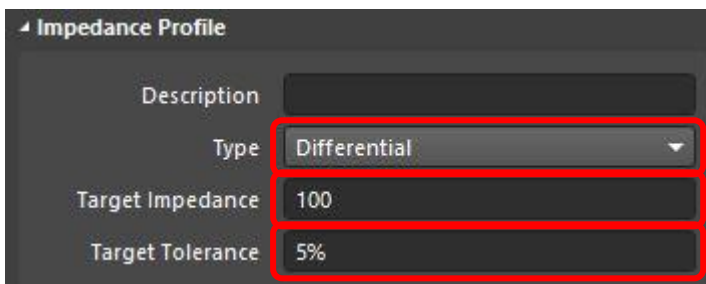
4. Выбрать вкладку **Impedance** в LSM



5. Добавить профиль импеданса

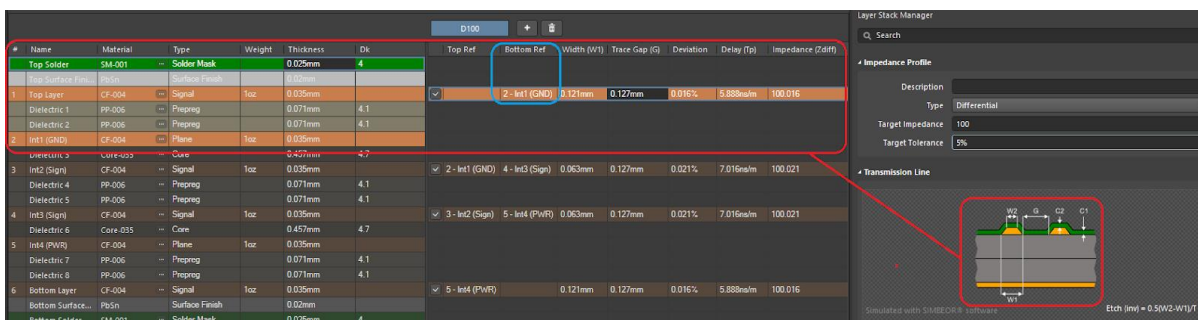


6. В панели **Properties** в разделе **Impedance Profile** выбрать тип линии **Differential**
7. В поле **Target Impedance** установить значение целевого импеданса **100**
8. В поле **Target Tolerance** установить допуск расчета **5**

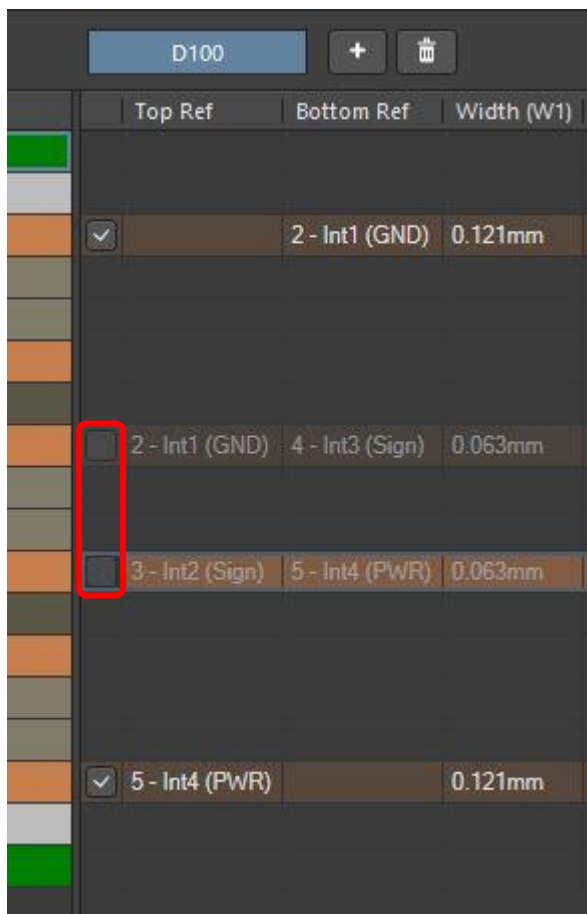


9. Выбрать слой, в котором будет располагаться ЛП. Для примера нужно указать **1 слой (Top Layer)** в профиле импеданса, при этом подсвечиваются все слои в стеке, которые участвуют в расчете данной ЛП (отображаются состав и параметры ЛП). В профиле импеданса в колонке **Bottom Ref** - выбрать ближайший опорный слой **2 - Int1 (GND)**.

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



10. Отключить Слои **3-Int2 (Sign)** и **4-Int3 (Sign)** в профиле, так как исходная задача предполагает посчитать только микрополосковые ЛП.

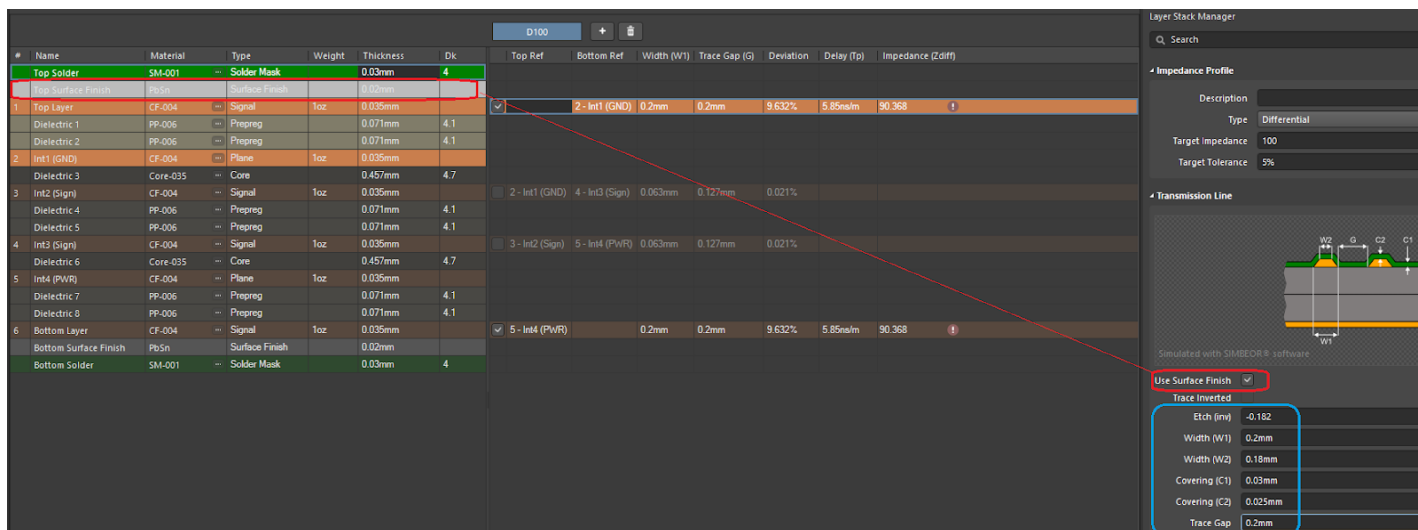


11. Ставим флаг использования финишного покрытия в панели Properties, для этого в стеки должен присутствовать слой финишного покрытия.

12. В панели **Properties** - изменить ширину линии **W1 = 0.2 мм**, **W2 = 0.18 мм**. Подтрав (W2) - боковой подтрав устанавливается в зависимости от технологических особенностей завода.

13. Изменить толщину маски над платой **C1 = 0.03 мм**, над проводником **C2 = 0.025 мм**. Параметр зависит от материала и технологических особенностей завода, как правило толщина маски над диэлектриком и над проводником отличаются.

14. Установить зазор между диф. парами **G = 0.2 мм**.



15. Выбрать другой материал из библиотеки для меди на внешних слоях на значение $\frac{1}{2}$ oz (Thickness = 0.018mm). Так как толщина меди влияет на импеданс, а общая толщина на внешних слоях металлического слоя будет складываться из толщины меди + финишного покрытия, то

возможно изменить толщину меди, чтобы подогнать расчет под заданный импеданс. Если такой материал доступен на заводе.

| # | Name | Material | Type | Weight | Thickness | Dk | Top Ref | Bottom Ref | Width (W1) | Trace Gap (G) | Deviation | Delay (Tp) | Impedance (Zdr) | |
|---|--------------------|----------|----------------|--------|-----------|-----|---------|------------|----------------|---------------|-----------|------------|-----------------|--------|
| | Top Solder | SM-001 | Solder Mask | | 0.03mm | 4 | | | | | | | | |
| | Top Surface Finish | PbSn | Surface Finish | | 0.02mm | | | | | | | | | |
| 1 | Top Layer | CF-003 | Signal | 1/2oz | 0.018mm | | | | 2 - Int1 (GND) | 0.2mm | 0.2mm | 6.844% | 5.929ns/m | 93.156 |
| | Dielectric 1 | PP-006 | Prepreg | | 0.071mm | 4.1 | | | | | | | | |
| 2 | Int1 (GND) | CF-004 | Plane | 1oz | 0.035mm | | | | | | | | | |
| | Dielectric 3 | Core-035 | Core | | 0.457mm | 4.7 | | | | | | | | |
| 3 | Int2 (Sign) | CF-004 | Signal | 1oz | 0.035mm | | | | | | | | | |
| | Dielectric 4 | PP-006 | Prepreg | | 0.071mm | 4.1 | | | | | | | | |
| | Dielectric 5 | PP-006 | Prepreg | | 0.071mm | 4.1 | | | | | | | | |
| 4 | Int3 (Sign) | CF-004 | Signal | 1oz | 0.035mm | | | | | | | | | |
| | Dielectric 6 | Core-035 | Core | | 0.457mm | 4.7 | | | | | | | | |
| 5 | Int4 (PWR) | CF-004 | Plane | 1oz | 0.035mm | | | | | | | | | |
| | Dielectric 7 | PP-006 | Prepreg | | 0.071mm | 4.1 | | | | | | | | |

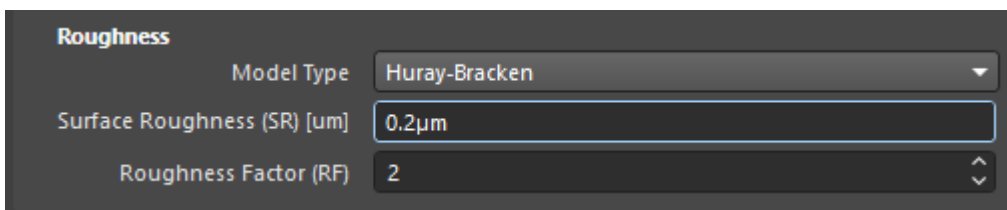
| # | Manufacturer | Name | Thickness | Weight | Process | Source |
|---|-----------------|--------|-----------|--------|---------|--------|
| 1 | Altium Designer | CF-001 | 0.009mm | 1/4oz | ED | Altium |
| 2 | Altium Designer | CF-002 | 0.012mm | 1/3oz | ED | Altium |
| 3 | Altium Designer | CF-003 | 0.018mm | 1/2oz | ED | Altium |
| 4 | Altium Designer | CF-004 | 0.035mm | 1oz | ED | Altium |
| 5 | Altium Designer | CF-005 | 0.07mm | 2oz | ED | Altium |
| 6 | Altium Designer | CF-006 | 0.105mm | 3oz | ED | Altium |

16. Изменить препрег для слоя Dielectric 2 на **PP-014** (Thickness = 0.107 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.

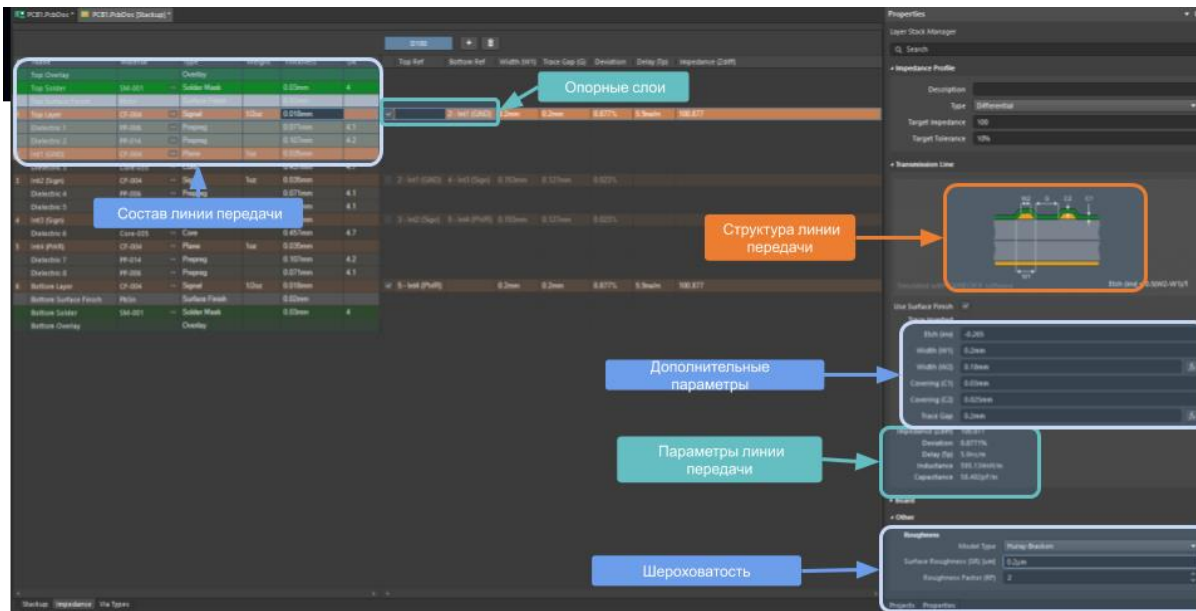
| # | Name | Material | Type | Weight | Thickness | Dk | Top Ref | Bottom Ref | Width (W1) | Trace Gap (G) | Deviation | Delay (Tp) | Impedance (Zdr) | |
|---|-----------------------|----------|----------------|--------|-----------|-----|---------|------------|----------------|---------------|-----------|------------|-----------------|---------|
| | Top Solder | SM-001 | Solder Mask | | 0.03mm | 4 | | | | | | | | |
| | Top Surface Finish | PbSn | Surface Finish | | 0.02mm | | | | | | | | | |
| 1 | Top Layer | CF-003 | Signal | 1/2oz | 0.018mm | | | | 2 - Int1 (GND) | 0.2mm | 0.2mm | 0.638% | 5.89ns/m | 100.638 |
| | Dielectric 1 | PP-006 | Prepreg | | 0.071mm | 4.1 | | | | | | | | |
| 2 | Dielectric 2 | PP-014 | Prepreg | | 0.107mm | 4.2 | | | | | | | | |
| | Int1 (GND) | CF-004 | Plane | | | | | | | | | | | |
| | Dielectric 3 | Core-035 | Core | | | | | | | | | | | |
| 3 | Int2 (Sign) | CF-004 | Signal | | | | | | | | | | | |
| | Dielectric 4 | PP-006 | Prepreg | | | | | | | | | | | |
| | Dielectric 5 | PP-006 | Prepreg | | | | | | | | | | | |
| 4 | Int3 (Sign) | CF-004 | Signal | | | | | | | | | | | |
| | Dielectric 6 | Core-035 | Core | | | | | | | | | | | |
| 5 | Int4 (PWR) | CF-004 | Plane | | | | | | | | | | | |
| | Dielectric 7 | PP-014 | Prepreg | | | | | | | | | | | |
| | Dielectric 8 | PP-006 | Prepreg | | | | | | | | | | | |
| 6 | Bottom Layer | CF-003 | Signal | | | | | | | | | | | |
| | Bottom Surface Finish | PbSn | Surface | | | | | | | | | | | |
| | Bottom Solder | SM-001 | Solder | | | | | | | | | | | |

| # | Manufacturer | Name | Thickness | Constructions | Resin | Frequency | Dk | Df |
|----|-----------------|-------------|-----------|---------------|-------|-----------|------|-------|
| 11 | Rezonit | FR4 HiTg170 | 0.191mm | 7628MR | 46% | 1MHz | 5.14 | 0.018 |
| 12 | Altium Designer | PP-001 | 0.0508mm | 106 | 72% | 1GHz | 3.9 | 0.02 |
| 13 | Altium Designer | PP-002 | 0.05842mm | 106 | 75% | 1GHz | 3.8 | 0.02 |
| 14 | Altium Designer | PP-003 | 0.05842mm | 1067 | 72% | 1GHz | 3.9 | 0.02 |
| 15 | Altium Designer | PP-004 | 0.06604mm | 1067 | 75% | 1GHz | 3.8 | 0.02 |
| 16 | Altium Designer | PP-005 | 0.06858mm | 1078 | 62% | 1GHz | 4.1 | 0.02 |
| 17 | Altium Designer | PP-006 | 0.07112mm | 1080 | 62% | 1GHz | 4.1 | 0.02 |
| 18 | Altium Designer | PP-007 | 0.0762mm | 1086 | 61% | 1GHz | 4.2 | 0.02 |
| 19 | Altium Designer | PP-008 | 0.07874mm | 1080 | 65% | 1GHz | 4.1 | 0.02 |
| 20 | Altium Designer | PP-009 | 0.08382mm | 1078 | 68% | 1GHz | 4 | 0.02 |
| 21 | Altium Designer | PP-010 | 0.08636mm | 1080 | 68% | 1GHz | 4 | 0.02 |
| 22 | Altium Designer | PP-011 | 0.08636mm | 1086 | 65% | 1GHz | 4.1 | 0.02 |
| 23 | Altium Designer | PP-012 | 0.09652mm | 1086 | 68% | 1GHz | 4 | 0.02 |
| 24 | Altium Designer | PP-013 | 0.09652mm | 2113 | 56% | 1GHz | 4.3 | 0.02 |
| 25 | Altium Designer | PP-014 | 0.1067mm | 2113 | 60% | 1GHz | 4.2 | 0.02 |
| 26 | Altium Designer | PP-015 | 0.1118mm | 3313 | 60% | 1GHz | 4.3 | 0.02 |
| 27 | Altium Designer | PP-016 | 0.1168mm | 2116 | 53% | 1GHz | 4.4 | 0.02 |
| 28 | Altium Designer | PP-017 | 0.1295mm | 2116 | 57% | 1GHz | 4.3 | 0.02 |
| 29 | Altium Designer | PP-018 | 0.1524mm | 1652 | 60% | 1GHz | 4.3 | 0.02 |
| 30 | Altium Designer | PP-019 | 0.1651mm | 1506 | 48% | 1GHz | 4.5 | 0.02 |
| 31 | Altium Designer | PP-020 | 0.1727mm | 1506 | 50% | 1GHz | 4.5 | 0.02 |
| 32 | Altium Designer | PP-021 | 0.1803mm | 7628 | 43% | 1GHz | 4.7 | 0.02 |

17. В панели Properties, в разделе Other - задать модель и параметры шероховатости. Для примера настройки шероховатости меди использовать Model Type - Huray-Bracken, SR=0,2, RF=2. Данный параметр задается для высокоскоростных линий передач.



18. Вид вкладки Импеданса после изменений всех расчетов



19. Итоговый расчет импеданса

| Параметры | Описание | Zdiff (расчетное) |
|---------------------------------------|---|-------------------------------|
| Все параметры учтены (базовый расчет) | Заданное значение импеданса: $Z_{diff} = 100 \text{ Ом}$ Параметры стека: $H1 = 0.107 \text{ мм}$, $Dk1 = 4.2$, $H2 = 0.071 \text{ мм}$, $Dk2 = 4.1$, $T = 0.038 \text{ мм}$, $W1 = 0.2 \text{ мм}$, $W2 = 0.18 \text{ мм}$, $\text{Trace Gap (G)} = 0.2 \text{ мм}$, $\text{Surface Finish} = 0.02 \text{ мм}$ Паяльная маска: $C1 = 0.03 \text{ мм}$, $C2 = 0.025 \text{ мм}$, $CDk = 4$ Шероховатость: Model Type-Huray-Bracken, $SR = 0.2 \text{ мкм}$, $RF = 2$ | $Z_{diff} = 100.8 \text{ Ом}$ |
| Маска одной высоты | $C1 = C2 = 0.03 \text{ мм}$, другие параметры без изменений по сравнению с базовым расчетом | $Z_{diff} = 100.7 \text{ Ом}$ |
| Без учета шероховатости меди | Если тип модели = Flat Conductors and $SR = 0.1 \text{ мкм}$, другие параметры без изменений по сравнению с базовым расчетом | $Z_{diff} = 100.6 \text{ Ом}$ |
| Без учета бокового подтрава | Если $W2 = 0.2 \text{ мм}$, другие параметры без изменений по сравнению с базовым расчетом | $Z_{diff} = 98.6 \text{ Ом}$ |
| Без учета финишного покрытия | Surface Finish параметр отключен, другие параметры без изменений по сравнению с базовым расчетом | $Z_{diff} = 105.1 \text{ Ом}$ |

Сравнение основных калькуляторов по функциональным возможностям

| № | Параметры | Altium Designer | High End Calc | Embedded in CAD PCB Calc | Online Calc |
|----|--|-------------------|---------------|--------------------------|--------------|
| 1 | Полосковые/микроросконовые ЛП | V | V | V | V |
| 2 | Библиотека материалов | V | - | - | V |
| 3 | Взаимосвязь стека и ЛП | V | - | V | - |
| 4 | Копланарные ЛП | V | V | - | - |
| 5 | Диэлектрики с разными толщинами и разным Dk | V | V | V | - |
| 6 | Расчет подтрава проводника | V | V | V | - |
| 7 | Расчет толщины маски над проводником и над платой | V | V | - | - |
| 8 | Возможно выбрать модель и задать параметры шероховатости | V | V | V | - |
| 9 | Цена | Бесплатно | \$\$\$ | \$ | Бесплатно |
| 10 | Поставка | В составе САПР ПП | Отдельное ПО | В составе САПР ПП | Веб-страница |

Сравнение основных калькуляторов по точности вычисления

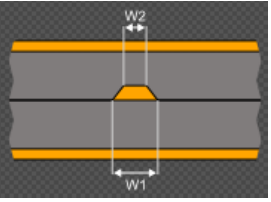
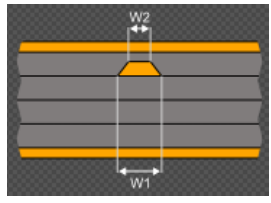
Исходные данные:

- Модель и значения шероховатости для меди - не задается. В AD используются модель по умолчанию - Flat Conductors (SR=0,1um, 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 подтрава (мм)
- W2 - ширина линии с учетом подтрава (мм)
- C1 - толщина маски над диэлектриком (мм)
- C2 - толщина маски над проводником (мм)
- G - Зазор между линиями в диф. паре (мм)
- S - зазор до опорного слоя для копланарных линий (мм)

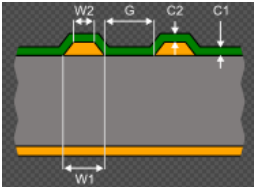
Пример

| # | Name | Material | Type | Weight | Thickness | Dk | Top Ref | Bottom Ref | Width (W1) | Impedance (Z0) | |
|---|---------------|----------|-------------|--------|-----------|----|---------|-------------|------------|----------------|--------|
| | Top Solder | SM-001 | Solder Mask | | 0.03mm | C1 | 4 | CDk | | | |
| 1 | Top Layer | CF-004 | Signal | 1oz | 0.035mm | T | | 2 - Layer 2 | 0.5mm | W1 | 50.578 |
| | Dielectric 1 | PP-006 | Prepreg | | 0.1mm | H3 | 4.6 | Dk3 | | | |
| | Dielectric 2 | PP-006 | Prepreg | | 0.12mm | H2 | 4.4 | Dk2 | | | |
| | Dielectric 10 | PP-006 | Prepreg | | 0.08mm | H1 | 4.2 | Dk1 | | | |
| 2 | Layer 2 | CF-004 | Signal | 1oz | 0.035mm | | | 1 - Top | | 50.004 | |
| | Dielectric 3 | Core-016 | Core | | 0.12mm | | 4.4 | | | | |

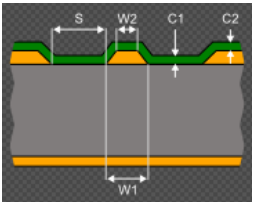
| № | Тип линии передачи и исходные данные | Altium Designer | High End Calc | Embedded in CAD PCB Calc | Online Calc |
|---|---|-----------------|-------------------|--------------------------|------------------------|
| | | | | | |
| Одиночная ЛП (целевой импеданс = 50 Ом) | | | | | |
| 1 | $T=0.055$ $H1=0.1$ $Dk1 = 4.6$ $W1=0.16$ $W2=0.14$ | 50.34 | 49.35 | 49.7 | 49.52 (без W2) |
| 2 | $T=0.055$ $H1=0.1$ $Dk1=4.5$ $W1=0.14$ $W2=0.12$ $C1=0.03$ $C2=0.02$ $CDk=4$ | 50.05 | 49.52 | 49 $C1=C2=0.03$ | 48.46 (без W2,C1, CDk) |
| 3 | $T=0.055$ $H1=0.08$ $Dk1=4.2$ $H2=0.12$ $Dk2=4.4$ $H3=0.1$ $Dk3= 4.6$ $W1=0.5$ $W2=0.48$ $C1=0.03$ $C2=0.02$ $CDk=4$ | 50.07 | не поддерживается | 49.9 $C1=C2=0.03$ | не поддерживается |
| 4 | $T=0.035$ $H1=0.2$ $Dk1=4.2$ $H2=0.2$ $Dk2=4.2$ $W1=0.3$ $W2=0.2$ | 49.85 | 49.74 | 49.4 | 48.68 (без W2) |

| | | | | | | |
|---|---|---|-------|-------------------|------|-------------------|
| 5 | $T=0.035$ $H1=0.2$ $Dk1=4.4$ $H2=0.2$ $Dk2=4.4$ $W1=0.15$ $W2=0.13$ |  | 50.11 | 50.80 | 49 | 47.89 (без W2) |
| 6 | $T=0.035$ $H1=0.18$ $Dk1=4$ $H2=0.16$ $Dk2=4.2$ $H3=0.14$ $Dk3=4.4$ $H4=0.12$ $Dk4=4.6$ $W1=0.13$ $W2=0.11$ |  | 50.40 | не поддерживается | 49.4 | не поддерживается |

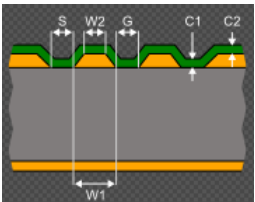
Дифференциальная ЛП (целевой импеданс = 100 Ом)

| | | | | | | |
|---|---|--|-------|-------|----------------------|-----------------------------|
| 2 | $T=0.055$ $H1=0.2$ $Dk1=4$ $W1=0.14$ $W2=0.12$ $C1=0.03$ $C2=0.02$ $CDk=4$ $G=0.13$ |  | 99.99 | 99.58 | 99.5 $C1=C2=0.03$ | 105.74 (без W2, C1, CDk) |
|---|---|--|-------|-------|----------------------|-----------------------------|

Одиночная копланарная ЛП (целевой импеданс = 50 Ом)

| | | | | | | |
|---|---|---|-------|-------|-------------------|-------------------|
| 3 | $T=0.055$ $H1=0.17$ $Dk1=4.5$ $W1=0.14$ $W2=0.12$ $C1=0.03$ $C2=0.02$ $CDk=4$ $S=0.1$ |  | 50.07 | 50.24 | не поддерживается | не поддерживается |
|---|---|---|-------|-------|-------------------|-------------------|

Дифференциальная копланарная ЛП (целевой импеданс = 100 Ом)

| | | | | | | |
|---|---|---|-------|-------|-------------------|-------------------|
| 3 | $T=0.055$ $H1=0.5$ $Dk1=4.3$ $W1=0.16$ $W2=0.14$ $C1=0.03$ $C2=0.02$ $CDk=4$ $S=0.1$ $G=0.2$ |  | 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 программ AD поддерживает большинство из них.
- Для точного расчета волнового сопротивления необходимо учитывать различные параметры, такие как: высота маски, подтрав, шероховатость, что особенно актуально для высокоскоростных устройств. AD 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 AD, основаны на эмпирических зависимостях и уникальны для различных конфигураций.