

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».

Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина

Методические указания к выполнению курсового проекта
«Проектирование гибко-жестких печатных плат в Altium Designer»

По курсу
«Проектирование печатных плат»

Москва, Зеленоград

2024

Оглавление

Оглавление	2
Общая информация	3
Определение компоновки проекта	4
Определение стека	5
Определение гибких и жестких зон	9
Стандартный режим определения стека и зон	20
Особенности подготовки правил разводки топологии	22
Особенности разводки топологии	26
Добавление механических элементов крепежа.....	29
Особенности выпуска комплекта конструкторский документации	31
Литература	38

Общая информация

В данном указании описано как с помощью Altium Designer спроектировать гибко-жесткую печатную плату (Rigid-Flex). Гибко-жесткая печатная плата состоит из нескольких участков с различным стеклом, что позволяет выделить жесткие (Rigid) и гибкие (Flex) зоны. Гибко-жесткую печатную плату может быть полезно применять в случаях, когда изделие должно иметь сложную объемную структуру или необходимо вписаться в малый объем, а при этом разбиение на несколько печатных с добавлением межсоединений необоснованно усложняет изделие с одновременным снижением его надежности. Гибкие части в этом случае выступают в роли шлейфов между участками и при этом обладают достаточной прочностью.

Еще одно частое применение гибко-жестких печатных плат – размещение выносных датчиков на гибких частях или размещение некоторых компонентов на некоторой сложной по форме поверхности.

В документации на Altium Designer выделен отдельный раздел по проектированию гибко-жестких печатных плат [8].

При проектировании использовались рекомендации ООО «Резонит» [12, 13] по технологическим нормам и конструкции печатной платы.

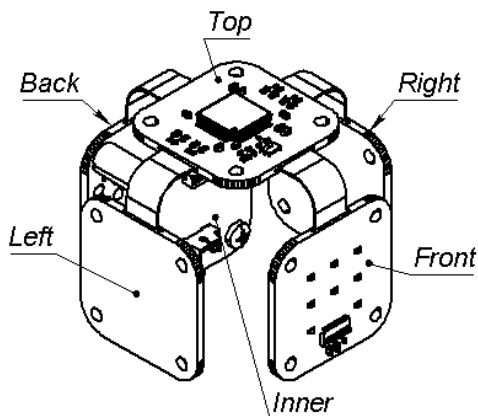
Составление электрической схемы для гибко-жесткой платы ничем не отличается от составления схемы для обычной платы на жестком основании. За исключением рекомендации группировать в схеме компоненты не только логическими блоками, но и по тем жестким зонам, где эти компоненты будут располагаться.

В текущем методическом указании приведены только особенности построения проекта с гибко-жесткой печатной платой при работе с топологией и выпуска конструкторской документации.

Последняя версия данного методического указания вместе с остальными по предмету «Проектирование печатных плат» находится на github в отдельном репозитории автора [6].

Определение компоновки проекта

Решено спроектировать небольшое автономное цифровое устройство, центральным мозгом которого является микроконтроллер STMicroelectronics STM32F103RBT6 [14]. Компоновка выбрана в виде одинаковых граней кубика, причем нижняя грань завернута внутрь и называется внутренней (Inner). На передней грани расположен разъем для подключения TFT-экрана (в проект печатной платы не входит) через FPC-разъем Molex 503480-1000 [15] и модуль подсветки на контроллере Texas Instruments TPS61160DRVT [16], питающий восемь светодиодов Vishay VLMW1300 [17]. На боковых гранях расположены по четыре контактные части под мембранные кнопки диаметра 8 мм. Микроконтроллер расположен на верхней грани. На задней грани располагается вертикальный USB-C разъем Molex 217182-0001 [18] для подачи управления и зарядки, а также служебные кнопки и контактные точки для шлейф-зонда Tag-Connect TC2030-CTX-NL-STDC14 [19], совместимого с программатором STMicroelectronics STLINK-V3 [20]. На внутренней грани расположены контроллер зарядки и питания Analog Devices LTC4067EDE [21] и трехпиновый разъем Molex 53398-4003 [22] для подключения LiPol-аккумулятора с контролем нагрева. Сам LiPol-аккумулятор располагается в получающемся внутреннем объеме и в проект печатной платы не входит. Предлагаемая компоновка показана ниже.

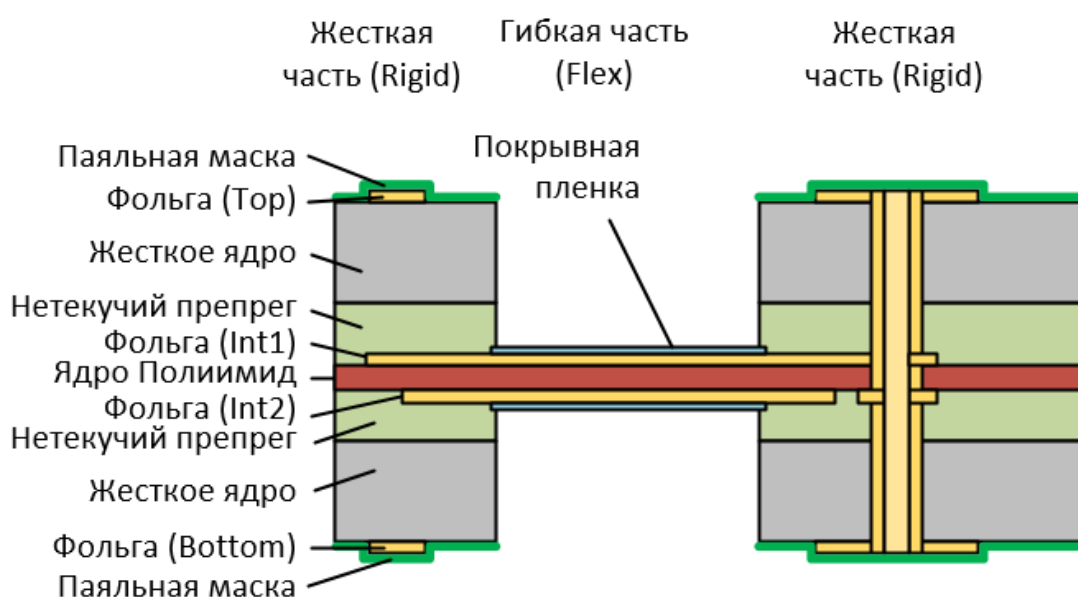


При проектировании гибко-жестких плат необходимо как можно раньше определиться с компоновкой печатной платы, расположением основных компонентов и геометрией гибких и жестких зон. Геометрию гибких и жестких зон необходимо выбирать исходя из того, что проектирование печатной платы в CAD-системах идет в развертке.

Определение стека

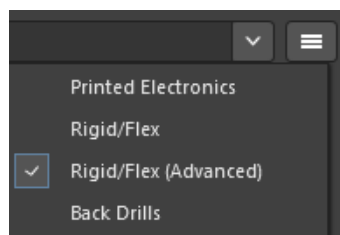
Проектируемое устройство довольно простое, поэтому воспользуемся минимальным по сложности стеком гибко-жесткой платы, где жесткая часть четырехслойная, а гибкая – двухслойная [13].

Общий вид стека показан на рисунке ниже. Несмотря на то, что технология позволяет изготавливать гибко-жесткие печатные платы с несимметричным стеком, гораздо технологичнее будет, если стек сделать симметричным. Также гораздо технологичнее выходит, если жесткие части одинаковы по всей печатной плате.

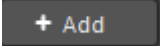


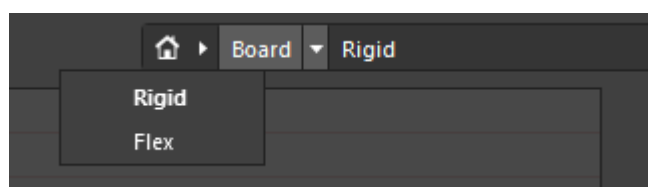
Полиимидная пленка выступает в качестве центрального ядра и находится во всех частях печатной платы. Соответственно, слои металлизации Int1 и Int2, накатанные вокруг полиимидного ядра, будут доступны по всей плате. Жесткая часть получается как бы наращенная поверх гибкого ядра через дополнительные препреги и слои металлизации Top и Bottom доступны для разводки только в жесткой части.

В Altium Designer в последних версиях поддерживается два режима работы с гибко-жесткими платами. Включаются они в редакторе стека по кнопке ниже. В текущем разделе описаны приемы работы в режиме Rigid/Flex (Advanced). Приемы работы в режиме Rigid/Flex описаны в отдельном разделе.



В режиме Rigid/Flex (Advanced) появляется возможность задать субстеки и их соединение друг с другом. Затем эти субстеки необходимо присвоить выделенным областям (Board Region) в печатной плате. Также в этом режиме гораздо удобнее задавать линии сгиба (Bending Lines).

По кнопке  создаются ветки (Branch) и субстеки (Substack). Множественные ветки в текущем проекте не нужны, поэтому будем добавлять субстеки к основной ветви Board. Определим два субстека Rigid для жесткой части, Flex для гибкой. Полная схема созданных ветвей и субстеков показывается в выпадающем списке.



При выборе субстека на уровне основной ветви, можно его поименовать и дать описание, как показано ниже для жесткой части.

Далее отредактируем стек жесткой части. По ДЛКМ переходим в него. Исходя из рекомендаций ООО «Резонит» [12] определим его в следующем виде.

+ Add Modify Delete Board Rigid								
#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df	Note
	Board Layer Sta...	SM-001	Solder Mask		0.0254mm	4	0.03	
	Top Surface Fini...	Nickel, Gold	Surface Finish		0.004mm			
1	Top Layer	Cu	Signal	1oz	0.035mm			
	Dielectric 1	FR4 HiTg170	Core		0.51mm	4.7	0.016	
	Dielectric 6	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017	
	Dielectric 7	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017	
	Adhesive 1	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02	
2	Int1 (GND)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm			
	Dielectric 4	AP8545R	Core		0.1mm	3.4	0.002	
3	Int (PWR)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm			
	Adhesive 2	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02	
	Dielectric 3	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017	
	Dielectric 5	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017	
	Dielectric 2	FR4 HiTg170	Core		0.51mm	4.7	0.016	
4	Bottom Layer	Cu	Signal	1oz	0.035mm			
	Bottom Surface...	Nickel, Gold	Surface Finish		0.004mm			
	Board Layer Sta...	SM-001	Solder Mask		0.0254mm	4	0.03	
	Board Layer Sta...		Overlay					

Центральное ядро – полиимидная пленка толщиной 0,1 мм с толщиной фольги 18 мкм DuPont AP 8545R [23]. Поверх центрального ядра с обеих сторон нанесем адгезивную пленку толщиной 25 мкм DuPont Pyralux LF0100 [24]. Далее по два слоя препрега FR-4 Tg170 толщиной по 69 мкм. В качестве жестких внешних ядер возьмем FR-4 Tg170 толщиной 0,51 мм с фольгой 35 мкм [25], при этом фольгу оставим только для внешнего слоя. Окончательно нанесем финишное покрытие ENIG (для гибко-жестких плат не рекомендовано использовать финишное покрытие опрaвлением припоем HASL) и паяльную маску.

В жесткой части в данном стеке доступны только сквозные отверстия.

+ Add Delete				#	Thru 1:4
#	Name	Type	Thickness		
	Top Overlay	Overlay			
	Top Solder	Solder Mask	0.0254mm		
	Top Surface Fini...	Surface Finish	0.004mm		
1	Top Layer	Signal	0.035mm	1	
	Dielectric 1	Core	0.51mm		
	Dielectric 2	Prepreg	0.069mm		
	Dielectric 8	Prepreg	0.069mm		
	Dielectric 6	Adhesive	0.025mm		
2	Int1 (GND)	Signal	0.018mm	2	
	Dielectric 3	Core	0.1mm		
3	Int2 (PWRnSIG)	Signal	0.018mm	3	
	Dielectric 7	Adhesive	0.025mm		
	Dielectric 9	Prepreg	0.069mm		
	Dielectric 4	Prepreg	0.069mm		
	Dielectric 5	Core	0.51mm		
4	Bottom Layer	Signal	0.035mm	4	
	Bottom Surface...	Surface Finish	0.004mm		
	Bottom Solder	Solder Mask	0.0254mm		
	Bottom Overlay	Overlay			

После возвращаемся на корневой уровень и субстеку Flex переключаем режим материалов в Individual (т.к. слои не будут полностью совпадать с

жестким стеком) и также укажем ввод в пределы жесткого стека некоторых элементов гибкой части на 0,5 мм (Intrusion).

Substack

Name: Flex

Description: Stack1

Material Usage: Common Individual

Intrusion Left

Top: 0.5mm

Bottom: 0.5mm

При правке гибкого субстека удалим все слои до адгезивной пленки. Затем с обеих сторон нанесем покровную пленку (Coverlay) DuPont Pyralux LF0110 толщиной 25 мкм.

<div> + Add Modify Delete </div> <div> Board Flex </div>								
#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df	Note
	Stack1 Top Cov...	FC-001	Coverlay		0.025mm	4	0.005	
	Adhesive 1	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02	
1	Int1 (GND)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm			
	Dielectric 4	AP8545R	Core		0.1mm	3.4	0.002	
2	Int (PWR)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm			
	Adhesive 2	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02	
	Stack1 Bottom...	FC-001	Coverlay		0.025mm	4	0.005	

Также этому субстеку необходимо включить галку Is Flex.

Substack

Stack Name: Flex

Is Flex: ☒

Layers: 2

Dielectrics: 3

Conductive Thickness: 0.036mm

Dielectric Thickness: 0.15mm

Total Thickness: 0.23601mm

Также надо учесть, что для гибко-жестких плат переходные отверстия в гибкой части доступны только по предварительному согласованию с производителем, в базовой версии стека они недоступны. Т.к. в текущем проекте гибкая часть выступает в роли шлейфов между жесткими зонами без установки на нее компонентов, то нам отверстия в гибкой части не нужны.

+ Add		Delete	
#	Name	Type	Thickness
	Flex Top Coverlay	Coverlay	0.025mm
	Dielectric 6	Adhesive	0.025mm
1	Int1 (GND)	Signal	0.018mm
	Dielectric 3	Core	0.1mm
2	Int2 (PWRnSIG)	Signal	0.018mm
	Dielectric 7	Adhesive	0.025mm
	Flex Bottom Cov...	Coverlay	0.025mm

В итоговом режиме, на верхнем уровне структура стека должна выглядеть приблизительно как показано ниже.

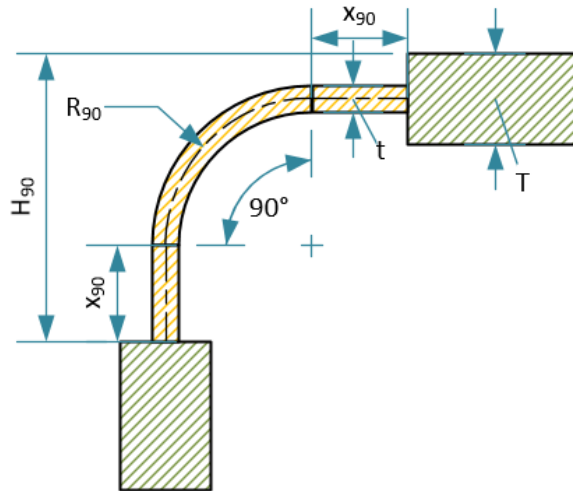
+ Add		Delete		Board Rigid	
Substack(s)	Rigid			Flex	
Layer Count	4			2	
Via Structure	Thru 1:4				
Surface Finish	ENIG			Not Defined	
Total Thickness	1.6108mm			0.23601mm	
Top Layer	Solder Mask	0.0254mm			
	Surface Finish	0.004mm			
	L1	Signal	0.035mm		
	Core	0.51mm			
	Prepreg	0.069mm			
	Prepreg	0.069mm			
	Adhesive	0.025mm			
	Int1 (GND)	L2	Signal	0.018mm	L1
Int (PWR)	Core	0.1mm		Core	0.1mm
	L3	Signal	0.018mm	L2	Signal
	Adhesive	0.025mm		Adhesive	0.025mm
	Prepreg	0.069mm		Coverlay	0.025mm
	Prepreg	0.069mm		Adhesive	0.025mm
	Core	0.51mm		Coverlay	0.025mm
	Bottom Layer	L4	Signal	0.035mm	
	Surface Finish	0.004mm			
Solder Mask	0.0254mm				
Overlay					

Для дальнейших расчетов нам отсюда понадобятся толщины жесткой части $T = 1,61$ мм и гибкой части $t = 0,23$ мм.

Определение гибких и жестких зон

После того, как определен стек и выбраны самые высокие компоненты, можно переходить к расчету и определению гибких и жестких зон. В проекте решено жесткие части выполнить в виде скругленных квадратов 30x30 мм. Зоны поворотов гибких частей на 90° углов решено построить так, чтобы

поверхности плат создавали прямой угол со сдвигом $H_{90} = 10$ мм, как показано ниже. Соответственно, можно посчитать, как будет выглядеть геометрия гибких участков для поворотов на 90° (показан вид сбоку для сгиба).



Можно вывести следующие соотношения размеров

$$H = x_{90} + R_{90} + T / 2, \text{ где}$$

R_{90} - радиус сгиба областей под 90° ,

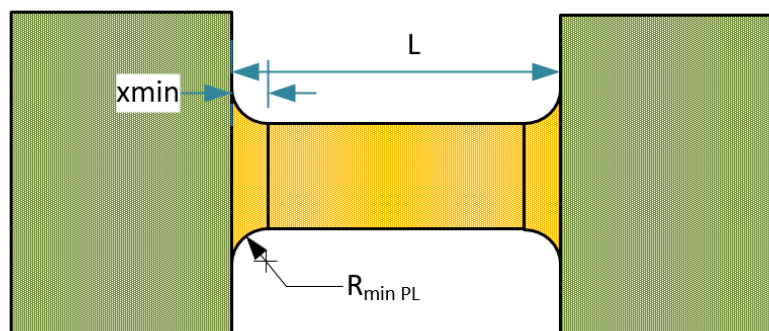
x_{90} - отступ от зоны сгиба до жесткой части,

T – толщина жесткой части печатной платы.

Отсюда общая длина шлейфа на 90° получается из соотношения

$$L_{90} = 2x_{90} + \frac{2\pi R_{90}}{4}$$

Выбранное производство [13] требует либо иметь скругление от жесткой части к гибкой минимального радиуса 1 мм либо ввести в твердую часть вырез минимального диаметра 1 мм. Остановимся на сглаженном переходе. Область этого перехода также не стоит сгибать, значит появляется дополнительное ограничение $x \geq R_{\min PL} \geq 1$ мм. При этом общая длина шлейфа рекомендована не меньше 5 мм, короче только по согласованию с производителем.



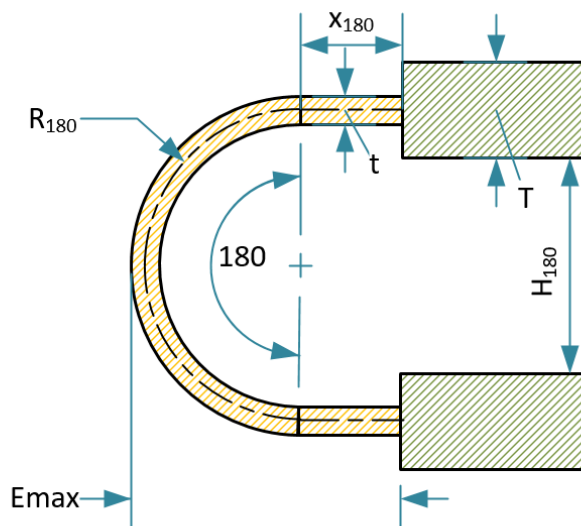
Также нужно помнить, что на радиус сгиба двуслойной гибкой части есть свое ограничение $R \geq 10 \times t$, где t – толщина гибкой части [13]. Если гибкая часть имеет более двух слоев, то требование минимального радиуса сгиба ужесточается до $R \geq 20 \times t$.

Отсюда можно вывести несколько соотношений, по которым будем выбирать длину шлейфа L_{90} и радиус сгиба R_{90} :

$$\begin{cases} x_{90} + R_{90} = H_{90} - T / 2 \approx 9,2 \text{ мм} \\ L_{90} = 2x_{90} + \frac{\pi R_{90}}{2} \\ x_{90} \geq 1 \text{ мм} \\ R_{90} \geq 10t \approx 2,3 \text{ мм} \\ L_{90} \geq 5 \text{ мм} \end{cases}$$

Для проектирования удобно, если шлейф имеет целую длину, пусть это будет значение $L_{90} = 16 \text{ мм}$. Отсюда можно вывести значение для радиуса сгиба $R_{90} \approx 5,57 \text{ мм}$ и отступа $x_{90} \approx 3,62 \text{ мм}$. Оба эти значения проходят по ограничениям с запасом, что дает запас на неточность изготовления.

Для поворота на 180° можно вывести аналогичные соотношения исходя из рисунка ниже. При этом нужно дополнительно проконтролировать, насколько торчит за пределы платы гибкий шлейф E_{180} . Расстояние H_{180} выберем равным 10 мм, чтобы можно было встречные платы соединить стандартной стойкой высотой 10 мм.

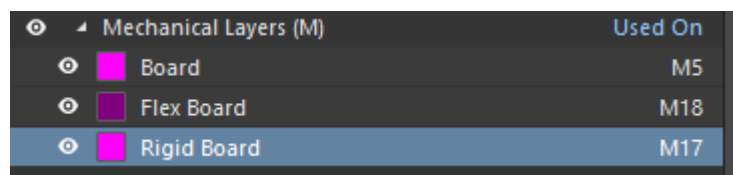


$$\begin{cases} 2R_{180} = H_{180} + T \approx 11,6 \text{ мм} \\ L_{180} = 2x_{180} + \pi R_{180} \\ E_{\max} = x_{180} + R_{180} < 10 \text{ мм} \\ x_{180} \geq 1 \text{ мм} \\ R_{180} \geq 10t \approx 2,3 \text{ мм} \\ L_{180} \geq 5 \text{ мм} \end{cases}$$

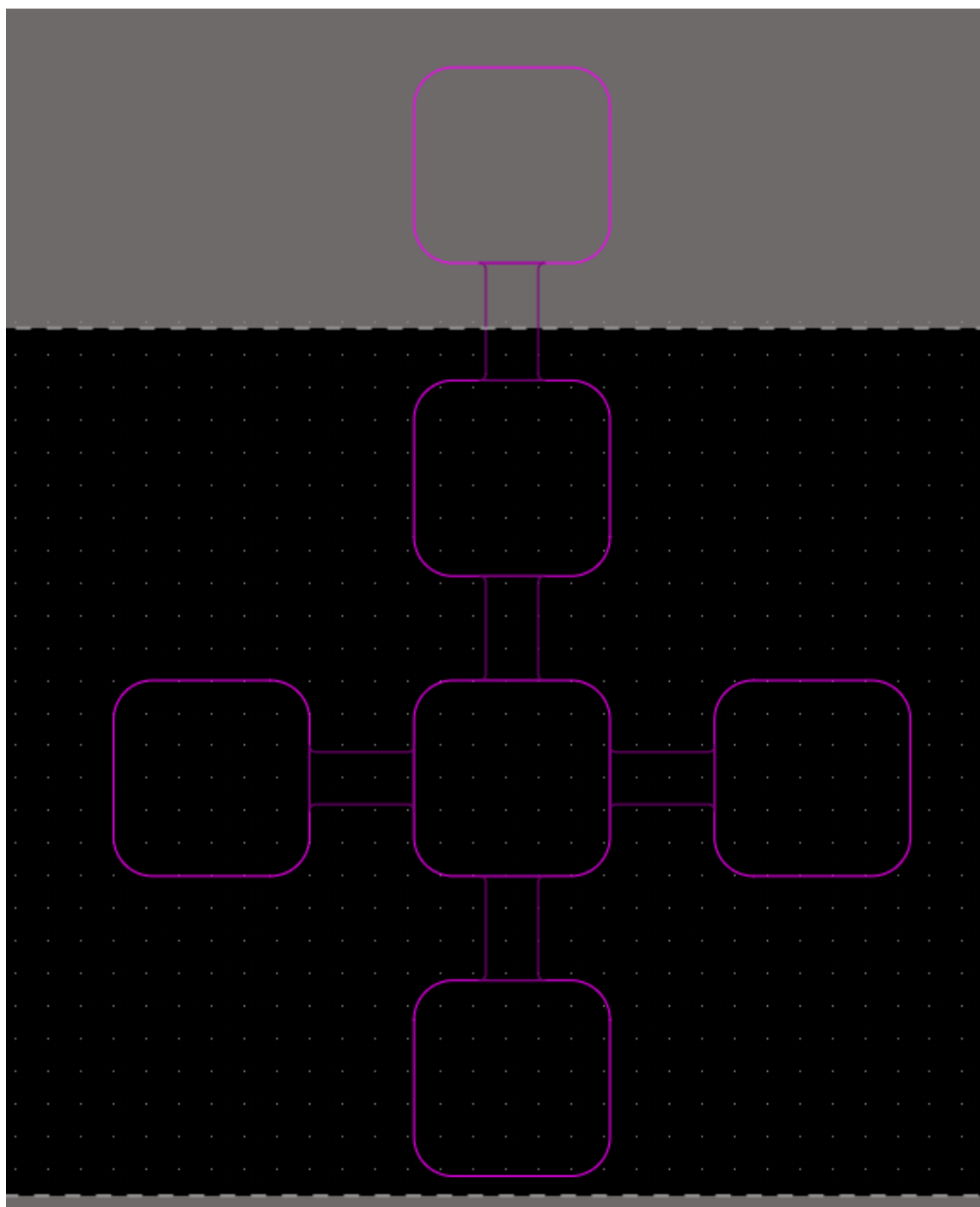
Здесь сразу получается радиус сгиба $R_{180} \approx 5,8 \text{ мм}$. Выберем длину шлейфа $L_{180} = 22 \text{ мм}$, тогда отступ выходит $x_{180} \approx 1,9 \text{ мм}$ и шлейф торчит за пределы плат на $E_{\max} = 7,7 \text{ мм}$. По всем ограничениям проходим с запасом, что дает запас на неточность изготовления.

Можно переходить к указанию зон. Дальнейшее справедливо для режима гибко-жестких плат Rigid/Flex (Advanced).

Для удобства формирования герберов и работы с зонами дополнительно к основному слою M5 Board, где находится общий контур печатной платы, доопределим два дополнительных механических слоя, M17 Rigid Board – контура жестких зон и M18 Flex Board – контура гибких зон.

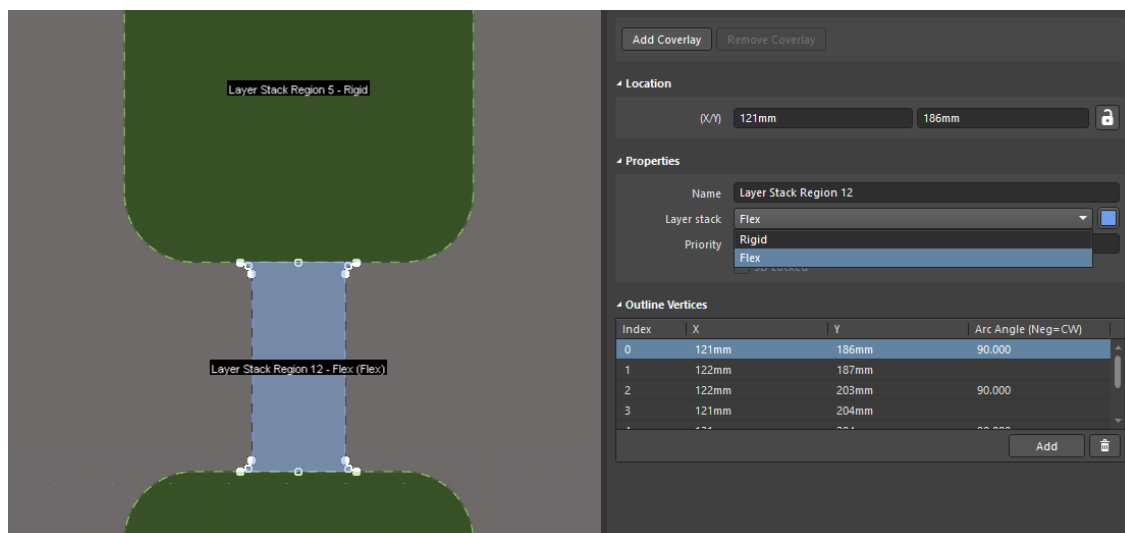


Гибко-жесткая печатная плата проектируется в развертке, поэтому общий вид развертки будет следующим. Углы жестких зон сгладим радиусом 6 мм. Ширины шлейфов возьмем по 8 мм.

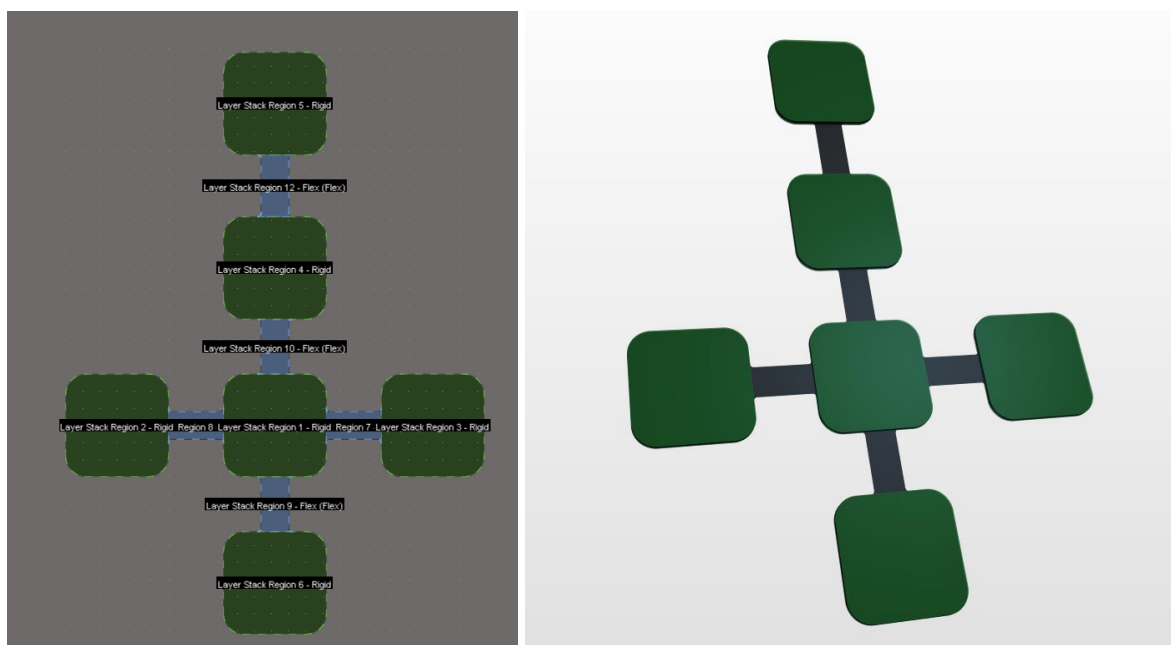


Далее выбираем последовательно контур каждой зоны и по команде Design – Board Shape – Create Board Region from Selected Primitives (D, S, R) создаем поочередно все зоны. При создании зон режим редактирования перескачет в Board Planning Mode (1). В этом режиме также можно определять зоны, но он не очень удобен для задания хоть сколько-нибудь сложных геометрий.

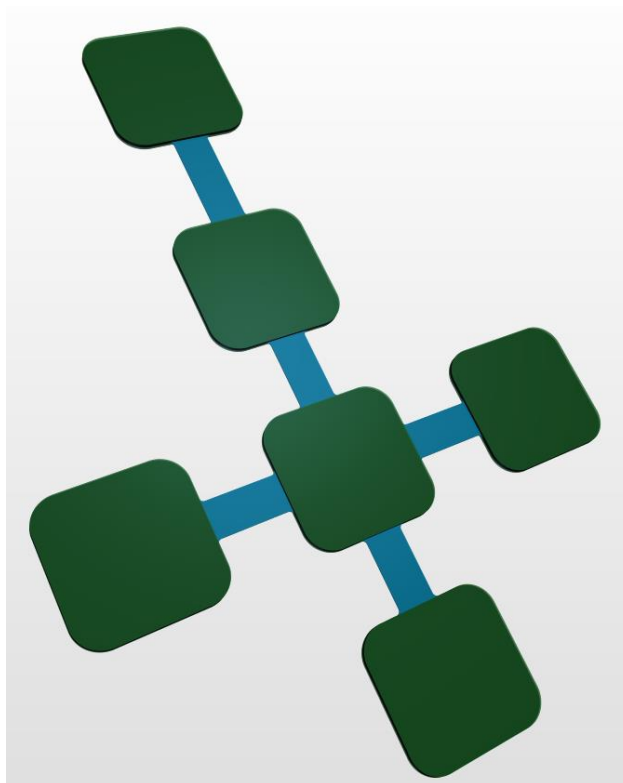
После создания всех зон, необходимо им всем задать нужный субстек. Жестким участкам присвоим субстек Rigid, гибким – Flex.



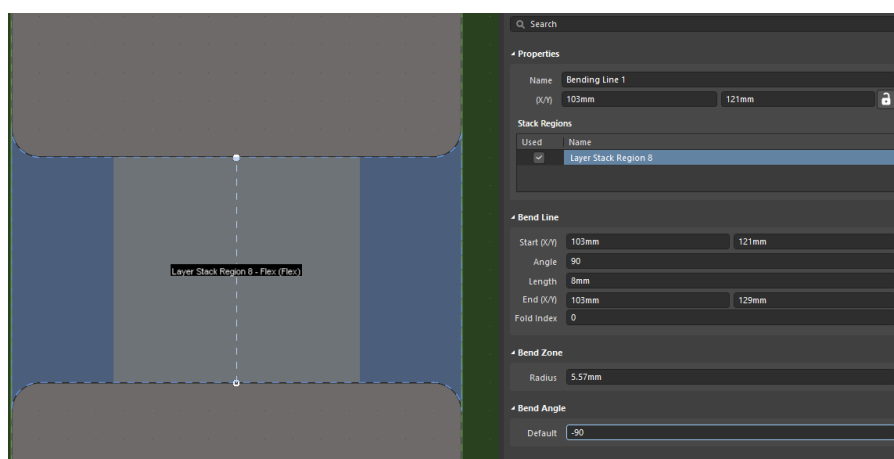
В режиме 3D-будет удобно проконтролировать разложение субстеков по зонам.



Также решено гибкие части закрывать защитной покрывной пленкой. В гибкой зоне нужно выполнить команду ПКМ – Coverlay Actions – Add Coverlay или в свойствах субстека кнопка Add Coverlay. В 3D-режиме гибкие части с покрывной пленкой будут иметь голубой цвет.



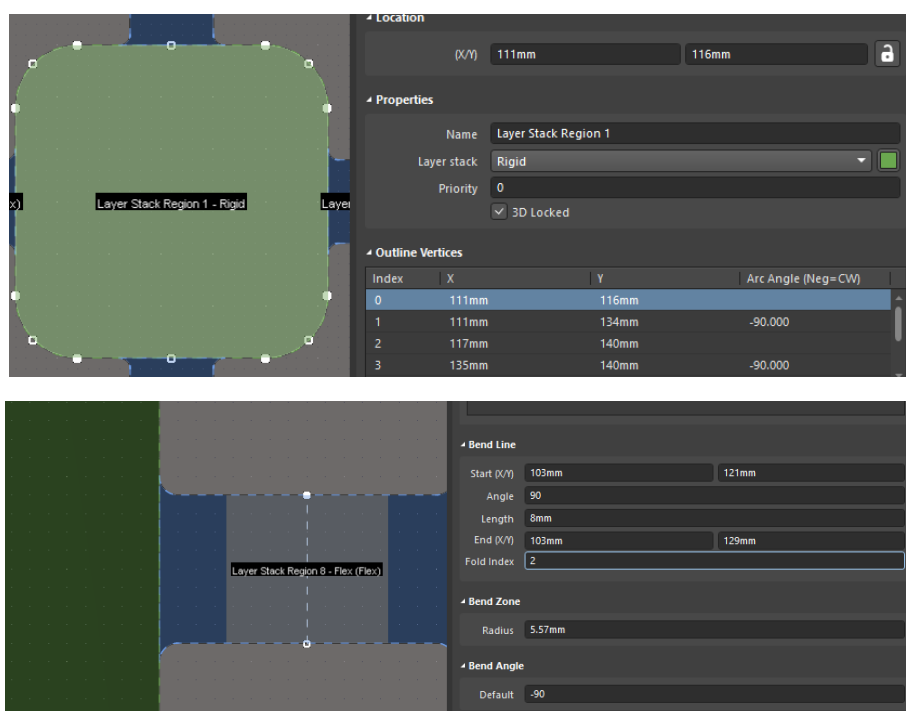
Далее нужно задать шлейфам линии сгиба. Линия создается задается в режиме Board Planning Mode через команду Place – Define Bending Line (P, E). Их необходимо построить поперек гибких зон с привязкой к середине шлейфов. В настройках указывается радиус и угол сгиба. Радиусы были посчитаны ранее (5,57 мм для углов 90° , 5,8 мм для 180°), знак углам введем отрицательным, чтобы направление сгиба было вглубь от плоскости экрана.



В режиме 3D можно по команде View – 3D View Control – Fold/Unfold (Num5) свернуть и развернуть гибко-жесткую печатную плату, чтобы увидеть, как она будет выглядеть свернутой в 3D.



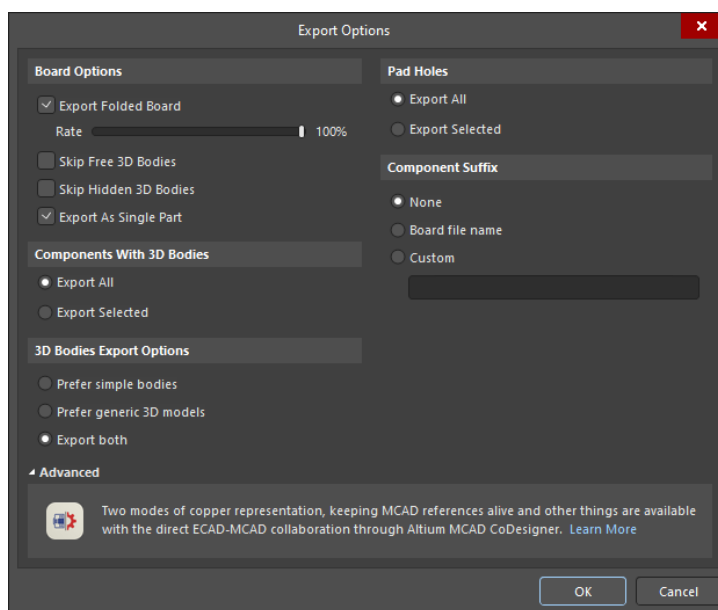
Дополнительно через две настройки еще можно управлять режимом сворачивания. В настройках жестких зон есть галка 3D Locked, с помощью которой можно выбрать, какая из жестких зон будет опорной (останется в плоскости экрана), тогда остальные будут сворачиваться относительно нее. В настройках линий сгиба есть поле Fold Index, целыми числами в котором указывается порядок выполнения сгибов.



Далее по идее можно переходить к собственно разводке топологии. Однако, стоит сначала в 3D проанализировать заготовку гибко-жесткой печатной платы в свернутом состоянии, чтобы убедиться, что проведенные выше вычисления размеров гибких зон и параметров линий сгиба корректны.

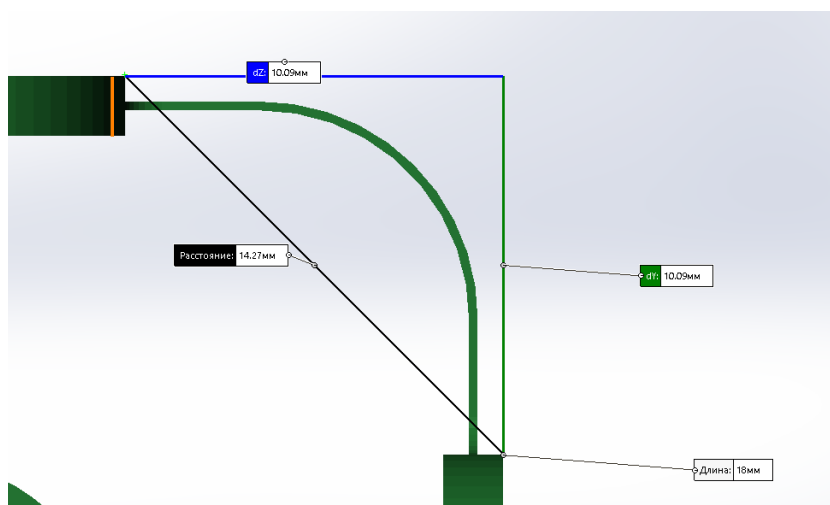
К сожалению, 3D-режим в Altium Designer не позволяет удобно измерить размеры в 3D, для этого придется перенести файл печатной платы в механический САПР.

По команде File – Export – Step 3D экспортируем заготовку печатной платы в формат step и проанализируем его в MCAD. После указания имени экспортированного файла в окне настроек экспорта укажем, что плату надо экспортировать в свернутом состоянии Export Folded Board и единой деталью Export As Single Part. Остальные настройки на текущем этапе не имеют значения, т.к. компонентов и разводки на печатной плате еще нет.

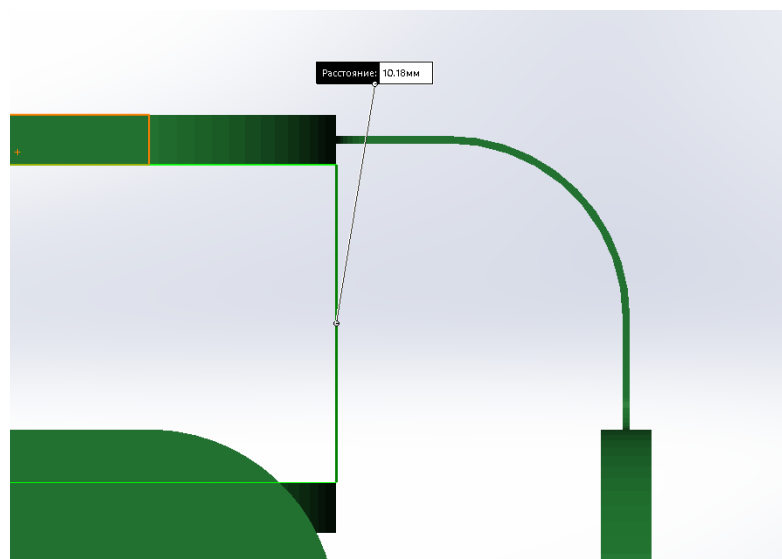


В MCAD после импорта step-файла измерим следующие размеры:

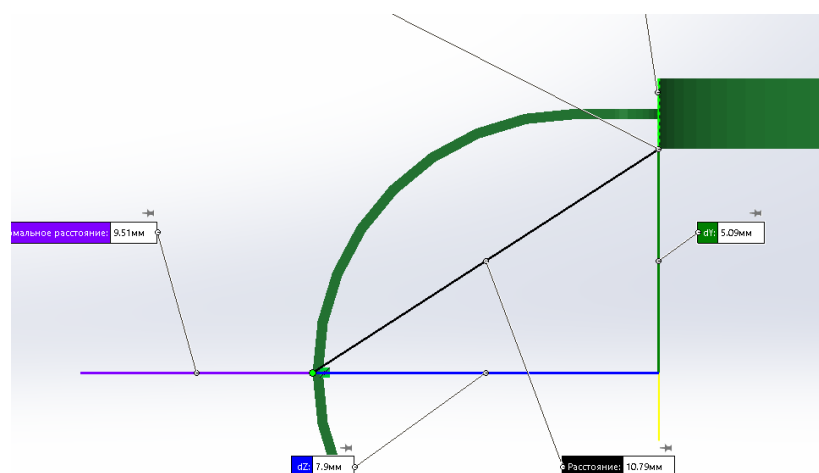
- сдвиг для поворотов на 90° (H_{90}), получился 10,09 мм



- расстояние между параллельными платами на повороте 180° (H_{180}), получилось 10,18 мм



- размер вылета шлейфа на повороте 180° (E_{180}), получилось 7,9 мм



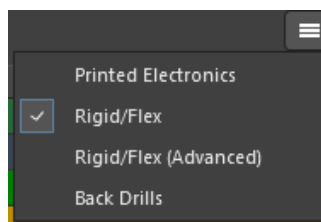
Размеры получились с некоторой ошибкой по сравнению с тем, какими они были рассчитаны изначально. Связано это с тем, что в расчетах не учитывалась физическая толщина гибкой части и модель ее сгиба. На текущем этапе рекомендовано подобрать параметры радиусов сгиба R_{90} и R_{180} , чтобы получить более чистую 3D-модель свернутой печатной платы.


При подборе были обновлены значения $R_{90} = 5,15$ мм и $R_{180} = 5,71$ мм, введем их в соответствующие параметры линий сгиба.

Подготовка контура печатной платы закончена, можно переходить к разводке топологии.

Стандартный режим определения стека и зон

Если продвинутый режим работы с гибко-жесткими платами недоступен, то можно провести подготовку и стандартном.

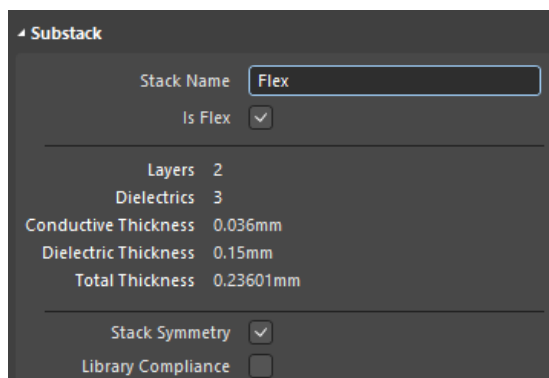


В этом режиме нет понятия ветвей, есть только субстеки. Субстеки создаются по кнопке , текущий субстек выбирается в выпадающем списке. При этом слои отображаются все и с помощью галочек выбираются те, которые используются в текущем субстеке.

Rigid							
#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df
<input checked="" type="checkbox"/>	Rigid Top Overlay		Overlay				
<input type="checkbox"/>	Flex Top Overlay	LF0100	Coverlay		0.025mm	4	0.005
<input checked="" type="checkbox"/>	Board Layer Sta...	SM-001	Solder Mask		0.0254mm	4	0.03
<input checked="" type="checkbox"/>	Top Surface Fini...	Nickel, Gold	Surface Finish		0.004mm		
<input checked="" type="checkbox"/>	1 Top Layer	Cu	Signal	1oz	0.035mm		
<input checked="" type="checkbox"/>	Dielectric 1	FR4 HiTg170	Core		0.51mm	4.7	0.016
<input checked="" type="checkbox"/>	Dielectric 6	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
<input checked="" type="checkbox"/>	Dielectric 7	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
<input checked="" type="checkbox"/>	Adhesive 1	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02
<input checked="" type="checkbox"/>	2 Int1 (GND)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm		
<input checked="" type="checkbox"/>	Dielectric 4	AP8545R	Core		0.1mm	3.4	0.002
<input checked="" type="checkbox"/>	3 Int (PWR)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm		
<input checked="" type="checkbox"/>	Adhesive 2	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02
<input checked="" type="checkbox"/>	Dielectric 3	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
<input checked="" type="checkbox"/>	Dielectric 5	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
<input checked="" type="checkbox"/>	Dielectric 2	FR4 HiTg170	Core		0.51mm	4.7	0.016
<input checked="" type="checkbox"/>	4 Bottom Layer	Cu	Signal	1oz	0.035mm		
<input checked="" type="checkbox"/>	Bottom Surface...	Nickel, Gold	Surface Finish		0.004mm		
<input checked="" type="checkbox"/>	Board Layer Sta...	SM-001	Solder Mask		0.0254mm	4	0.03
<input type="checkbox"/>	Flex Bottom Cov...	LF0100	Coverlay		0.025mm	4	0.005
<input checked="" type="checkbox"/>	Board Layer Sta...		Overlay				

Flex							
#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df
<input type="checkbox"/>	Rigid Top Overlay		Overlay				
<input checked="" type="checkbox"/>	Flex Top Overlay	LF0100	Coverlay		0.025mm	4	0.005
<input type="checkbox"/>	Board Layer Sta...	SM-001	Solder Mask		0.0254mm	4	0.03
<input type="checkbox"/>	Top Surface Fini...	Nickel, Gold	Surface Finish		0.004mm		
<input type="checkbox"/>	1 Top Layer	Cu	Signal	1oz	0.035mm		
<input type="checkbox"/>	Dielectric 1	FR4 HiTg170	Core		0.51mm	4.7	0.016
<input type="checkbox"/>	Dielectric 6	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
<input type="checkbox"/>	Dielectric 7	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
<input checked="" type="checkbox"/>	Adhesive 1	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02
<input checked="" type="checkbox"/>	1 Int1 (GND)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm		
<input checked="" type="checkbox"/>	Dielectric 4	AP8545R	Core		0.1mm	3.4	0.002
<input checked="" type="checkbox"/>	2 Int (PWR)	Cu	Signal	1/2oz	0.018mm		
<input checked="" type="checkbox"/>	Adhesive 2	LF0100	Adhesive		0.025mm	3.6	0.02
<input type="checkbox"/>	Dielectric 3	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
<input type="checkbox"/>	Dielectric 5	FR4_HiTg170 PR	Prepreg		0.069mm	4.2	0.017
<input type="checkbox"/>	Dielectric 2	FR4 HiTg170	Core		0.51mm	4.7	0.016
<input type="checkbox"/>	4 Bottom Layer	Cu	Signal	1oz	0.035mm		
<input type="checkbox"/>	Bottom Surface...	Nickel, Gold	Surface Finish		0.004mm		
<input type="checkbox"/>	Board Layer Sta...	SM-001	Solder Mask		0.0254mm	4	0.03
<input checked="" type="checkbox"/>	Flex Bottom Cov...	LF0100	Coverlay		0.025mm	4	0.005
<input type="checkbox"/>	Board Layer Sta...		Overlay				

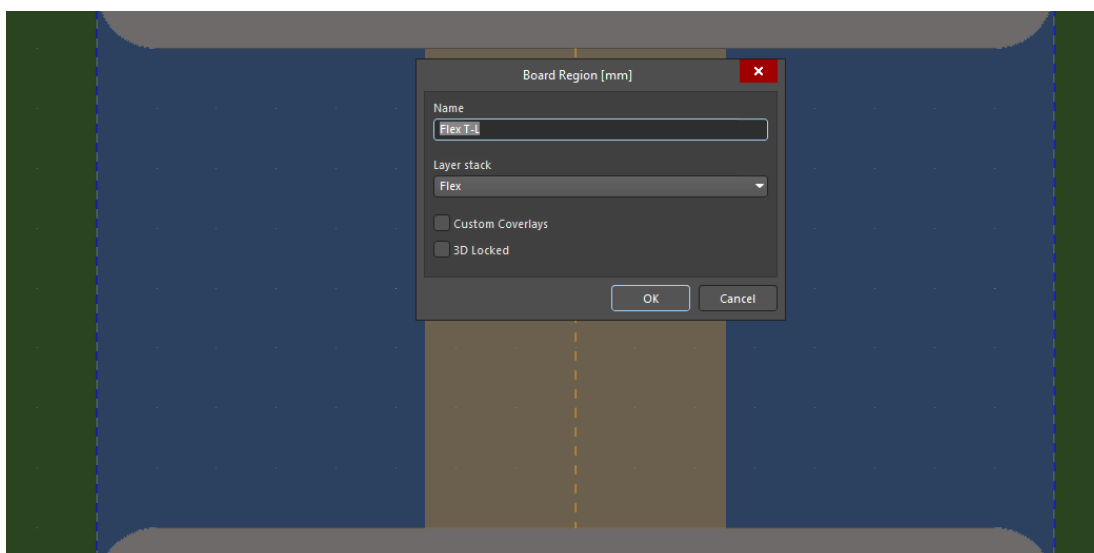
Дать имя субстеку и указать тип стека гибкий или жесткий можно в панели Properties в группе Substack. Также стандартный режим определения стека гибко-жесткой печатной платы поддерживает проверку симметричности стека Stack Symmetry, которая недоступна в продвинутом режиме.



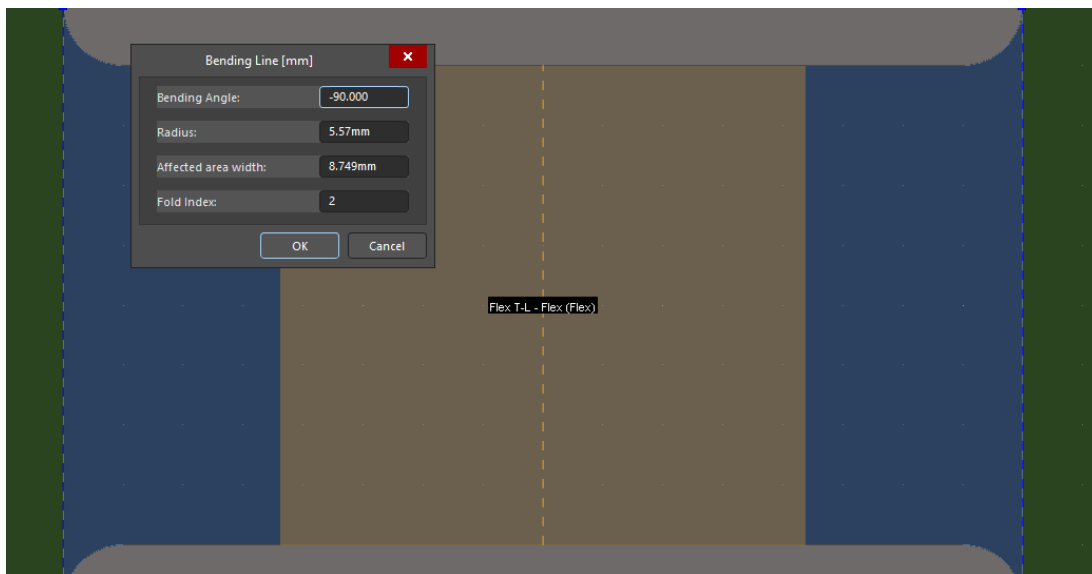
При определении геометрии печатной платы необходимо сначала указать весь контур печатной платы, а затем с помощью инструмента Split Line в режиме Board Planning Mode разделить всю плату на зоны. Split Line ставится по команде Design – Define Split Line (D, S) в пределах существующей зоны с последующей правкой конечных точек.



После установки границ, плата разбивается на зоны, которым по ДЛКМ можно выбрать субстек и дать имя.

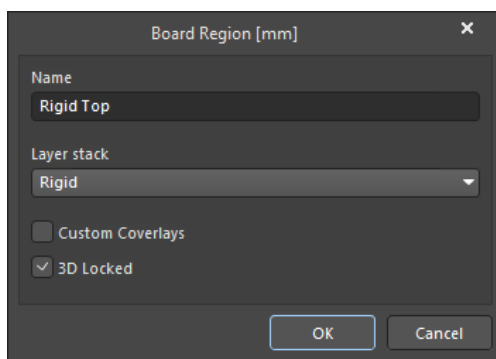


В гибких зонах появляется линия сгиба (Bending Line). Управляется она по ДЛКМ по конечным точкам линии сгиба. В одну гибкую зону можно добавить несколько зон сгиба по Design – Define Bending Line (D, E).



В параметрах линии сгиба указывается угол сгиба (знак угла задает направление), радиус и ширина зоны сгиба, а также порядок сгиба при сворачивании печатной платы в 3D-режиме.

У жестких зон в свойствах есть галка 3D Locked, которая позволяет выбрать ту жесткую зону, которая будет зафиксирован при сворачивании гибко-жесткой печатной платы в 3D-режиме.



Особенности подготовки правил разводки топологии

Подготовка правил разводки топологий гибко-жестких печатных плат требует учета нескольких дополнительных моментов по отношению к обычной жесткой печатной плате.

Если в проекте есть линии с контролируемым импедансом и используется инструмент профиля импедансов, то расчеты необходимо провести расчеты на всех субстеках. Нужно помнить, что т.к. в жесткой и

гибкой части стек все-таки отличается, то и значения ширины/зазоров в общем случае даже для одного слоя, но в разных стеках будут отличаться. В примере необходимо подготовить правила для дифпары USB на 90 Ом дифференциального сопротивления. Решено остановиться на следующих размерах для жесткой части:

Слои Top и Bottom – 0,3 мм/0,15 мм/0,3 мм (w/gap/w);

Слои Int1 и Int2 – 0,15 мм/0,2 мм/0,15 мм (w/gap/w).

+

Add

🗑

Delete

D90 (TopD90)

DC90

🏠

Board

▸

Rigid

▼

☰

#	Name	Material	Type	Weight	T	Top Ref	Bottom Ref	Width (...)	Trace Ga...	Impedance...	Deviati...	Delay...	
	Top Overlay		Overlay										
	Top Solder	SM-001	Solder Mask		0								
	Top Surface Fini...	Gold	Surface Finish		0								
	Top Layer	Cu	Signal	1oz	0	✓	1 - Int1 (GND)	0.3mm	0.15mm	96.2	6.89%	5.8568...	
	Dielectric 1	FR4 HiTg170	Core		0								
	Dielectric 2	FR4_HiTg17...	Prepreg		0								
	Dielectric 8	FR4_HiTg17...	Prepreg		0								
	Dielectric 6	LF0100	Adhesive		0								
	Int1 (GND)	Cu	Signal	1/2oz	0	✓	Top Lay...	2 - Int2 (PW...	0.15mm	0.2mm	90.74	0.83%	6.4253...
	Dielectric 3	AP8545R	Core		0								
	Int2 (PWRnSIG)	Cu	Signal	1/2oz	0	✓	1 - Int1...	Bottom Layer	0.15mm	0.2mm	90.74	0.83%	6.4253...
	Dielectric 7	LF0100	Adhesive		0								
	Dielectric 9	FR4_HiTg17...	Prepreg		0								
	Dielectric 4	FR4_HiTg17...	Prepreg		0								
	Dielectric 5	FR4 HiTg170	Core		0								
	Bottom Layer	Cu	Signal	1oz	0	✓	2 - Int2...		0.3mm	0.15mm	96.2	6.89%	5.8568...
	Bottom Surface...	Gold	Surface Finish		0								
	Bottom Solder	SM-001	Solder Mask		0								
	Bottom Overlay		Overlay										

Для гибкой части:

Слои Top и Bottom недоступны;

Слои Int1 и Int2 – 0,2 мм/0,2 мм/0,2 мм (w/gap/w).

+ Add

Delete

D90 (TopD90)

DC90

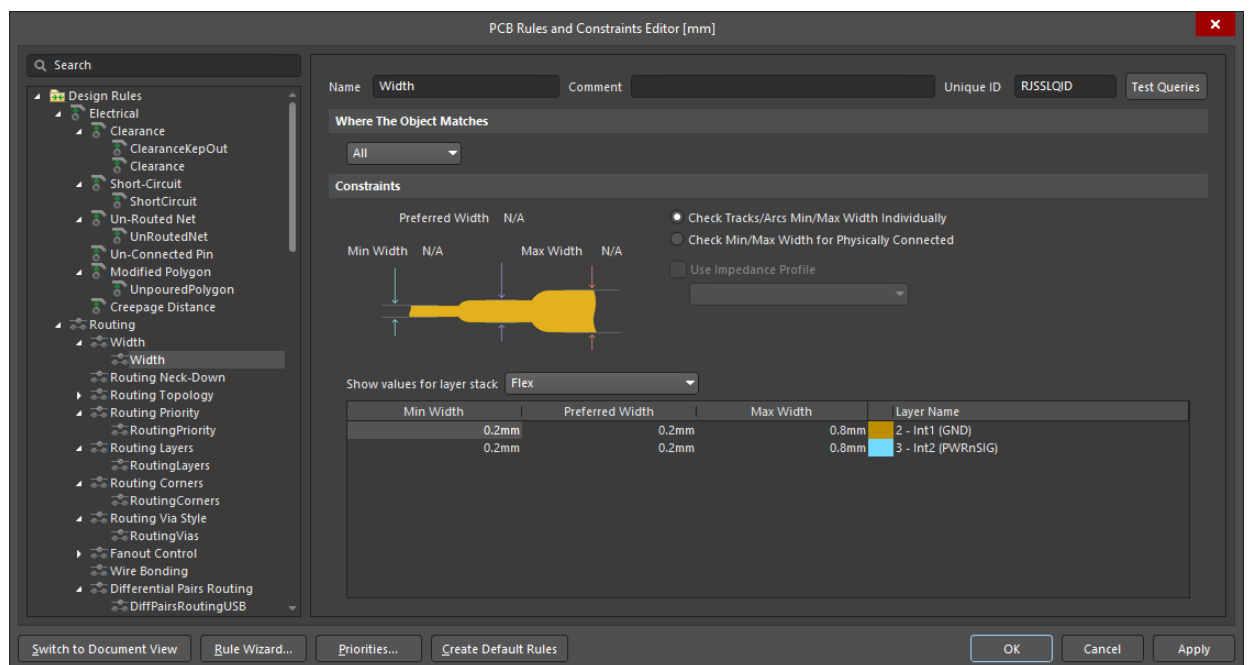
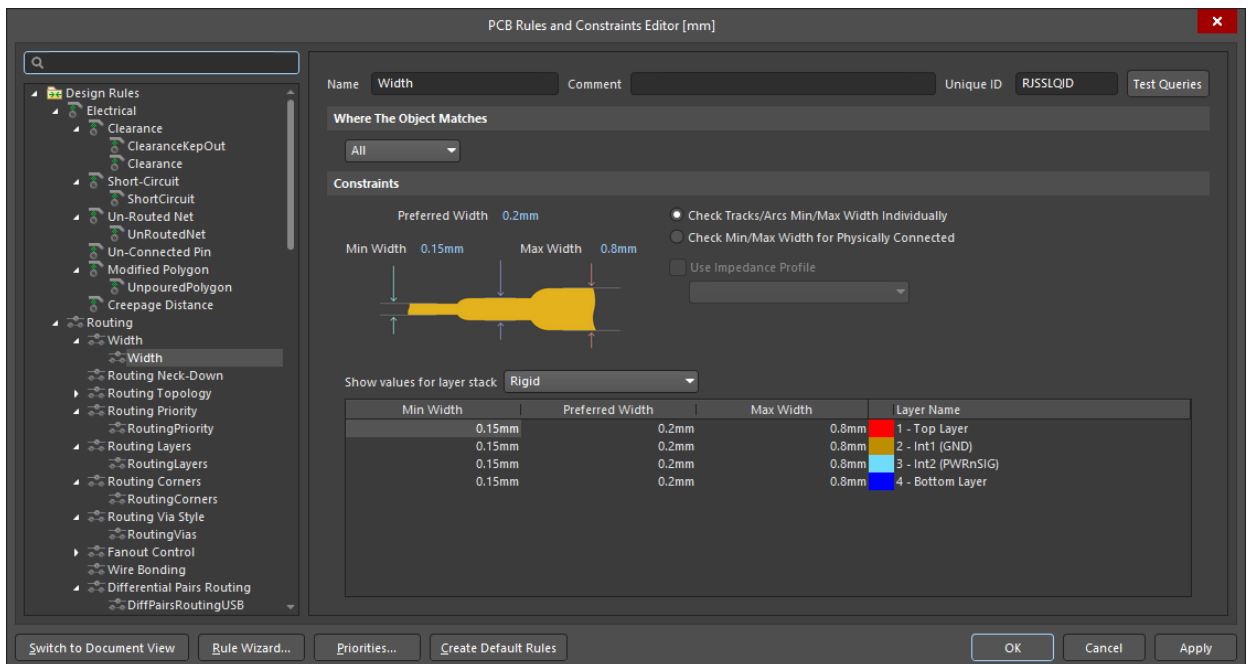
Board

Flex

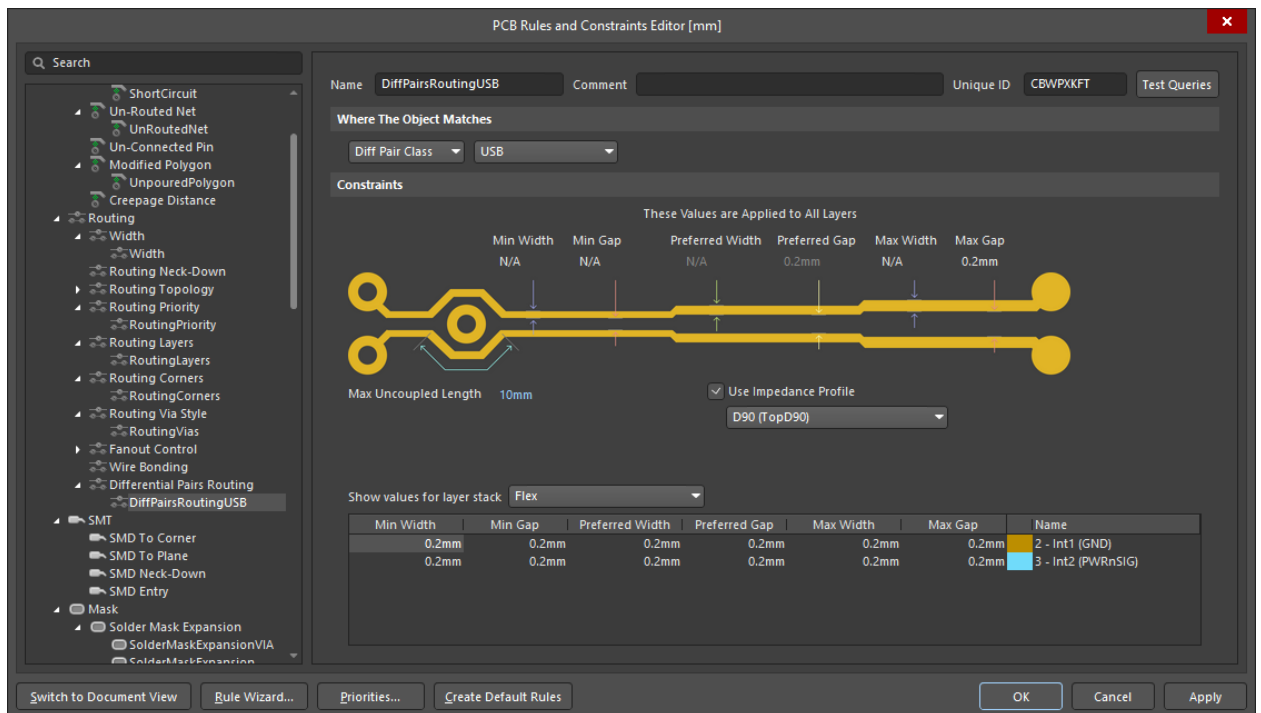
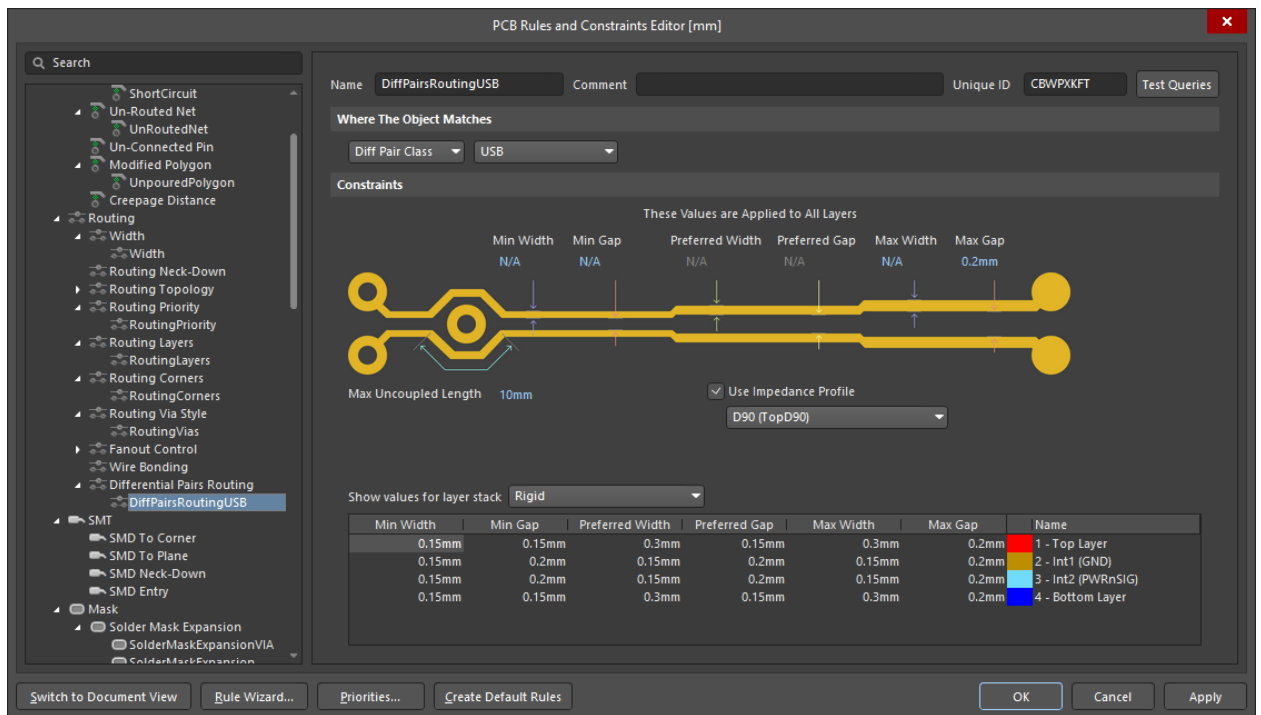
#	Name	Material	Type	Weight	T	Top Ref	Bottom Ref	Width [...]	Trace Ga...	Impedance...	Deviati...	Delay...
	Flex Top Coverlay	FC-001	Coverlay		0							
	Dielectric 6	LF0100	Adhesive		0							
1	Int1 (GND)	Cu	Signal	1/2oz	0	<input checked="" type="checkbox"/>	2 - Int2 (PW...	0.2mm	0.2mm	89.64	0.4%	5.6961...
	Dielectric 3	AP8545R	Core		0							
2	Int2 (PWRnSIG)	Cu	Signal	1/2oz	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1 - Int1...	0.2mm	0.2mm	89.64	0.4%	5.6961...
	Dielectric 7	LF0100	Adhesive		0							
	Flex Bottom Cov...	FC-001	Coverlay		0							

В правилах Routing - Width и Routing - Differential Pairs Routing появляется переключатель стека, так что эти правила теперь содержат в себе несколько независимых правил, действующих в пределах соответствующего стека. Управляется в выпадающем списке Show values for layer stack. Соответственно, нужно заполнить размеры ширины для всех стеков.

Ниже показано правило ширины Width для жесткой и гибкой части.



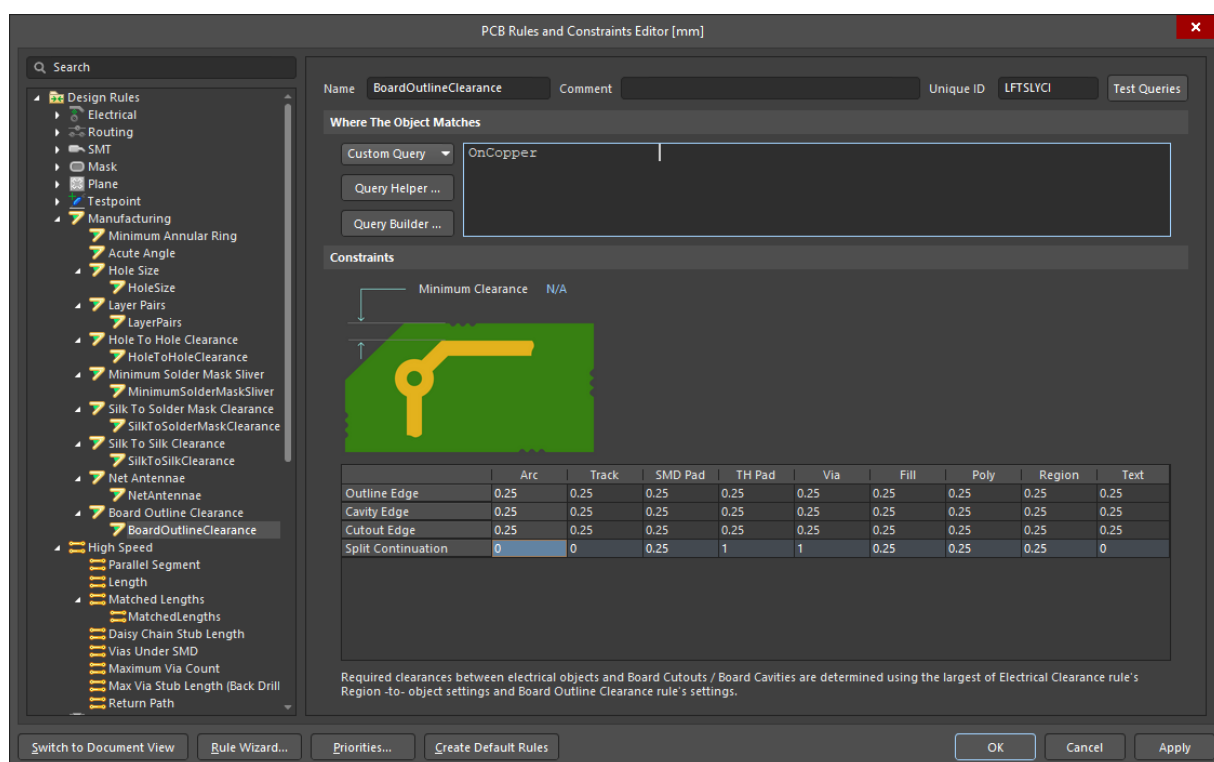
Для USB-цепей, определенных в классе USB, сошлемся на профиль импеданса D90, также для жесткой и гибкой части.



Примечание: по состоянию на версию Altium Designer 24.10 присутствует баг. При разводке режимы интерактивной разводки берут размеры из правил отдельно для жесткой и гибкой части, и все работает ожидаемо. А вот проверка DRC по непонятной причине игнорирует размеры для гибкой зоны и использует для проверки размеры жесткой зоны. Обойти это можно, добавив комнату под размер гибкой зоны и добавив дополнительное правило с запросом `WithinRoom()`. Или можно использовать запрос `InLayerStackRegion()`, где указать имя зоны субстека.

Также необходимо отредактировать правило Manufacturing – Board Outline Clearance, действующее на металлизированные слои (OnCopper). Строке от границ печатной платы (Outline Edge) укажем стандартные зазоры 0,25 мм для фрезеруемых контуров [13].

Для строки границы между зонами (Split Continuation) нужно определить свой список зазоров. Зазор до разводки цепей (Arc и Track) нужно поставить 0, чтобы можно было провести цепи через границу. SMT-падам и полигональным объектам поставим зазор 0,25 мм, соответствующий стандартному зазору от границ платы; кроме того сплошные заливки по гибким частям делать нежелательно. Сквозным падам и отверстиям поставим зазор 1 мм.



Особенности разводки топологии

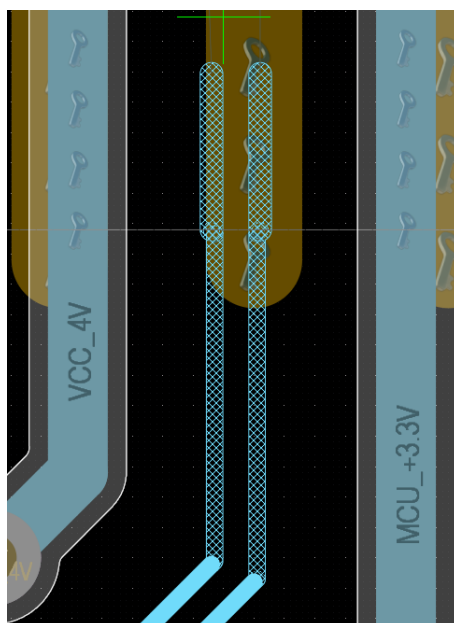
При использовании гибких частей как шлейфов между жесткими зонами, стоит продумать, на каком слое что разводить. В обычном типовом четырехслойном стеке как правило, основная разводка ведется на внешних слоях Top и Bottom, на втором слое Int1 как правило земля (если основные компоненты расположены на верхнем слое), на третьем слое Int2 разводится питание и часть управления. В используемом гибко-жестком стеке слой Int1 становится верхним слоем для гибкой части, на нем будем располагать земляную цепь. А слой Int2 становится нижним слоем для гибкой части, в нем будем разводить питание и управляющие цепи между жесткими зонами.

При этом, с учетом выбранной конструкции может даже выйти так, что слои поменяются местами. Например, на грани Inner на слое Top вы оставим только разъем к LiPol-аккумулятору, а контроллер питания и зарядки с его обвязкой компоненты из цепи питания переместим на слой Bottom, чтобы они не касались LiPol-аккумулятора. В этом случае, на слое Int1 в зоне Inner будут цепи питания и управления, а на слое Int2 будет земля.

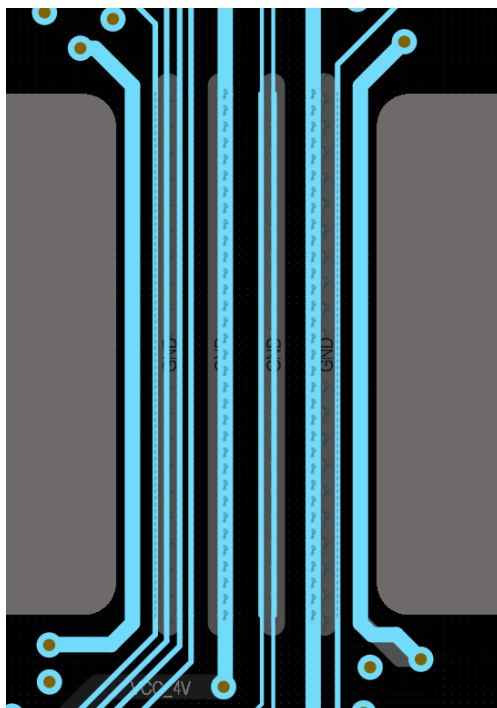
ООО «Резонит» [13] настоятельно рекомендует для надежности добавить относительно широкие медные полосы по краям гибкой части с отступом от края гибкой части на 0,25 мм. В каждом из шлейфов добавим таких защитных линий на слои Int1 и Int2 шириной 0,5 мм и подключим их к цепи GND. Также во всех шлейфах на слое Int1 сразу добавим несколько широких линий, имитирующих земляную заливку, т.к. использование заливок на гибких частях технологически нежелательно. При последующей работе с земляными заливками в жестких зонах надо будет проследить, чтобы данные линии к ней присоединились.



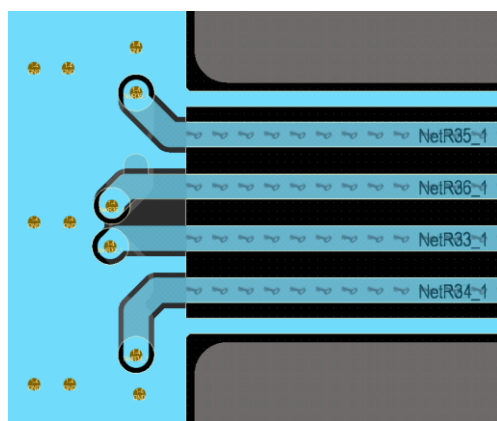
При разводке цепей при переходе между жесткой и гибкой зоной будут автоматически перестраиваться ширины и зазоры в зависимости от правил. В примере это видно при разводке USB-цепи.



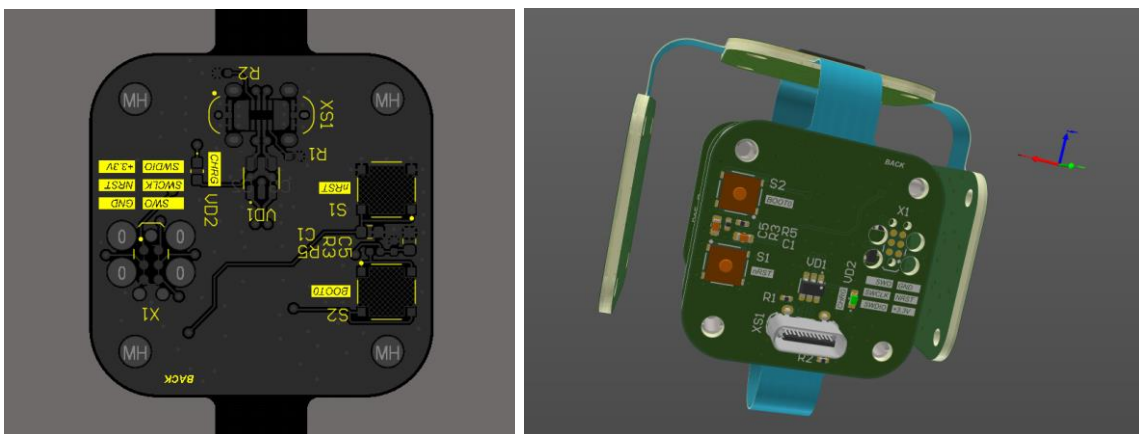
На гибких зонах не стоит без необходимости поворачивать цепи, а также лучше если цепи расположены более-менее равномерно по всей ширине шлейфа. Ну и при подводе к гибким зонам нужно помнить про зазор 1 мм от отверстий до перехода между зонами.



Как было сказано ранее, не нужно без необходимости добавлять заливки на гибкие зоны. Можно в гибкие в зоны добавить зоны запрета заливок в виде Кеерут-ов с запретом на заливки или вырезы в полигонах Polygon Cutout. Или формировать заливки индивидуально для каждой жесткой зоны по контурам в слое Rigid Board.



При финализации шелкографии имеет смысл повернуть позиционные обозначения компонентов так, чтобы их было удобно читать будущему пользователю устройства, когда печатная плата находится в свернутом состоянии, а не в развертке. В примере это имеет смысл для боковых и задней грани.

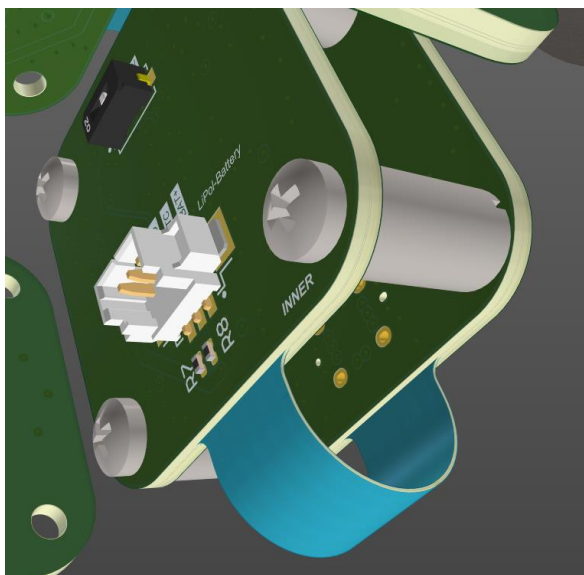


Добавление механических элементов крепежа

Если гибко-жесткая плата при сворачивании будет иметь элементы крепежа, то можно еще до передачи проекта конструктору-механика, внести их в проект, чтобы иметь возможность как можно ранее учитывать их в проекте.

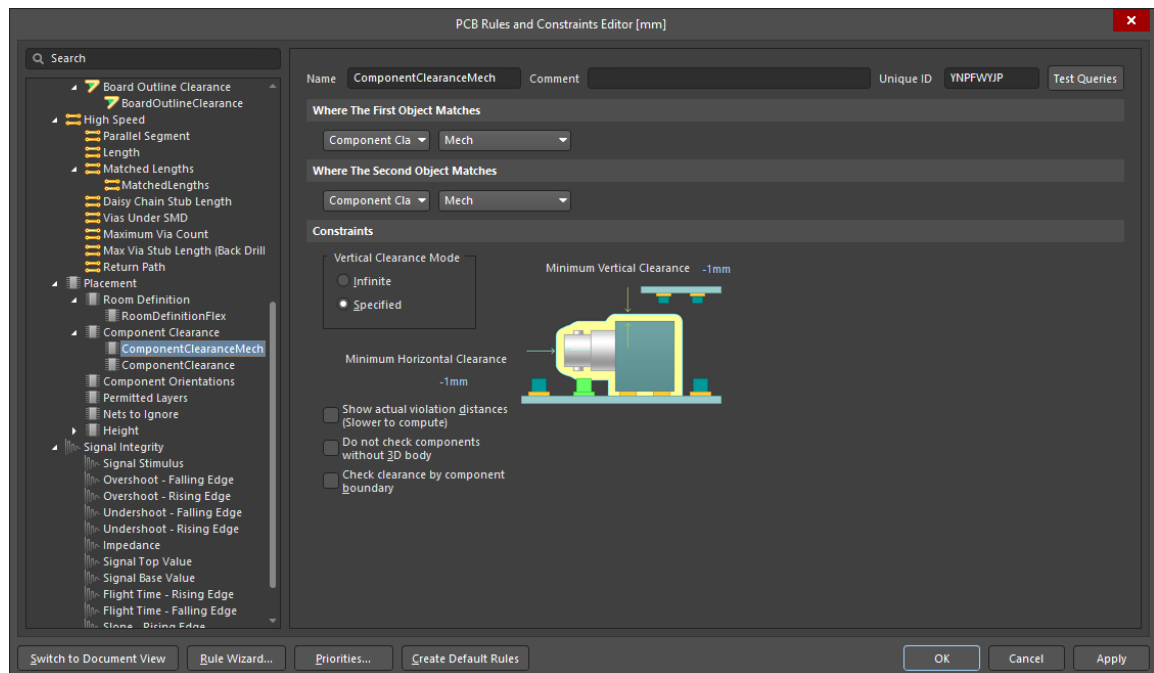
В проекте грани Back и Inner заворачиваются друг на друга и будут располагаться параллельно на расстоянии 10 мм. Предполагается, что будут использованы стойки на 10 мм. Стойки M2,5x10 расположим на обратной стороне на грани Inner, а винты M2,5 их крепящие – на той же грани, но сверху.

В 3D-режиме в свернутом режиме будет хорошо видно, как они установлены.

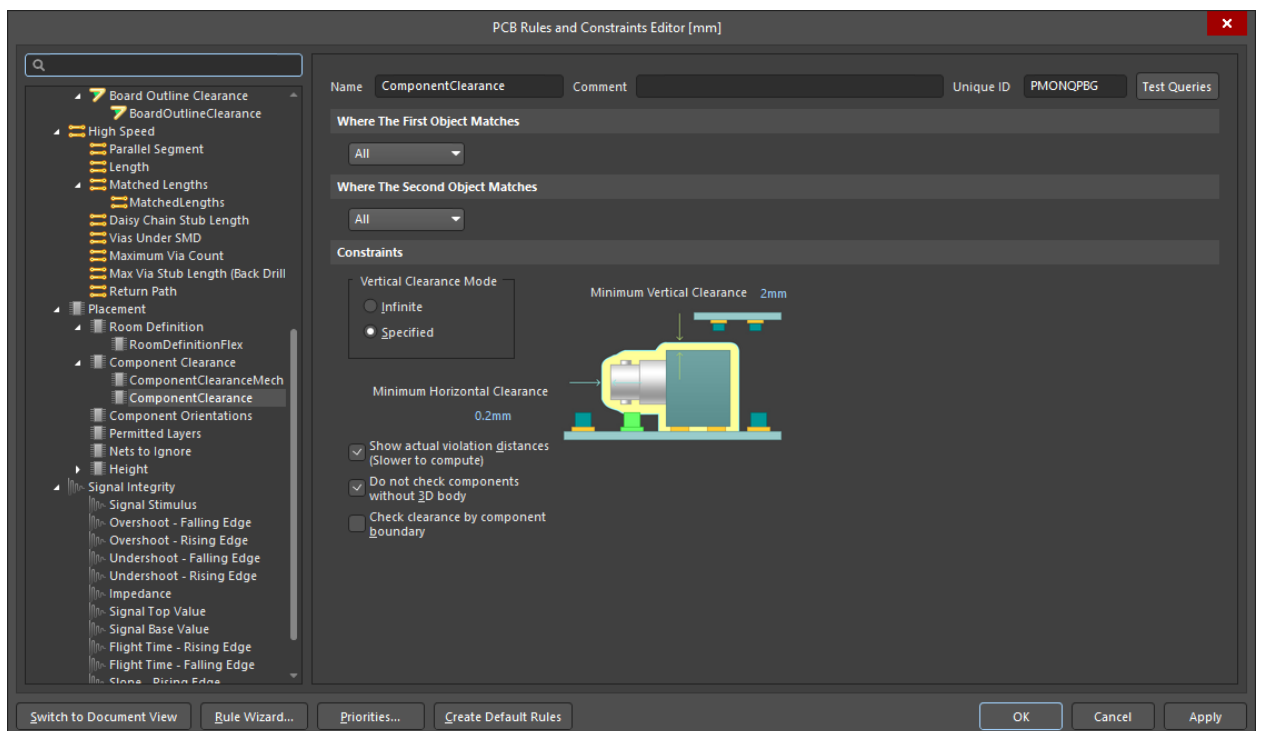


Механические компоненты можно внести как свободные 3D-тела или как свободные посадочные места. Если механические компоненты внесены как свободные посадочные места, то для того, чтобы винт и стойка не

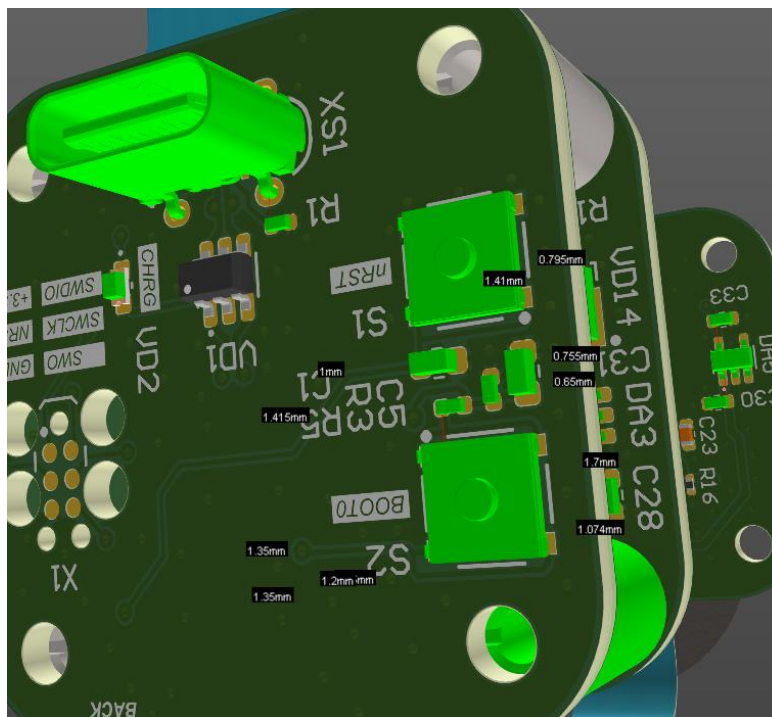
порождали ошибки Component Clearance, добавим все механическое компоненты в класс Mech и разрешим им накатываться друг на друга.



В текущей версии Altium Desginer есть одна особенность с использованием правила Component Clearance для проверки 3D-режима. Пусть, например, установлен компонентам зазор по вертикали 2 мм, а по горизонтали 0,2 мм.



Теперь, если в 3D-режиме плата развернута, то ошибок не показывается. Однако, если плату свернуть, то появляется большое число ошибок. При этом, если покрутить модель, то визуально никаких наложений не видно.



Связано это с тем, что при сворачивании гибко-жесткой печатной платы у компонентов очевидно меняются координаты по X и по Y. А вот правило зазоров компонентов Component Clearance это не учитывает и продолжает работать в плоскости экрана. Из-за этого полноценно использовать это правило для определения зазоров в 3D-режиме невозможно и для свернутого режима проверять зазоры компонентов придется в MCAD.

Особенности выпуска комплекта конструкторский документации

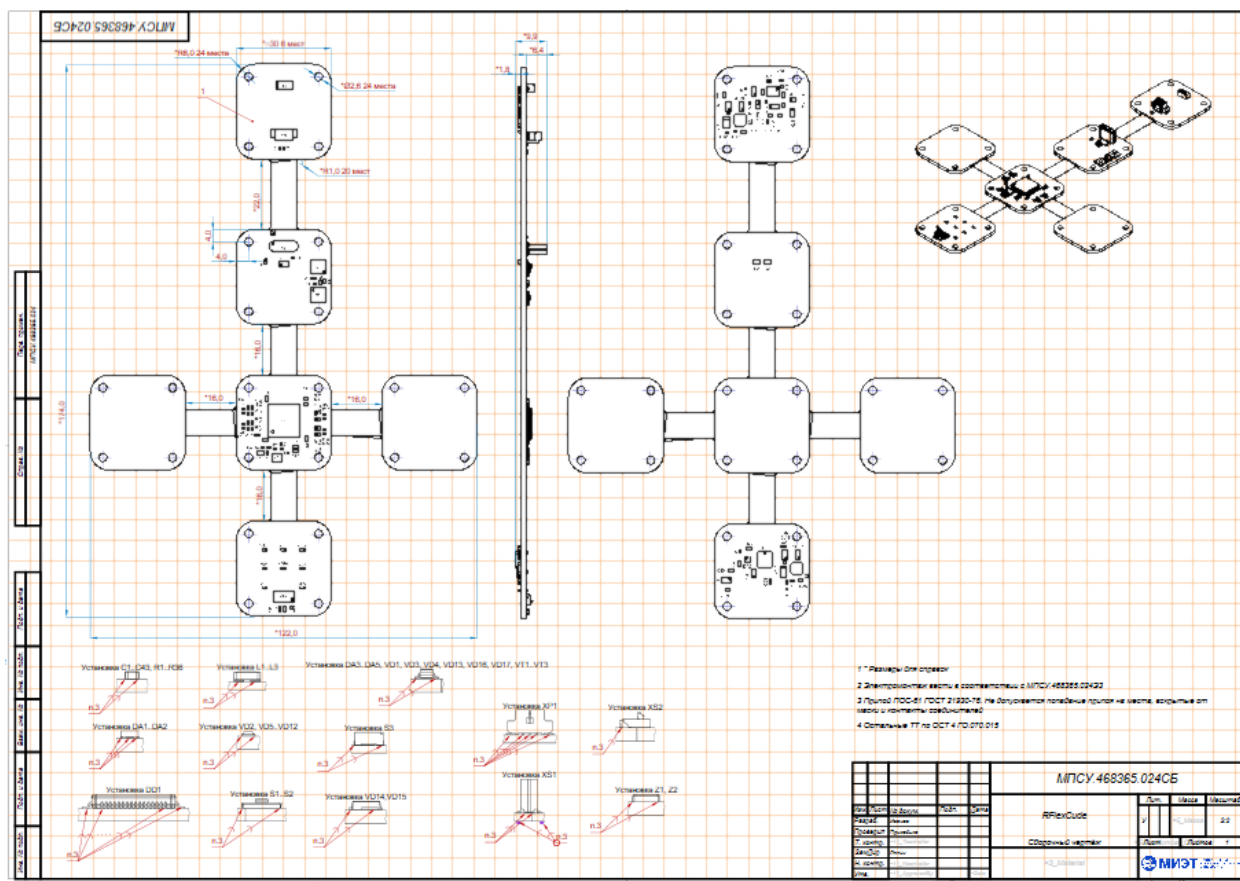
В своей основе комплект КД для печатного узла на гибко-жесткой печатной плате не сильно отличается от комплекта КД печатного узла на плате на жестком основании.

Гибко-жесткая печатная плата всегда является сборочной единицей, т.к. изготавливается из нескольких составляющих, соответственно основной конструкторский документ на нее - спецификация. При выборе обозначения гибко-жесткой печатной платы по справочнику ОК 012-93 [11] точного кода для гибко-жестких печатных плат в нем нет. Но гибко-жесткие печатные платы можно отнести к группе 68728х «Оборудование электротермическое, электросварочное и для диффузионной сварки. Устройства магнитопроводящие, токопроводящие, электроизолирующие, электромонтажные. Монтаж механический / Устройства электромонтажные.

Монтаж механический / Элементы электромонтажные / Панели, платы с элементами объемного монтажа шириной, мм», т.к. изготавливаются они в панели.

Как правило, спецификация на печатный узел, схема электрическая принципиальная ЭЗ, перечень элементов ПЭЗ и ведомость покупных ВП выполняются по обычным правилам без каких-либо особенностей, поэтому в примере они не показаны.

Сборка печатного узла обычно идет в развернутом виде на ровном столе, поэтому сборочный чертеж на печатный узел также выглядит по-обычному. За исключением того, что стоит подробнее нанести габаритные размеры с указанием размеров шлейфов. И позиционные обозначения компонентов не надо поворачивать для удобства чтения в свернутом виде (как в шелкографии), а надо оставить их в обычной ориентации, чтобы было удобнее монтажнику.



В документации на собственно гибко-жесткую печатную плату в спецификации на нее необходимо перечислить используемые материалы диэлектриков.

1 *Размеры для справок

2 Общие допуски по ГОСТ 30893.1-2002: H12, h12, IT 12/2

3 Неуказанные предельные отклонения размеров между осями двух любых отверстий $\pm 0,1\text{мм}$

4 Смещение центра металлизированного отверстия относительно центра контактной площадки не более 0,1мм

5 Плата должна соответствовать ГОСТ23752-79, группа жесткости 3.
Класс точности 5 по ГОСТ Р 53429-2009

6 Проводящий рисунок на плате выполнить в соответствии с
данными проектирования МПСУ.687281.024Д1 и данными конструкции МПСУ.687281.024Т5М

7 Шероховатость обрабатываемой поверхности Rz40

8 Геометрия жестких участков показана в зонах А. Стек жестких участков приведен в табл1.

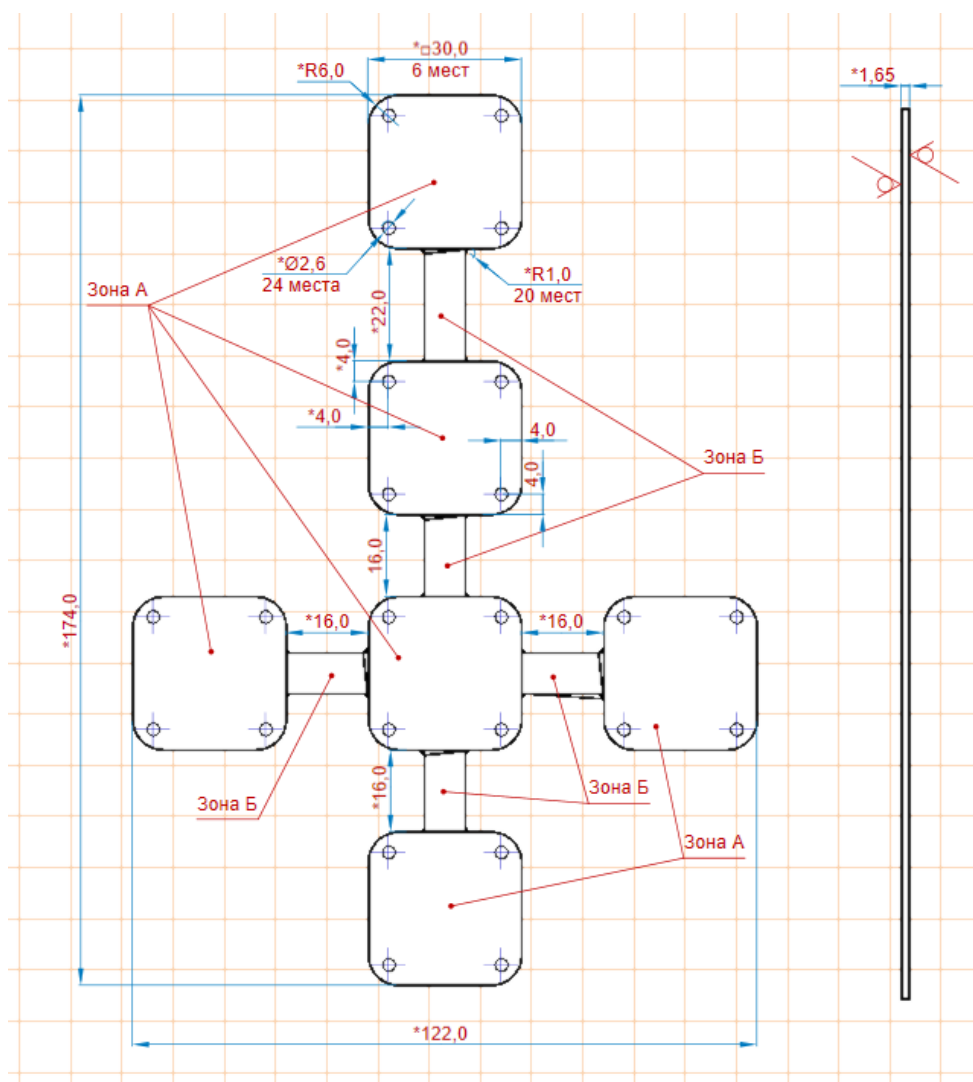
9 Геометрия гибких участков показана в зонах Б. Стек гибких участков приведен в табл2.

10 На наружных слоях жестких участков печатной платы защитная паяльная маска по
технологии изготовителя

11 Финишное покрытие жестких участков печатной платы О-Н(68)З Зл-Ко(99,5)0,25

12 Защитное покрытие гибких участков печатной платы покрывной защитной пленкой DuPont
Pyrallux LF0110

Основной вид приводится в развернутом виде с указанием зон стеков.



Расшифровку стека можно сделать через разрез (но его придется рисовать) или через использование Layer Stack Legend как таблицы для соответствующих участков печатной платы.

Табл. 1

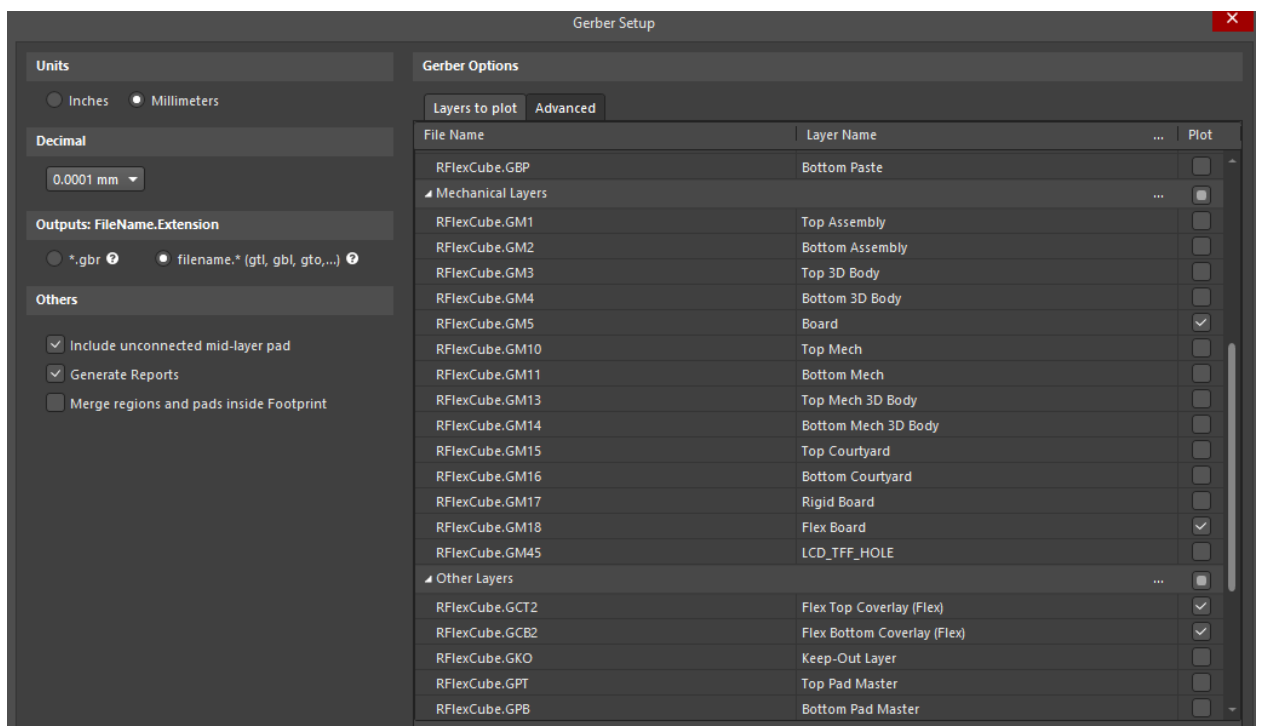
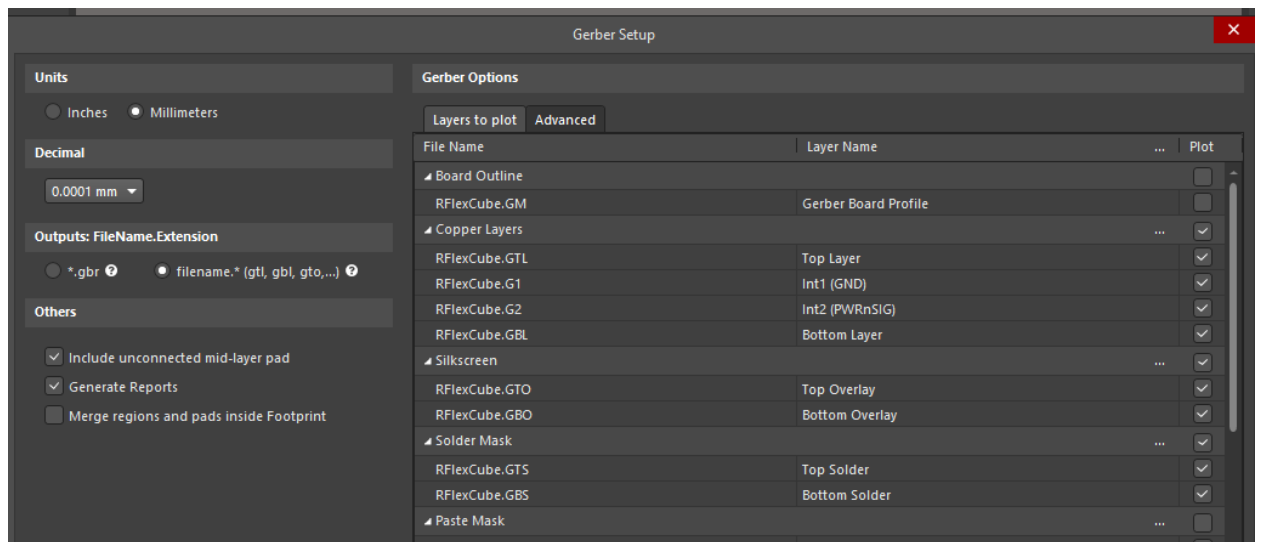
Слой	Толщина	Тип слоя	Материал
Layer		Legend	
Top Overlay			
Top Solder	0,03	Solder Mask	SunChemical XV501-T LDI
Top Surface Finish	0,00	Surface Finish	O-H(68)3 3л-Ко(99,5)0,25
Top Layer	0,04	Signal	Фольга 35мкм
	0,51	Dielectric	Стеклотекстолит FR-4 HiTg170 0,51мм
	0,07	Dielectric	Нетекучий эпоксидный препрег Tg170 70мкм
	0,07	Dielectric	Нетекучий эпоксидный препрег Tg170 70мкм
Dielectric 6	0,03	Adhesive	Адгезивная пленка DuPont Pyralux 25мкм
Int1 (GND)	0,02	Signal	Фольга 35мкм
	0,10	Dielectric	Полиимидная пленка DuPont AP8545R 0,1мм
Int2 (PWRnSIG)	0,02	Signal	Фольга 35мкм
Dielectric 7	0,03	Adhesive	Адгезивная пленка DuPont Pyralux 25мкм
	0,07	Dielectric	Нетекучий эпоксидный препрег Tg170 70мкм
	0,07	Dielectric	Нетекучий эпоксидный препрег Tg170 70мкм
	0,51	Dielectric	Стеклотекстолит FR-4 HiTg170 0,51мм
Bottom Layer	0,04	Signal	Фольга 35мкм
Bottom Surface Finish	0,00	Surface Finish	O-H(68)3 3л-Ко(99,5)0,25
Bottom Solder	0,03	Solder Mask	SunChemical XV501-T LDI
Bottom Overlay		Legend	
Общая толщина: 1,61			

Табл. 2

Слой	Толщина	Тип слоя	Материал
Layer			
Flex Top Coverlay	0,03	Solder Mask	Покрывная пленка DuPont Pyralux LF0100 25мкм
Dielectric 6	0,03	Adhesive	Адгезивная пленка DuPont Pyralux 25мкм
Int1 (GND)	0,02	Signal	Фольга 35мкм
	0,10	Dielectric	Полиимидная пленка DuPont AP8545R 0,1мм
Int2 (PWRnSIG)	0,02	Signal	Фольга 35мкм
Dielectric 7	0,03	Adhesive	Адгезивная пленка DuPont Pyralux 25мкм
Flex Bottom Coverlay	0,03	Solder Mask	Покрывная пленка DuPont Pyralux LF0100 25мкм
Общая толщина: 0,24			

Перед экспортом герберов нужно обновить контура печатной платы и ее зон. В слое Board M5 должен быть полный контур печатной платы (включающий в себя геометрию внутренних вырезов BoardCutout-ов), в слое M17 Rigid Board – контура жестких частей, в слое M18 Flex Board – контура гибких частей.

При экспорте герберов (данных конструкции) кроме слоев с металлизацией, паяльной маски, шелкографии, контура печатной платы и файлов сверловки, еще нужно экспортировать слои с контуром гибкой части (Flex Board) и слои с покрывной маской (Top и Bottom Flex Coverlay). Слой с контурами жестких частей экспортировать необязательно, он производителем выводится из общего контура печатной платы.




В данных проектирования необходимо расписать назначение файлов экспортированных герберов и файлов сверловки.

Перв. примен. МПСУ.687281.024		МПСУ.687281.024Д1			
Стр. №					
Подп. и дата					
Име. № подл.					
Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Име. № подл.					

Файл	МПСУ.687281.024Т5М.7z
Источник Altium Designer	
Формат Gerber mm, 4:4, RS-274X	
Слой	Имя файла
Шелкография верхнего слоя	МПСУ.687281.024Т5М.GTO
Паяльная маска верхнего слоя (негативный слой)	МПСУ.687281.024Т5М.GTS
Металлизация верхнего слоя	МПСУ.687281.024Т5М.GTL
Металлизация первого внутреннего слоя Int1	МПСУ.687281.024Т5М.G1
Металлизация второго внутреннего слоя Int2	МПСУ.687281.024Т5М.G2
Металлизация нижнего слоя	МПСУ.687281.024Т5М.GBL
Паяльная маска нижнего слоя (негативный слой)	МПСУ.687281.024Т5М.GBS
Шелкография нижнего слоя	МПСУ.687281.024Т5М.GBO
Контур платы	МПСУ.687281.024Т5М.GM5
Контур гибкой части	МПСУ.687281.024Т5М.GM18
Покрывная пленка верхнего слоя гибкой части	МПСУ.687281.024Т5М.GCT2
Покрывная пленка нижнего слоя гибкой части	МПСУ.687281.024Т5М.GCB2
Формат mm, 4:4	
Сквозные металлизированные отверстия	МПСУ.687281.024Т5М-plated.txt
Сквозные неметаллизированные отверстия	МПСУ.687281.024Т5М-Nonplated.txt
Сквозные металлизированные слотовые отверстия	МПСУ.687281.024Т5М-Slot-plated.txt
Сквозные неметаллизированные слотовые отверстия	МПСУ.687281.024Т5М-Slot-Nonplated.txt

МПСУ.687281.024Д1				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Иванов			
Проверил	Приходько			
Т. контр.				
Зам.Дир	Лялин			
Н. контр.				
Утв.				

Плата печатная гибко-жесткая		Лит.	Масса	Масштаб
Данные проектирования		у		1:1
		Лист	Листов 1	
 МИЭТ <small>НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ</small>				

Копировал А Формат А4

Данный комплект конструкторской документации приведен только для получения готовой гибко-жесткой печатной платы. Иногда необходимо получать гибко-жесткую печатную плату, расположенную в панели. В этом случае, чертеж становится несколько сложнее, с указанием всей панели, профиля фрезеровки и геометрии перемычек.

Литература

1. Лопаткин, А. Проектирование печатных плат в Altium Designer. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : ДМК Пресс, 2016. — 400 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/93565>

2. Суходольский В.Ю. Altium Designer: сквозное проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах: учеб. Пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 560 с.

3. Желобаев А.Л. Методические указания к лабораторным работам по курсу «САПР Altium Designer»: М.:МИЭТ, 2019 – 104с.

4. Приходько Д.В., Айрапетян А.А. Учебно-методическое пособие по работе с библиотеками в Altium Designer: учеб. Пособие. М.: МИЭТ, 2022 – 180 с.

Перечень ресурсов сети «Интернет»

5. Репозиторий автора с учебной библиотекой
<https://github.com/dee3mon/StudentsLibraryGIT>

6. Репозиторий автора с учебными материалами по Altium Designer
<https://github.com/dee3mon/altium-methodic>

7. Репозиторий автора с шаблонами для Altium Designer
<https://github.com/dee3mon/altium-templates>

8. Онлайн-документация Altium Designer, раздел Designing a Rigid-Flex PCB <https://www.altium.com/documentation/altium-designer/designing-rigid-flex-pcb>

9. Тематический форум electronix.ru, раздел «Разрабатываем ППП в САПР - PCB development», <https://electronix.ru/forum/index.php?showforum=17>, доступно после свободной регистрации

10. Сайт Eurointech, раздел «Учебные материалы»
<http://www.eurointech.ru/education/selftraining/>

11. Общероссийский классификатор изделий и конструкторских документов ОК 012-93 <http://classinform.ru/ok-eskd/kod>

12. Раздел «Гибко-жесткие печатные платы» базы знаний ООО «Резонит»
<https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/tekhnologiya-izgotovleniya-pechatnykh-plat-v-kartinkakh/gibko-zhestkie-pechatnye-platy/>

13. Раздел «Технологические возможности/ Стандартные гибко-жесткие печатные платы» ООО «Резонит» <https://www.rezonit.ru/pcb/gibko-zhestkie/serial/>

14. Микроконтроллер STMicroelectronics STM32F103RBT6 <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103rb.html>

15. FPC-разъем Molex 503480-1000 <https://www.molex.com/en-us/products/part-detail/5034801000>

16. Модуль контроля подсветки светодиодов Texas Instruments TPS61160DRVT <https://www.ti.com/product/TPS61161>

17. Белый светодиод Vishay VLMW1300 <https://www.vishay.com/en/product/82435/>

18. Вертикальный USB-C разъем Molex 217182-0001 <https://www.molex.com/en-us/products/part-detail/2171820001>

19. Шлейф-зонд Tag-Connect TC2030-CTX-NL-STDC14 <https://www.tag-connect.com/product/tc2030-ctx-6-pin-cable-for-arm-cortex>

20. Программатор STMicroelectronics STLINK-V3 <https://www.st.com/en/development-tools/stlink-v3set.html>

21. Контроллер зарядки и питания Analog Devices LTC4067EDE <https://www.analog.com/en/products/ltc4067.html>

22. Разъем Molex 53398-4003 <https://www.molex.com/en-us/products/part-detail/533984003>

23. Полиимидная пленка DuPont AP 8545R <https://www.dupont.com/electronics-industrial/pyralux-ap.html>

24. Адгезивная пленка DuPont Pyralux LF0100 <https://www.dupont.com/electronics-industrial/pyralux-lf.html>

25. Стеклотекстолит FR-4 Tg170 https://www.rezonit.ru/upload/spetsifikatsii/KB-6167_H1170.pdf

Каналы Youtube с видеоуроками по Altium Designer

26. Официальный канал Altium Designer <https://www.youtube.com/channel/UCpCi8Hpe4nIg4qvy2vpCGNQ>

<https://www.youtube.com/user/SabuninAlexey>

28. Плейлист «Altium Designer» на канале Сергея Булавинова

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLgUwXvgNkHqJ3G5UoLGMfHJM2cm4Afdx>

29. Канал официального представительства Altium Russia

https://www.youtube.com/channel/UCvZ_kyV4ATrQfjmtVpuj0LQ

30. Плейлист «Altium Designer» на канале консультационного центра

АМКАД <https://www.youtube.com/watch?v=PcStOG7sRqk&list=PLUk9KaCJSP-UAcH1uLu6mOQmDTmZGCND8>

31. Канал Robert Feranec - автора образовательного сообщества Fedevel

Academy <https://www.youtube.com/user/matarofe/featured>

Разработчик:

Ст. преподаватель Института МПСУ

Приходько Д.В.