ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Инженерная реализация аппаратного комплекса системы стохастического охлаждения коллайдера NICA

от физической задачи к аппаратной реализации

Осипок К., Горельшев И.

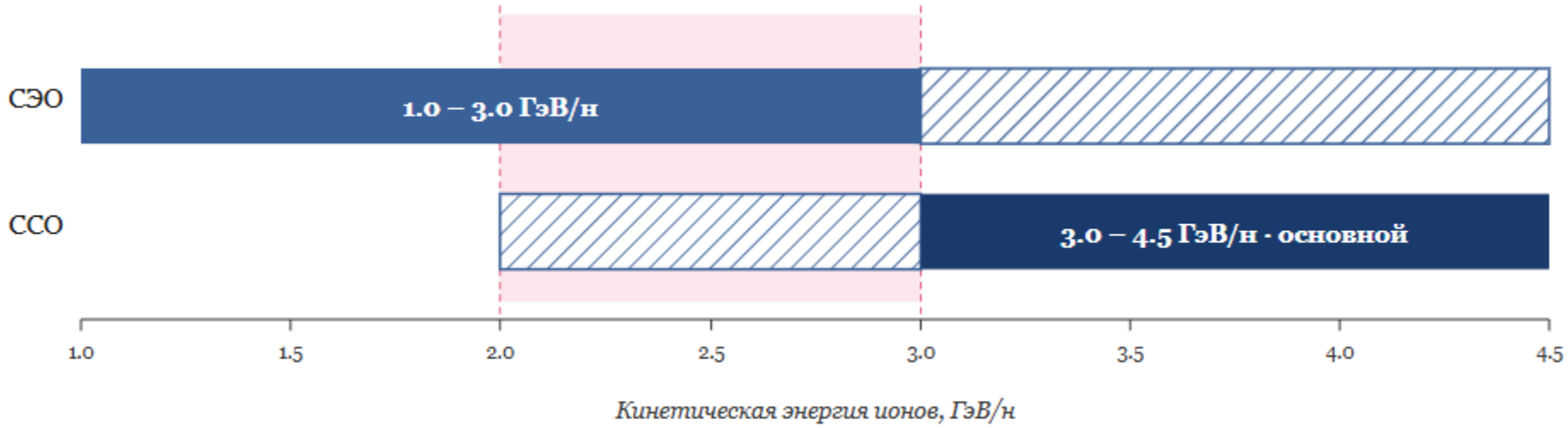
Лаборатория физики высоких энергий, ОИЯИ

Ускорительный комплекс NICA:

XVI международный семинар по проблематике ускорителей заряженных частиц
имени В.П.Саранцева - 2026

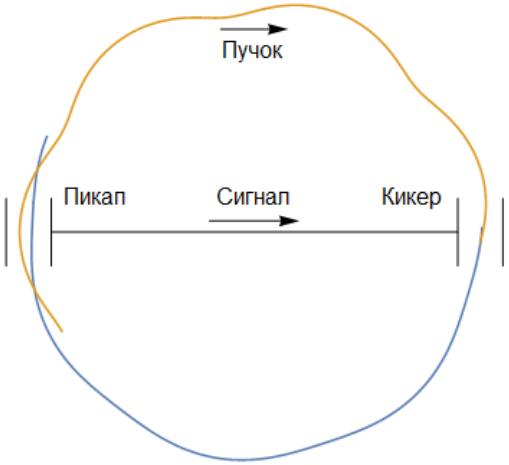
0. Физика

- ЗАДАЧА ССО – Компенсация внутрипучкового рассеяния
- Работа во всём рабочем цикле коллайдера: накопление, формирование сгустков, столкновения.
- Совместная работа с СЭО в зоне перекрытия **2.0 – 3 ГэВ/н**.



1. ССО – описание параметров

- ССО – Широкополосная система обратной связи в СВЧ диапазоне
- пикап → усилитель → фильтр → задержка → усилитель мощности → кикер.
- Основные параметры: f_c — центральная частота; Δf — рабочая полоса.





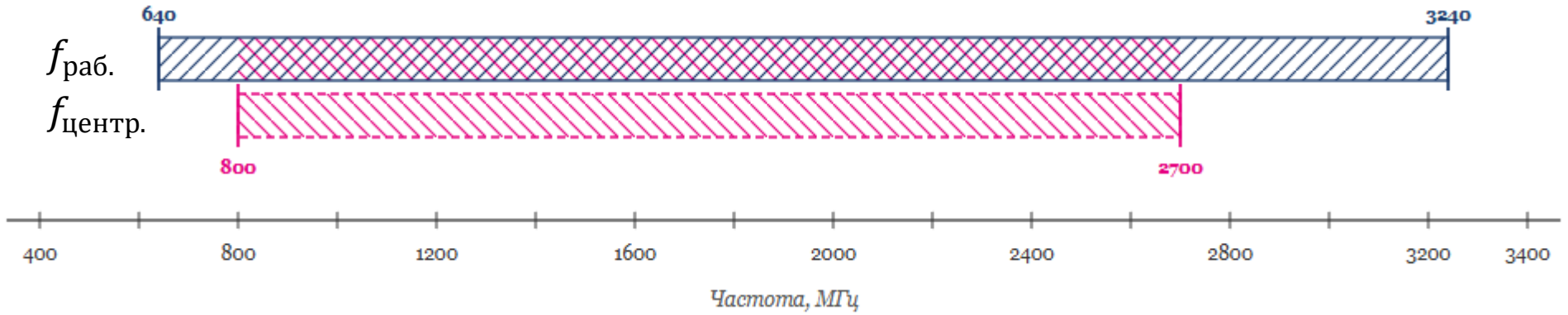
- Темп $\frac{1}{\tau} \sim \Delta f$
- $g_{opt}(\Delta f) \rightarrow \frac{1}{\tau} max$
- Аксептанс $\frac{\Delta p}{p} \sim \frac{1}{f_c}$

$$\left(\Delta p / p\right)_{\max} = \frac{f_0}{2 \cdot f_c \cdot \left(\eta_0 + 2 \cdot \frac{C_{\text{pk}}}{C_0} \cdot \eta_{\text{pk}}\right)} \qquad \frac{1}{\tau_{\parallel}} = f_c \cdot \Delta f \cdot K \qquad K = \frac{16\sqrt{\pi} \cdot \eta \cdot \sigma_p \cdot f_0 \cdot C_{\text{stack}}}{3 \cdot N_{\text{beam}} \cdot C_0 \cdot f_{\text{rev}}^2}$$

$$\frac{1}{\tau_{S.Cool}} = \frac{W}{N}\left[2g\tilde{M} - (M+U)g^2\right]; \longrightarrow g_{opt} = \frac{\tilde{M}}{M+U}; \quad \frac{1}{\tau_{opt}} = \frac{W}{N}\frac{\tilde{M}^2}{M+U};$$

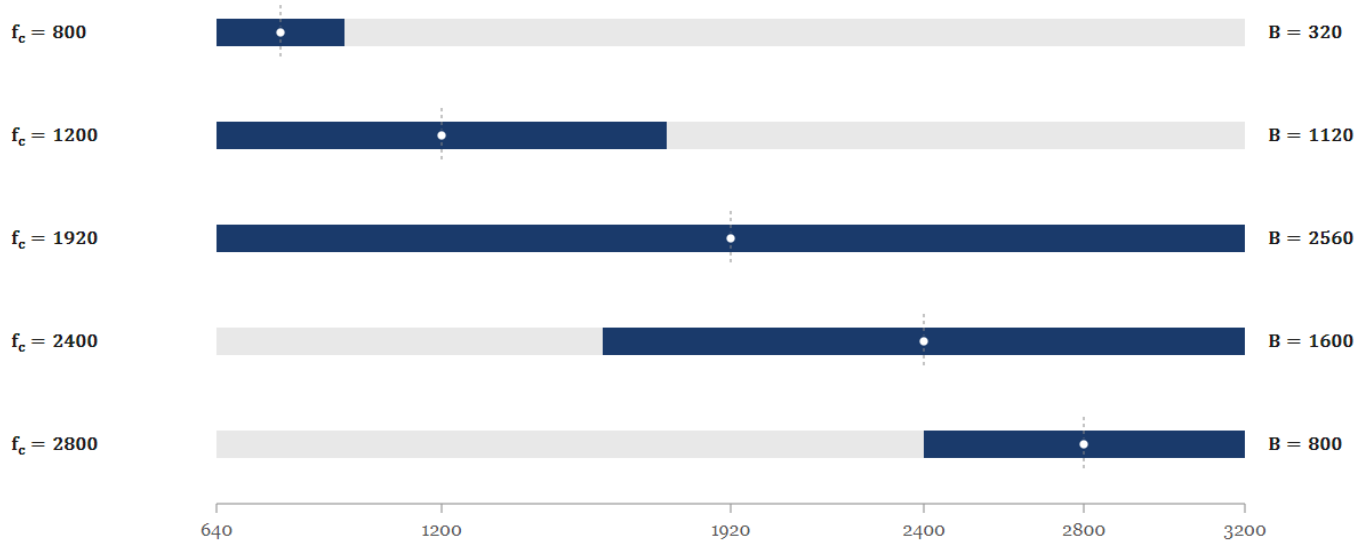
2. Выбор частот ССО

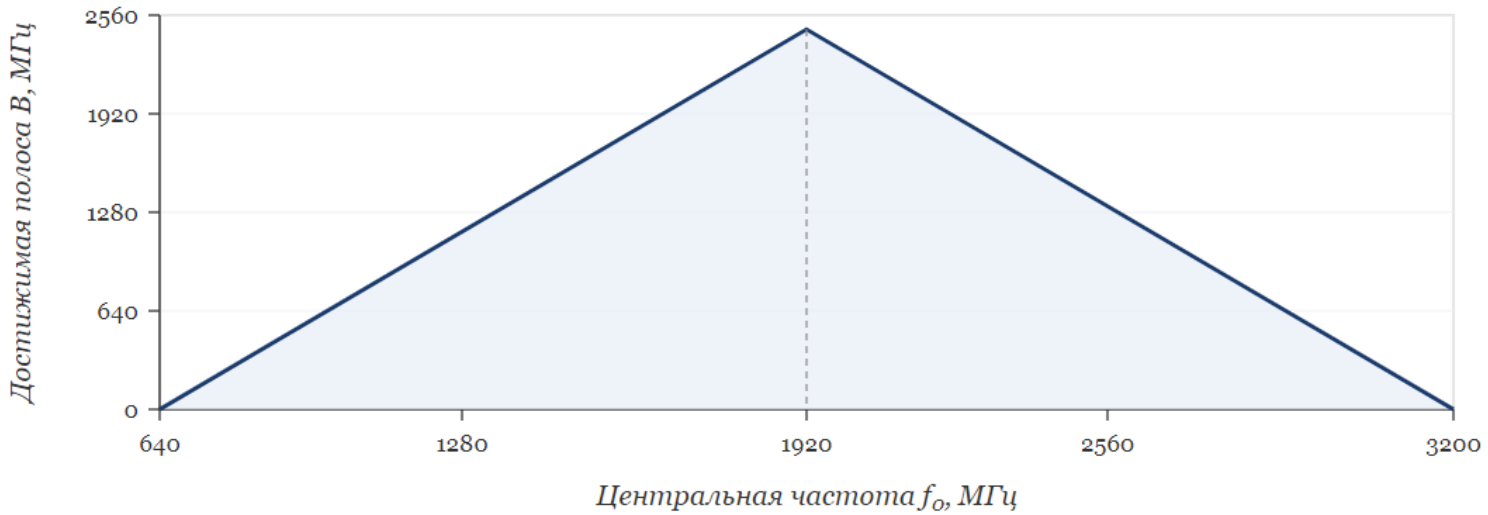
- Исходный данные – диапазон по энергии -> требуемый аксептанс и темп охлаждения.
- Расчёт: 1. требуемая перестройка по частоте. 2. Требуемая полоса частот.
- Система должна иметь возможность динамически перестраиваться.
- -> Выбор рабочей полосы частот.
- При разработке СВЧ элементов ССО – частоты – внешнее ТЗ.



Выбранная полоса частот и диапазон перестройки центральной частоты

3. Компромисс при фиксированной полосе частот





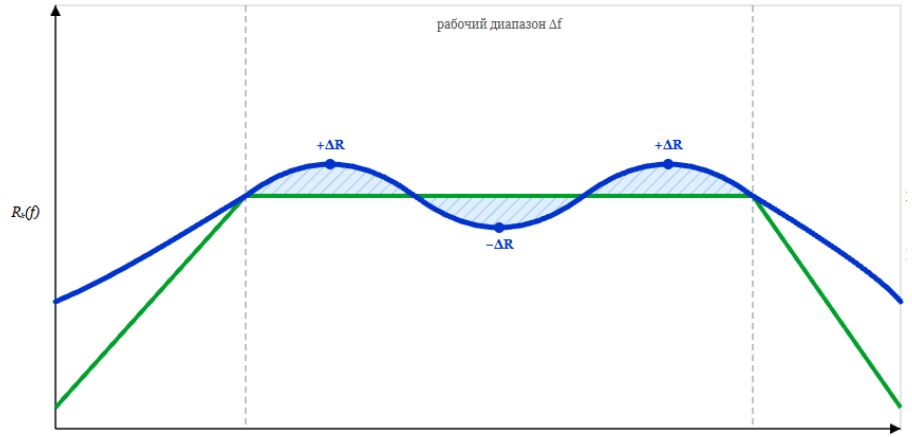
4. Выбор числа диапазонов. Критерии качества

- Задача – обеспечить работу системы в заданном диапазоне частот.
- Требуется перестройка центральной $f_{c.}$. Как это можно реализовать?
- Вариант 1 – широкополосная система с фильтрацией нужного диапазона.
- Вариант 2 – многоканальная система. Выбор центральной частоты взвешенным суммированием каналов.
- Каждый элемент системы влияет на качество системы ССО в целом.
- Для широкополосных систем получить требуемое качество сложнее, чем для узкополосных.
- Для каждой из подсистем можно ввести критерий качества K_i.
- Для системы ССО можно выделить следующие подсистемы по разному влияющие на характеристики системы.

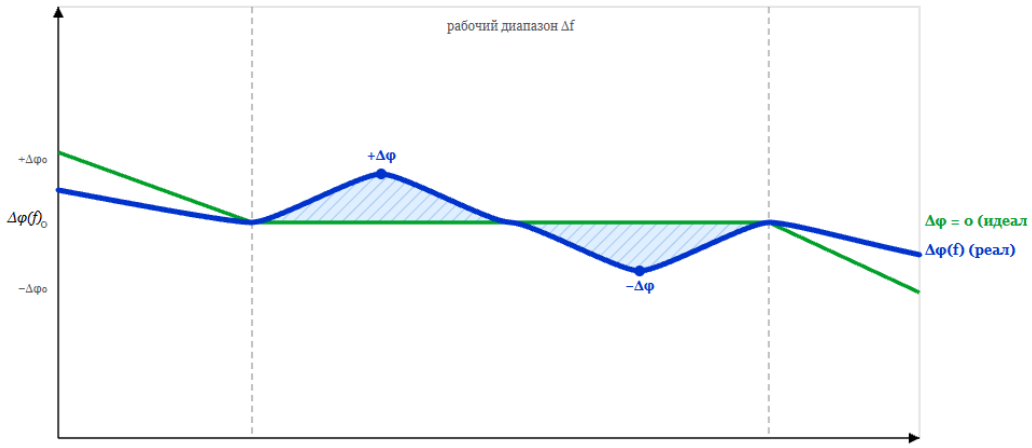


5. Критерии качества. Кикер.

- Влияние кикера.



АЧХ кикера



ФЧХ кикера

$$\lambda(f) = \frac{1}{2N}\left[2g(f)\cos(\Delta\phi(f)) - g^2(f)\left(M(f) + U(f)\right)\right]$$

$$\mathbf{K_{amp}{}^{k} = 1 / (1 + \sigma_{r,k}{}^{2})}$$

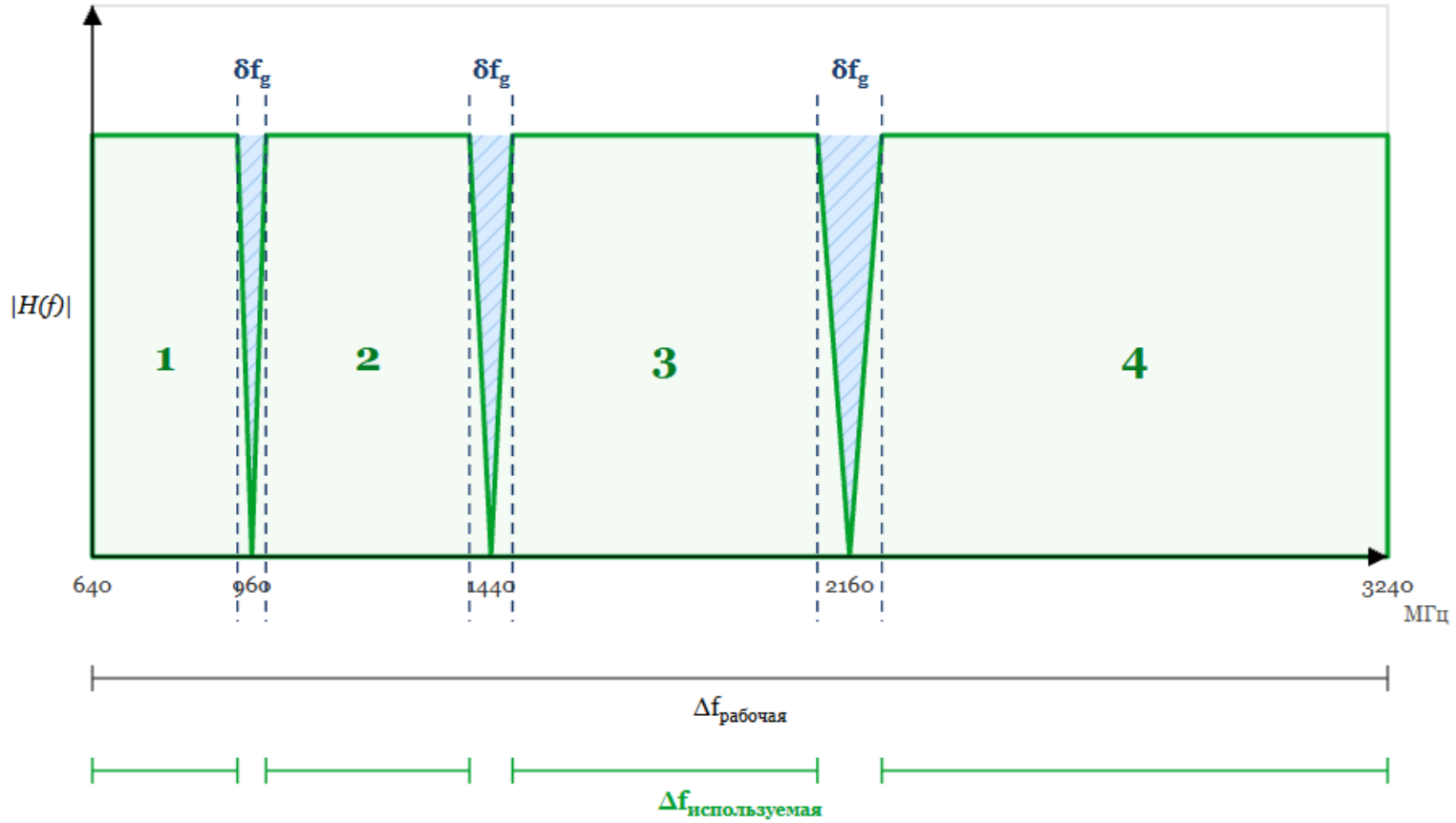
$$\sigma_{r,k}{}^{2} = \mathrm{Var}(R_k) / \langle R_k \rangle^2$$

$$\mathbf{K_{phase} \approx 1 - \langle \Delta\varphi^2 \rangle_w}$$

$$K_{eff} = K_{amp} \cdot K_{phase}$$

6. Критерии качества. СВЧ - тракт

- Влияние числа выбранных диапазонов тракта.



$$\Delta f_{\text{используемая}} = \Delta f_{\text{рабочая}} - \Sigma_i \, \delta f_{\text{guard},i}$$

$$K_{\text{band}}^{\text{RF}} = \Delta f_{\text{используемая}} / \Delta f_{\text{рабочая}} = 1 - (\Sigma_i \, \delta f_{\text{guard},i}) / \Delta f_{\text{рабочая}}$$

7. Критерии качества. Пикап. УМ.

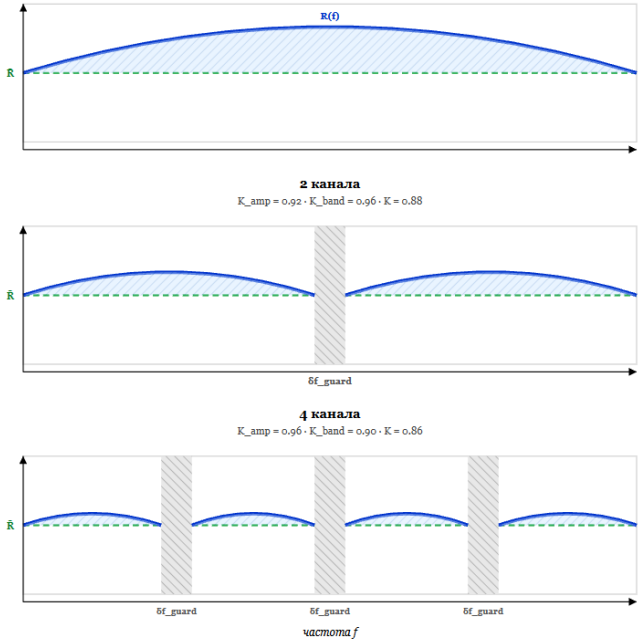
- Параметр качества пикапа.
  - Импеданс пикапа определяет соотношение сигнал/шум.
  - Фазовые и амплитудные отклонения могут быть компенсированы эквалайзерами СВЧ тракта.
  - При штатной интенсивности – для продольного канала – сигнал/шум >30дБ если использовать кикер как пикап.
  - Для поперечного пикапа и для режимов работы с низкой интенсивностью нужно учитывать АЧХ пикапа.
  - Можно ввести критерий качества, аналогичный кикеру: $K_{amp}^{pu} \approx 1/(1+\sigma_p^2)$
- Критерии качества усилителя мощности
  - УМ искажает сигнал. Уровень ошибки зависит от устройства УМ, уровня компрессии и статистических свойств сигнала
    - Можно ввести составной критерий качества УМ $K_{tot}^{PA} = K_{IMD3}^{PA} * K_{amp}^{PA} * K_{ph}^{PA}$
    - K_{IMD3}^{PA} - шумовая добавка интермодуляционных составляющих
    - K_{amp}^{PA} - динамическая модуляция амплитуды - свойство AM-AM характеристики УМ
    - K_{ph}^{PA} - динамическая модуляция фазы - свойство AM-PM характеристики УМ

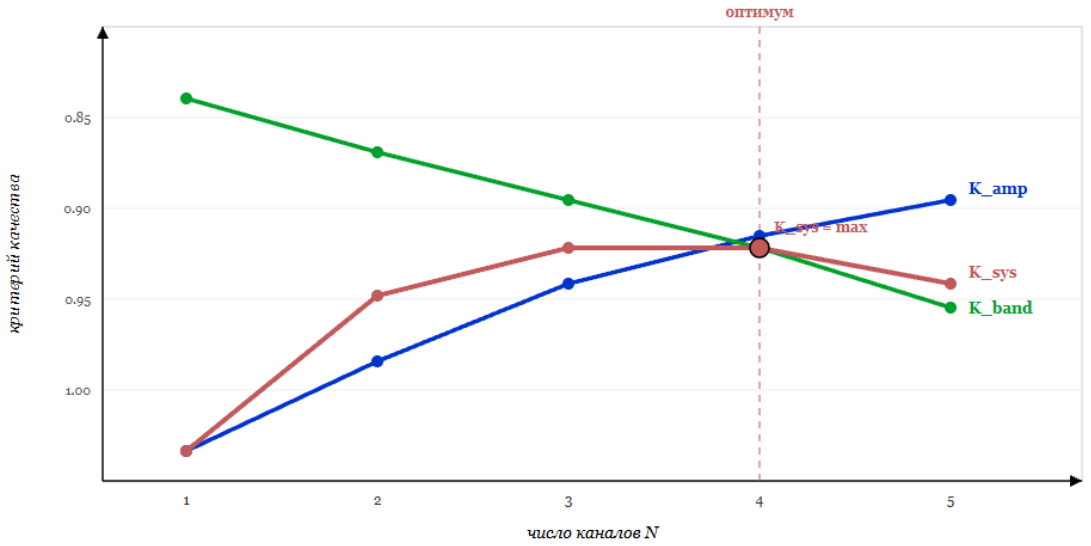
8. Сквозной критерий качества

- Общий критерий качества системы складывается из всех входящих.

$$K_{sys} = \boxed{K_{amp}^{pu} \cdot K_{phase}^{pu}} \cdot \boxed{K_{band}} \cdot \boxed{K_{IMD} \cdot K_{amp}^{RF} \cdot K_{phase}^{RF}} \cdot \boxed{K_{amp}^{k} \cdot K_{phase}^{k}}$$

- При проектировании – задача максимизировать этот критерий для всей системы. Если есть запас по параметрам – выгодно разменять между компонентами системы.



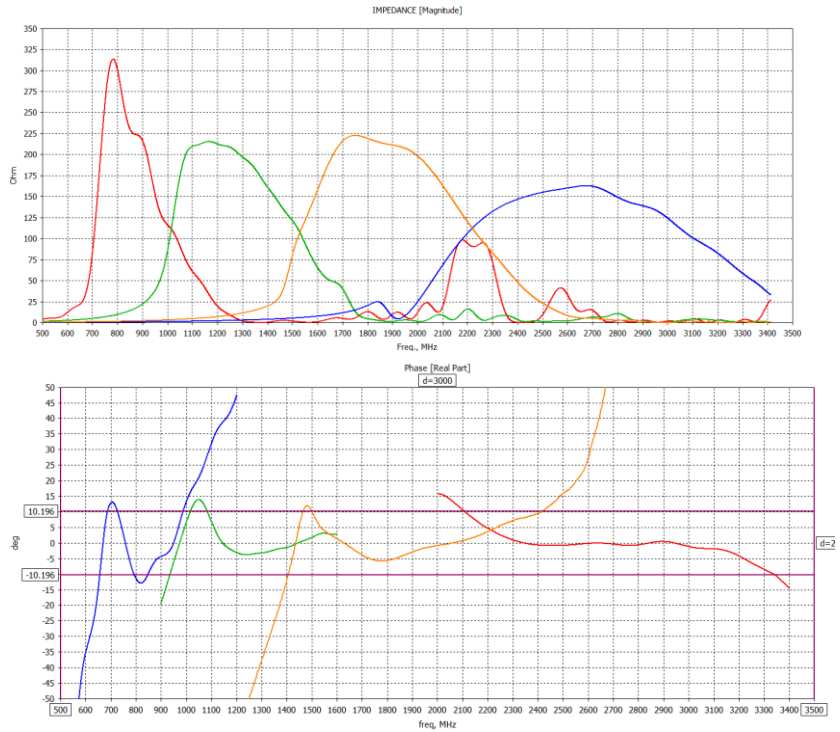


- Выбор числа диапазонов - задача на оптимум по характеристика и по сложности системы.

- Для коллайдера 4 диапазона -> 4 x 2кольца x 3системы = 24 канала. Больше уже не целесообразно

9. Предварительная оценка пар-в ССО

- Коэффициент качества – объективная величина, используемая при оптимизации элементов ССО.
- Сейчас – полу-эмпирическая, планируется строгое обоснование и уточнение для всех элементов.
- Позволяет сравнивать разные варианты, используется при оптимизации в CAD – проектировании.
- Промежуточный итог эскизного моделирования – выбран рабочий диапазон, выбрано число поддиапазонов и частотное разбиение на поддиапазоны.



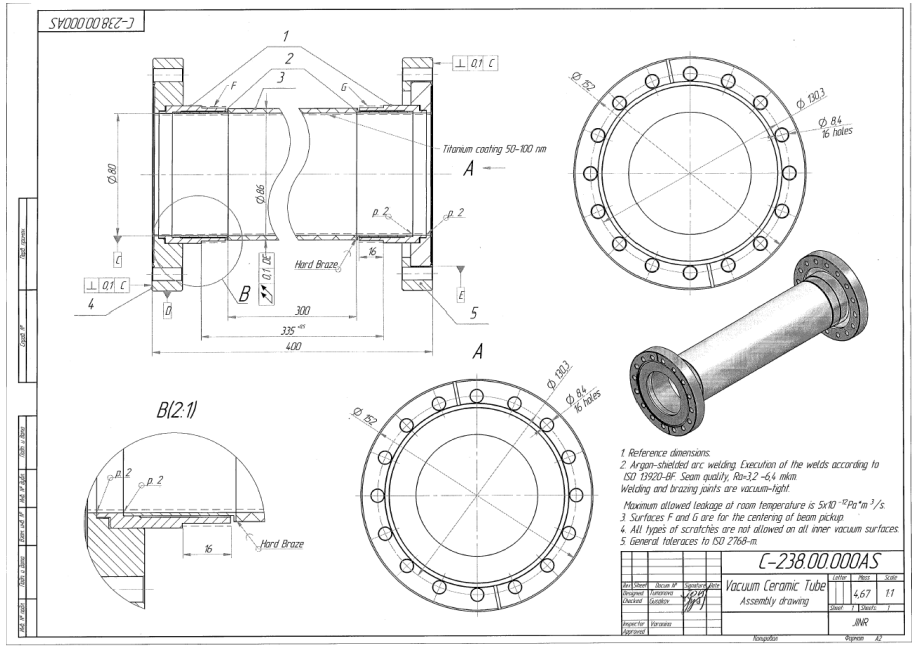
Предварительные АЧХ и ФЧХ пикапов/кикеров

Распределение полосы по каналам, ГГц			
0,64-0,96	0,96-1,44	1,44-2,16	2,16-3,24
f_c=0,8	f_c=1,2	f_c=1,8	f_c=2,7

	640-960	960-1440	1440-2160	2160-3240
Наибольшая ср.квадр. входная мощность на кикере при оптимальном усилении, Вт	12	24	53	95
Суммарная максимальная мощность усилителей на кикере, Вт	50	100	200	400
Неравномерность АЧХ, дБ	≤ ±1.25			
Отклонение от линейной фазы, градусов	≤ ±15			

10. Инженерные соображения. Керамические вставки

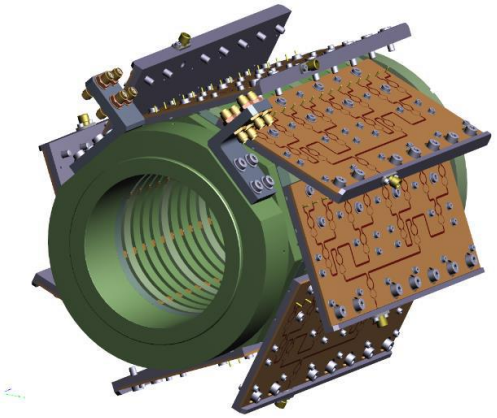
- Размещение ССО – тёплая секция -> нет необходимости в креостате. -> можно использовать радиопрозрачные вставки->
- -> 1. не-вакуумные пикапы/кикеры 2. простота теплоотвода 3. монтаж/демонтаж без необходимости разгерметизации -> 4. возможность модификации и различных комбинаций/режимов работы
- Конструктивные удобства, но необходимо учитывать влияние керамической камеры.
- Необходимость напыления тонких плёнок



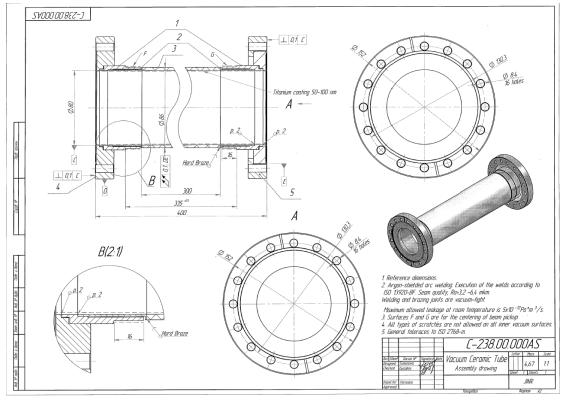


Конструкция керамической камеры и монтаж на коллайдере

11. Инженерные соображения. Керамические вставки



+



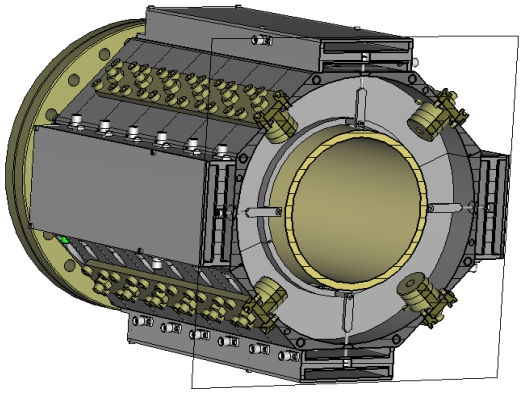
= Не работает (((=>

Исходный вариант

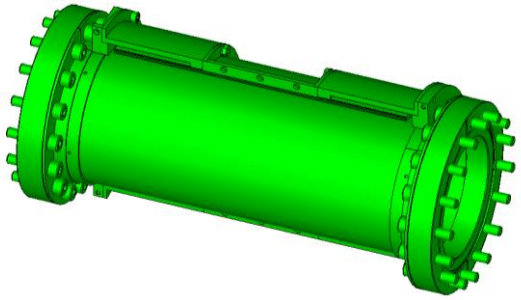
Керамическая камера

=> Собственная разработка пикапов/кикеров => Гофрированный пикап

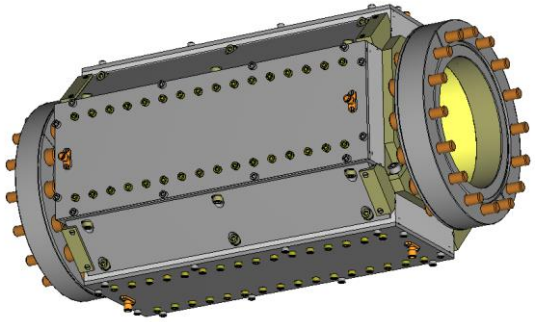
12. Компоненты. Пикапы/кикеры. Эволюция.

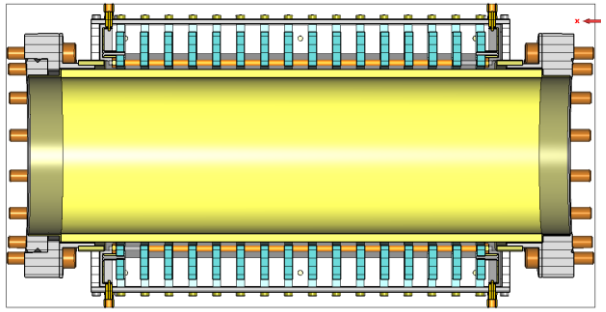


Пикап кольцевой продольный диапазон 2.

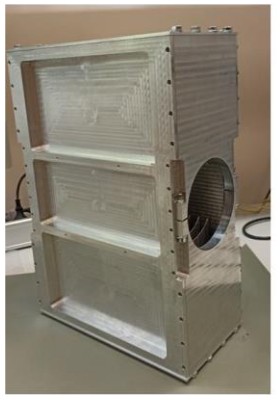


Пикап на диэл.вставке продольный диапазон 4.

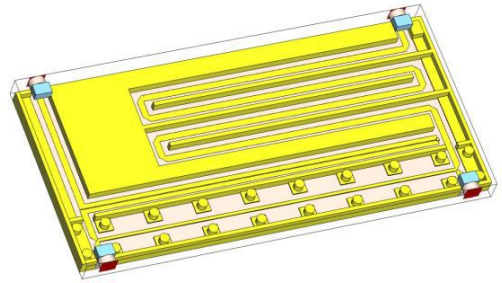


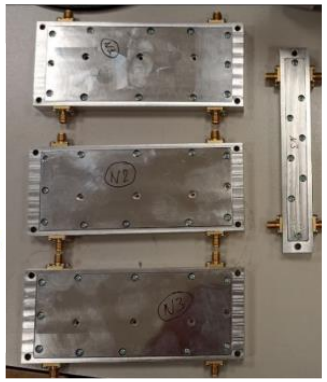


Пикап гофрированный продольный диапазон 3.



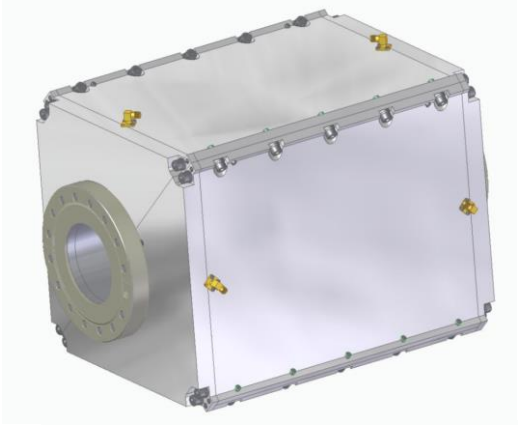




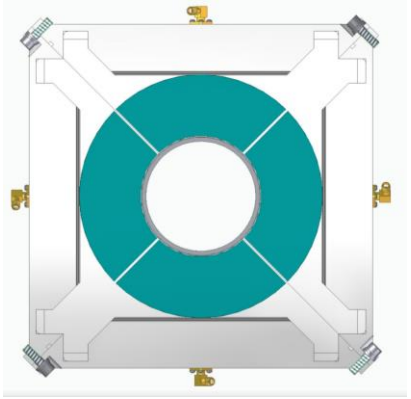


Пикап гофрированный поперечный 400МГц для Шоттки-монитора Бустра

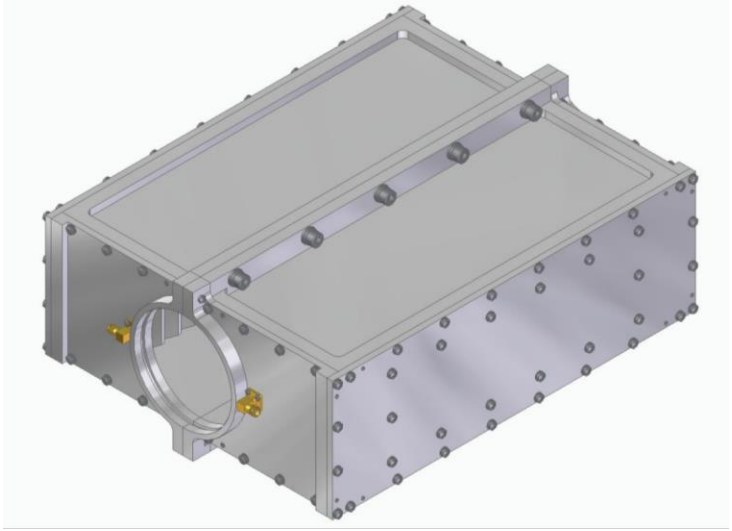
12. Компоненты. Пикапы/кикеры. Эволюция.



Пикап штатный продольный диапазон 2.



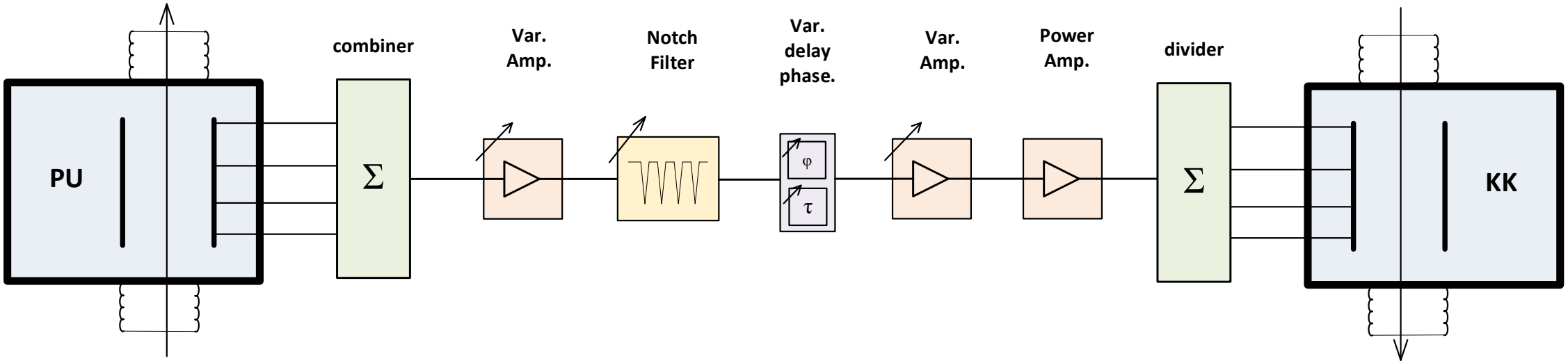
Пикап штатный продольный диапазон 1.



Пикап поперечный штатный Диапазон 2

13. ССО. Концепция. Электроника

Принципиальная схема – приближение 1

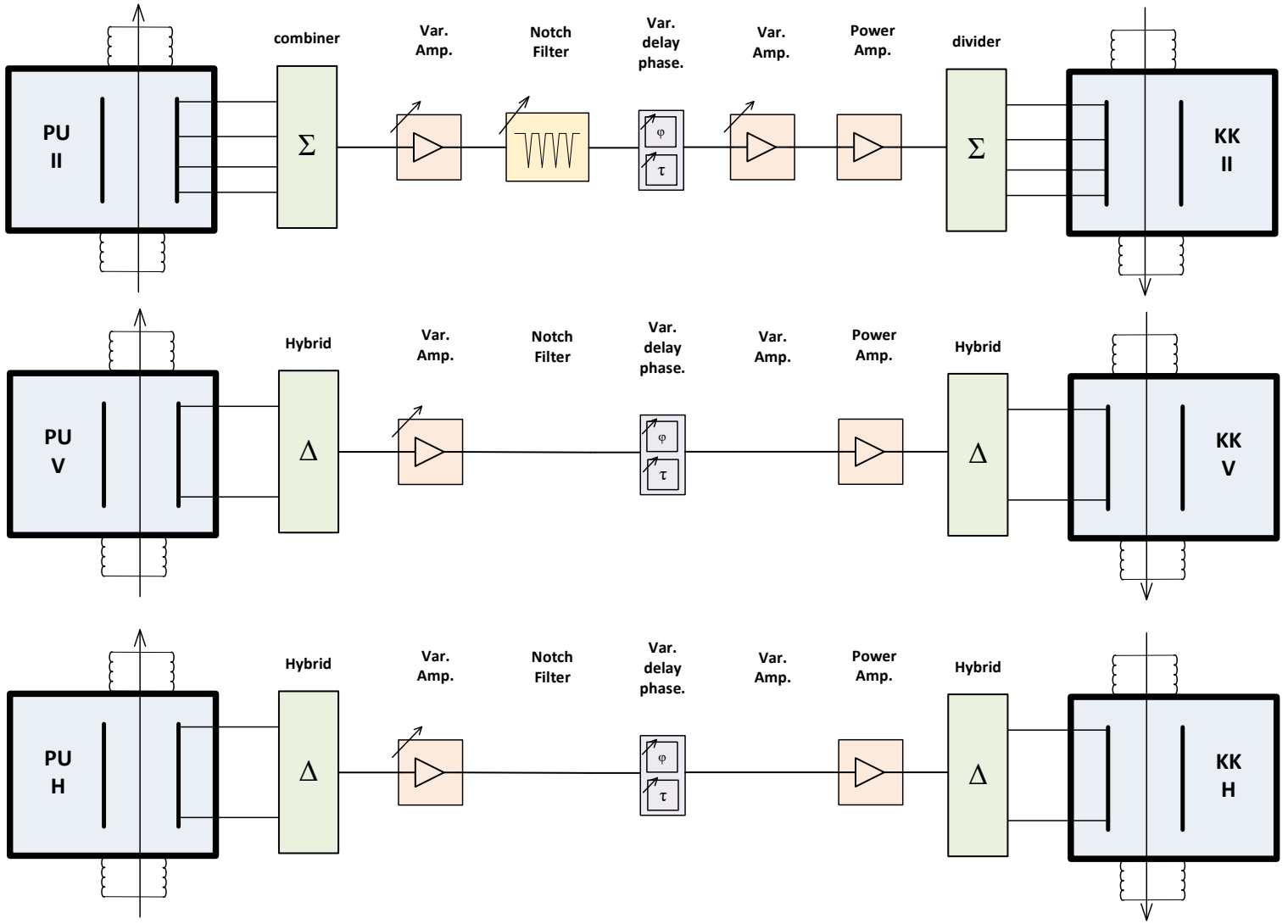


нужно сигнал провести по тракту без искажений с возможностью регулировки задержки, фазы и усиления (выходной мощности)

Плюс – фильтрация гармоник для метода фильтров.

14. ССО. Концепция. Электроника

Принципиальная схема – приближение 2



3 подсистемы -

1 горизонтальная

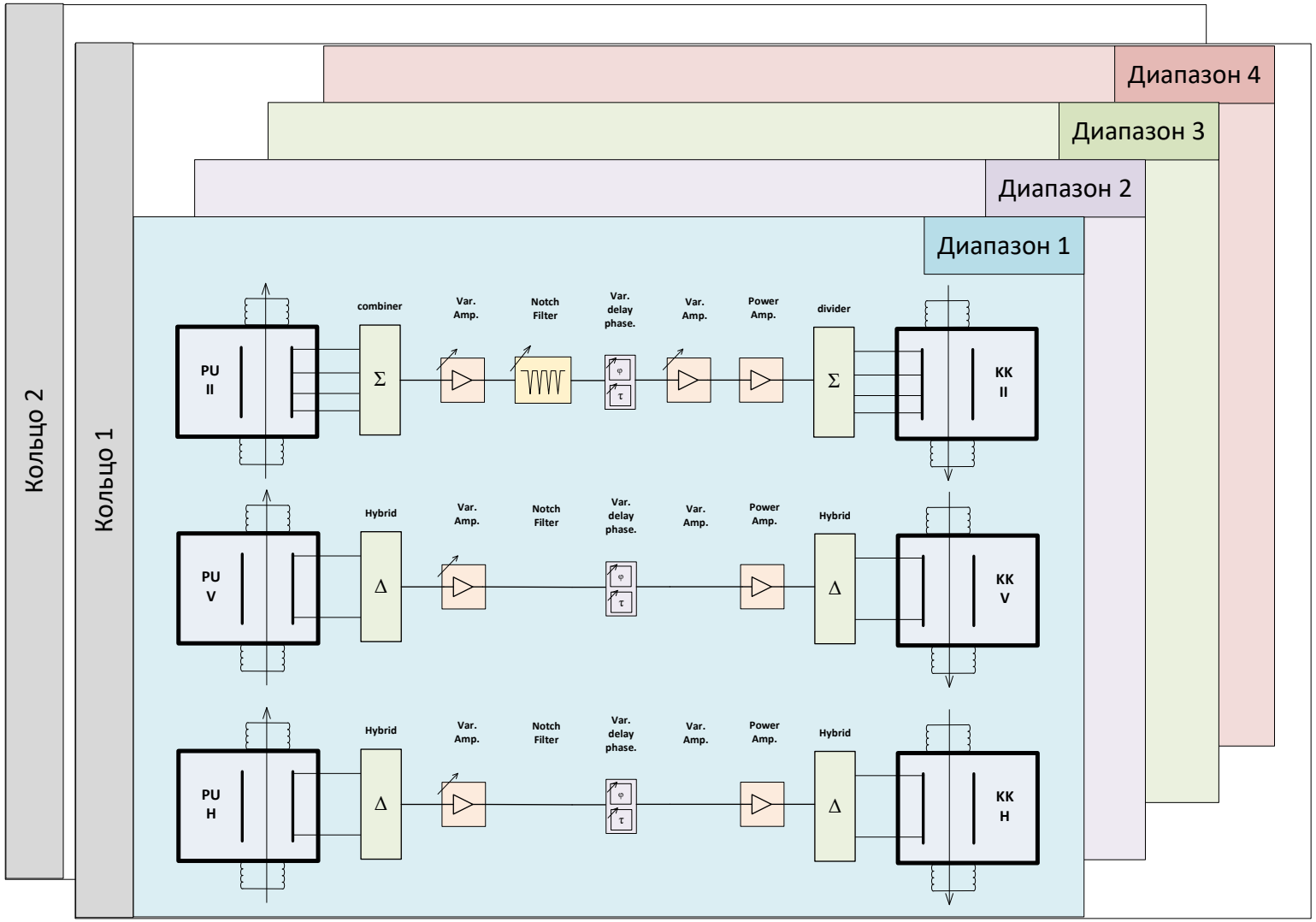
+

2 вертикальных

17

15. ССО. Концепция. Электроника

Принципиальная схема – приближение 3



24 подсистемы =

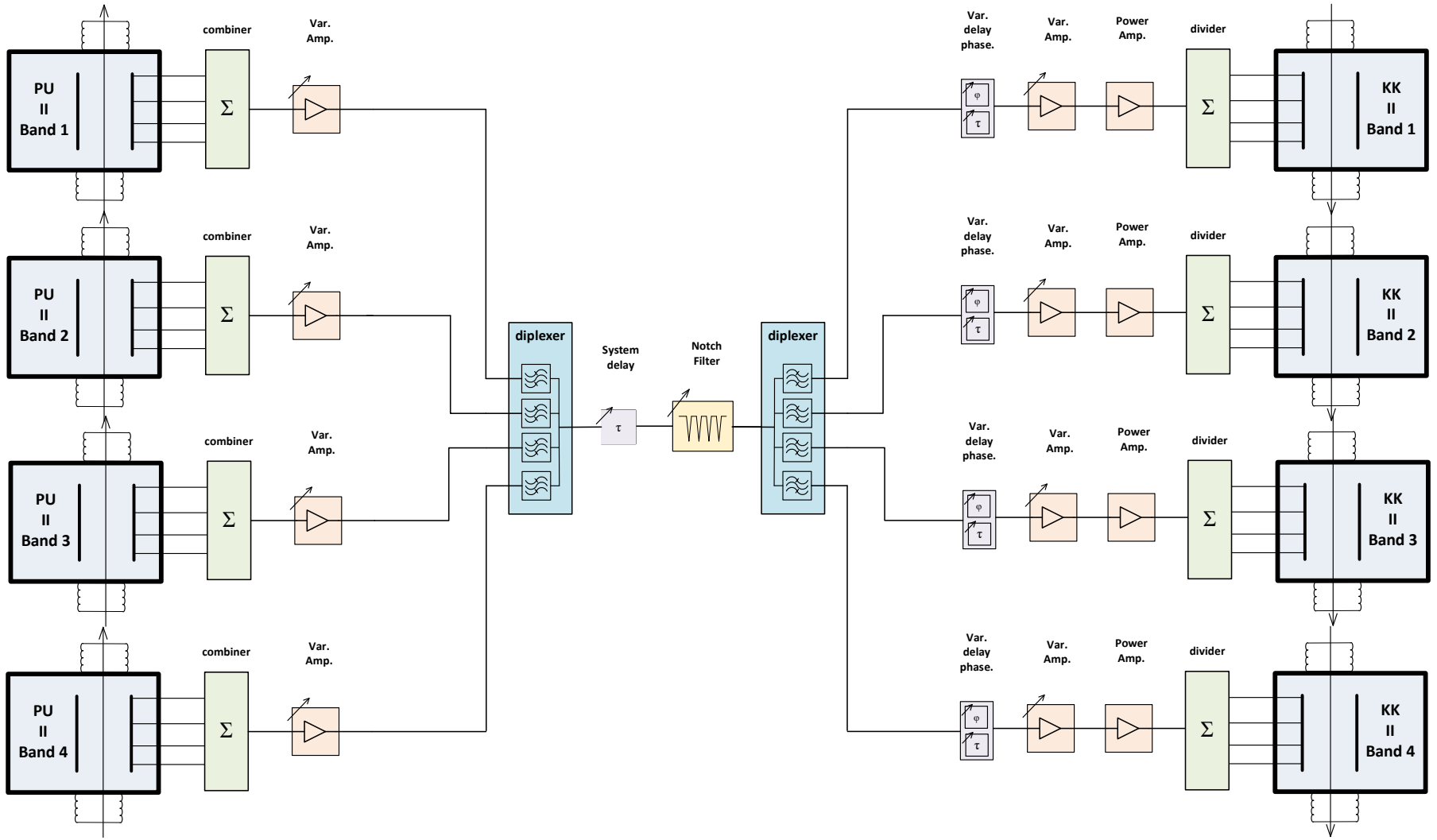
2 кольца х 4 диапазона

х 3 подсистемы/диапазон

18

16. ССО. Концепция. Электроника.

Принципиальная схема – приближение 4 (модификация продольной системы)



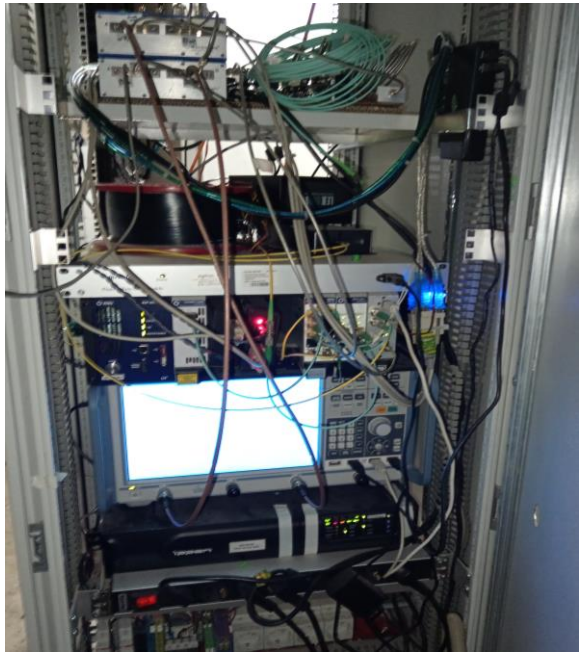
фильтр гармоник

1 на 4 диапазона

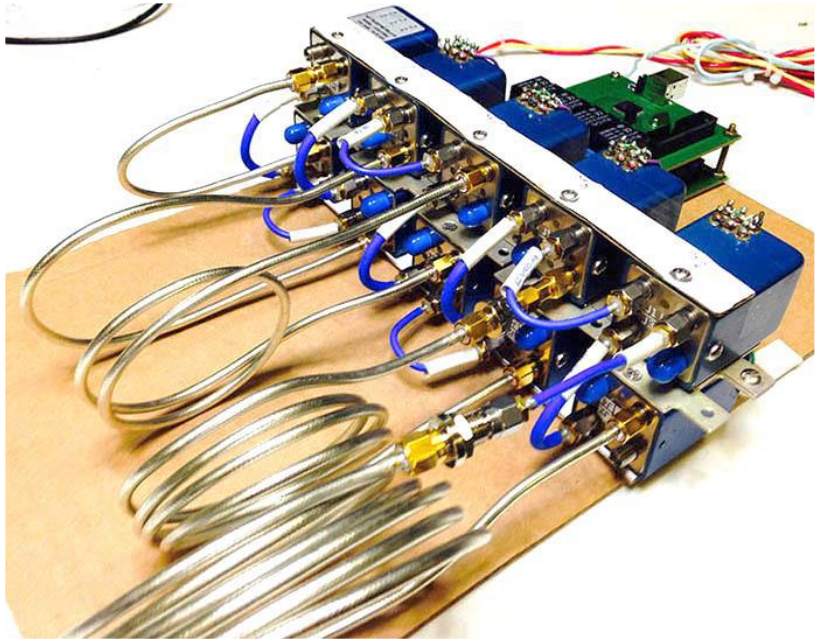
19

17. ССО. Концепция. Электроника.

Отличие экспериментальной и “промышленной” установки.







ССО Нуклотрона – экспериментальная установка.

18. ССО. Концепция. Электроника

Требования к системе ССО.

Особенности системы:

- Реальная ССО – **сложная система** с **большим** количеством о**днотипных** элементов/подсистем.
- **Недопустима остановка** системы, минимизация времени простоя.
- **Чувствительность к помехам**.
- Сжатые **сроки** разработки, **ограниченный бюджет**.
- **Ограничение** использования **иностранных** комплектующих/разработок.
- Минимум человеческого участия в управлении системой.

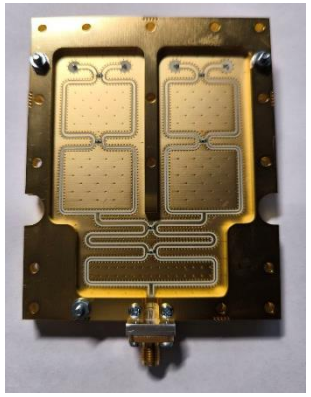
Поэтому:

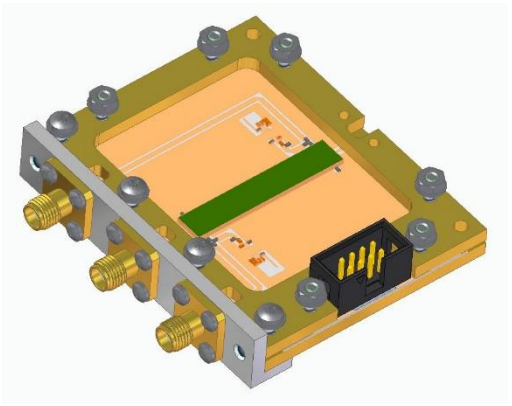
- Конструкция в виде **типовых модулей** с возможностью их быстрой замены.
- Наличие **системы непрерывной диагностики** (самодиагностики) **с точностью до модуля**.
- Налаженная **система сервиса** – ремонта/изготовления модулей.
- Наличие **системы экранировки** как по СВЧ так и по НЧ (питанию).
- **Автоматическая** (максимально) система управления.

19. ССО. Концепция. Элементы собственной разработки.

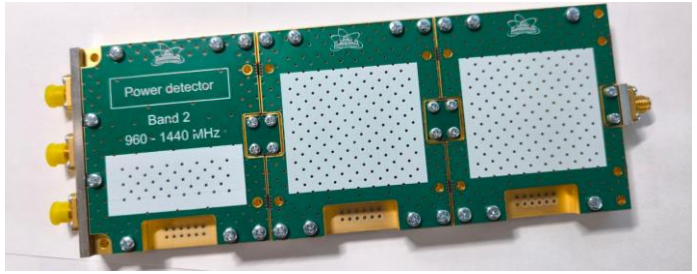
- Собственная разработка СВЧ-устройст системы ССО – неизбежная необходимость.
- Альтернатива – использование коммерческих компонентов. Не оптимальных для наших нестандартных частот и требований.
- Накопление компетенций в процессе разработки позволит гибко подстраиваться под меняющиеся требования системы.

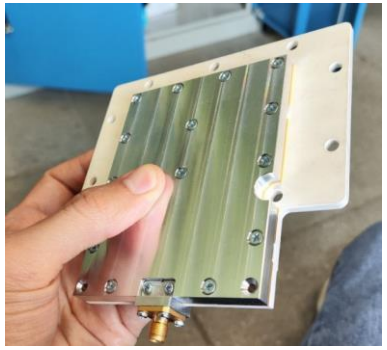








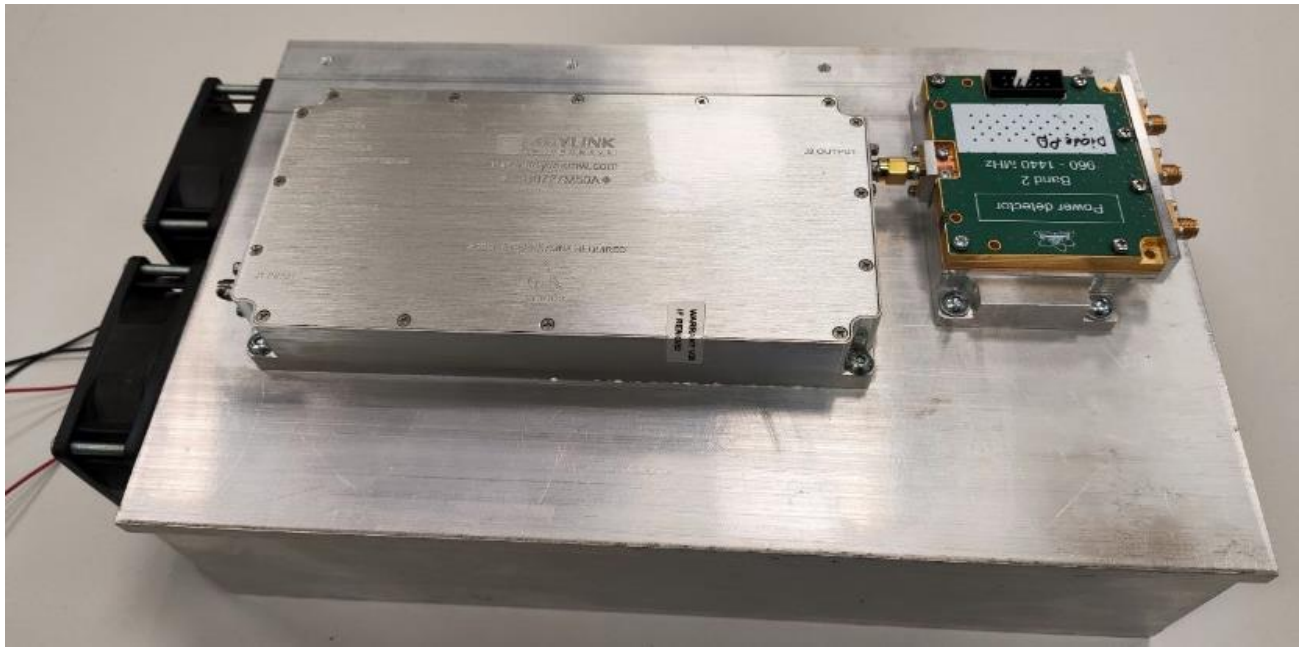






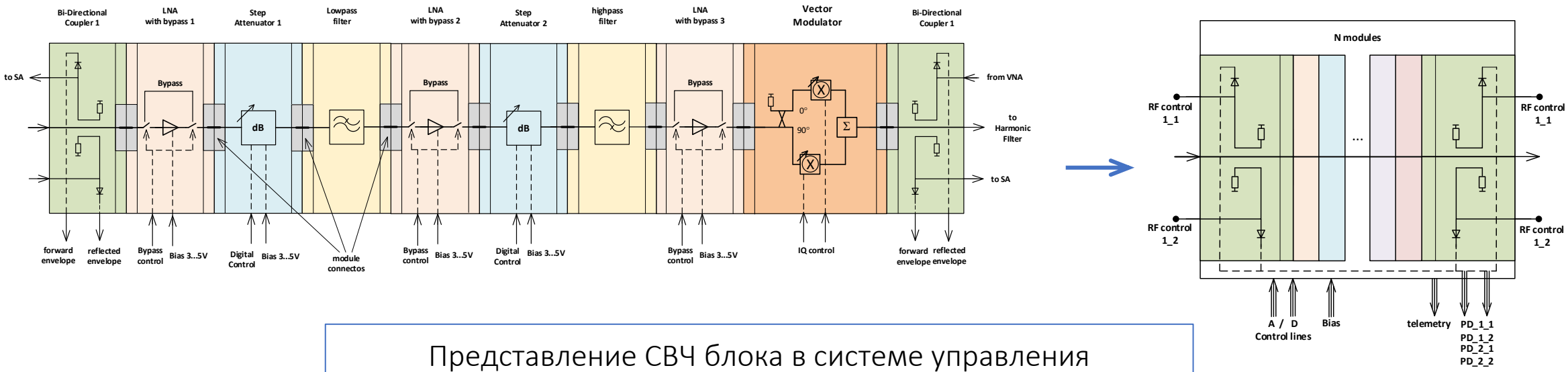
20. ССО. Усилитель мощности.

- Усилитель мощности – критический элемент системы.
- На этапе пуско-наладки не требуется максимальная мощность -> требуется P=10Вт.
- Выбранный коммерческий усилитель P1dB=100Вт обеспечит линейный режим для P=10Вт.
- Сейчас – отработка управления и контроля мощности.
- Это на данный момент единственный коммерческий элемент системы
- Далее – разработка собственного УМ оптимизированного под наши параметры



21. СВЧ тракт. Конфигурация блока. Контроль параметров.

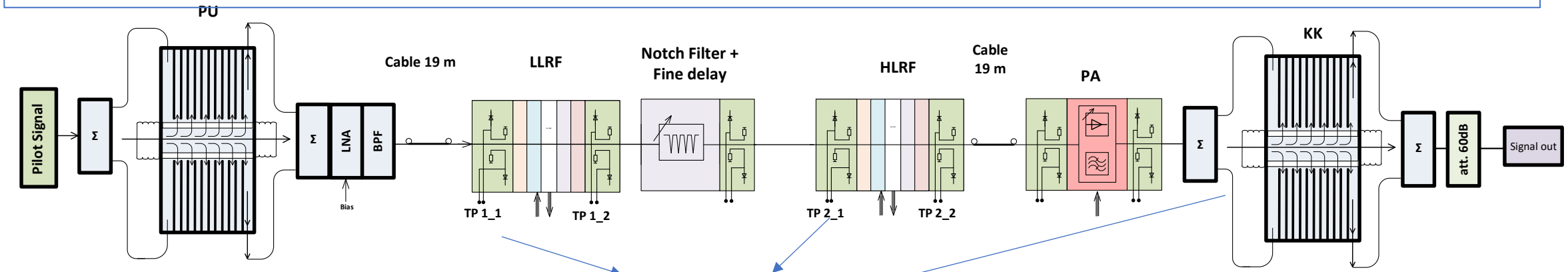
- Блок СВЧ собирается из стандартизированных модулей.
- Блок описывается параметрами – количество и состав модулей, конфигурация линии управления.
- В состав блоков входят разъёмы для подключения внешних измерительных приборов.
- Кроме того, в составе блока включены датчики мощности для предварительного контроля состояния блока

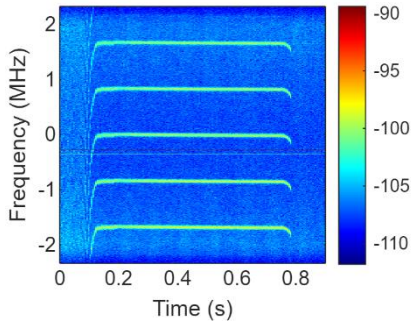


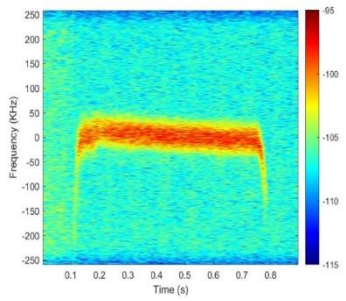
Представление СВЧ блока в системе управления

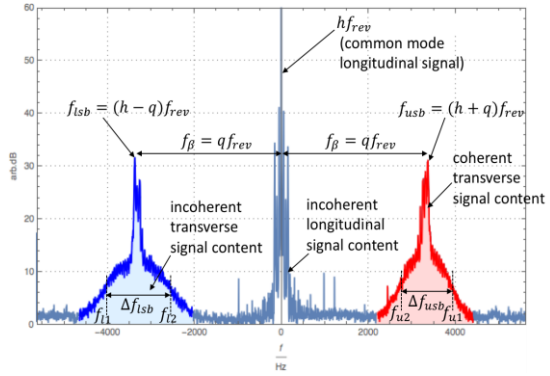
22. СВЧ тракт. Управление. Контроль параметров внешними приборами.

- Наличие смежных портов в пикапе и кикере позволяет инжектировать тестовый сигнал в канал ССО.
- Сигнал с контрольных точек позволяет контролировать состояние СВЧ тракта.
- Можно контролировать как линейные характерстики – коэффициент передачи, так и нелинейные, используя сложный многотоновый тестовый сигнал.
- Можно проводить комплексное тестирование, на записанный/синтезированном Шоттки-сигнале пучка.
- Это можно проводить как на установленной штатно системе так и при отработке “на столе”.









Сигналы шоттки

23. ССО. Аппаратная реализация. Конфигурация крейта

Унифицированный блоки ССО **сгруппированы в крейты** СУ.

Комплектация крейта:

Система **управления размещена в стандартном блоке**

Блоки комплектуются в крейт по 6 блоков – на 1 диапазон

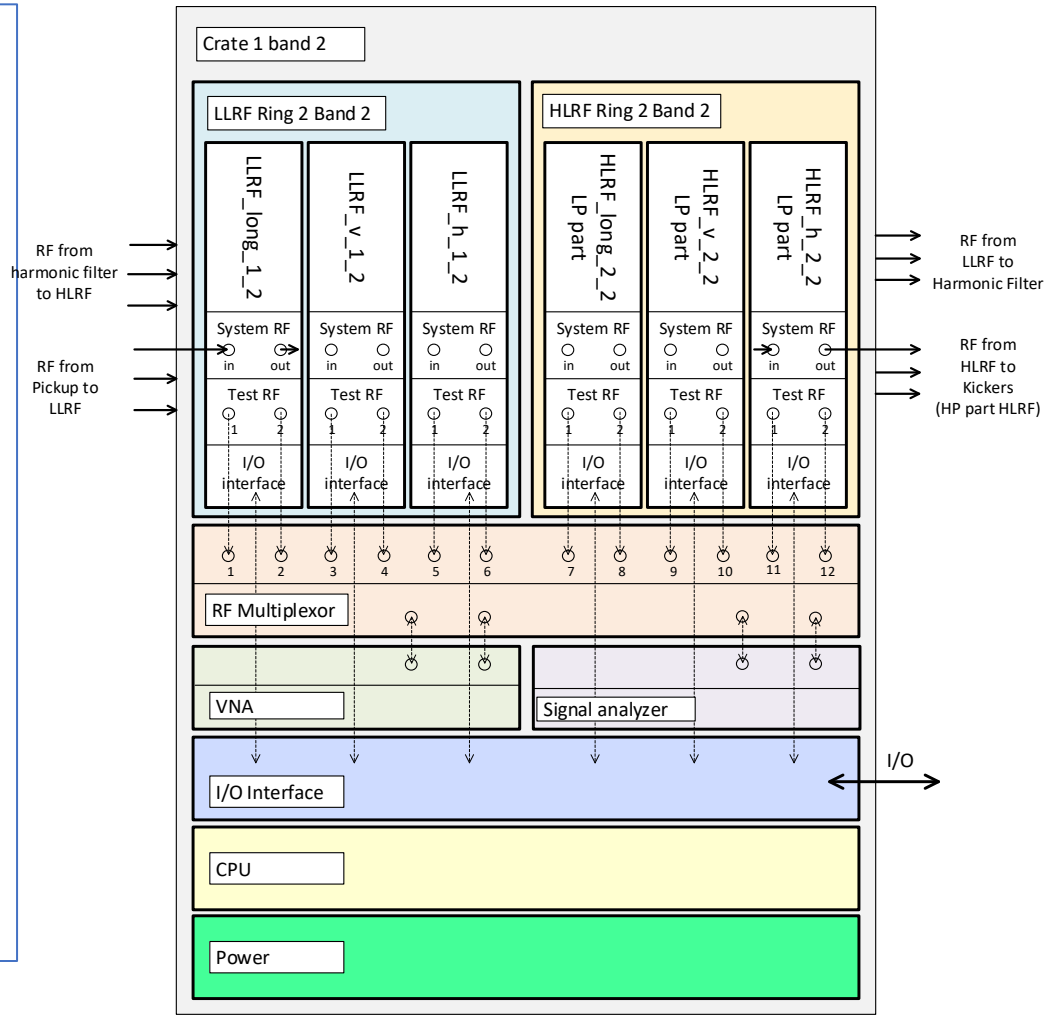
Модуль **интерфейса** ввода/вывода.

Модуль управляющего **процессора**.

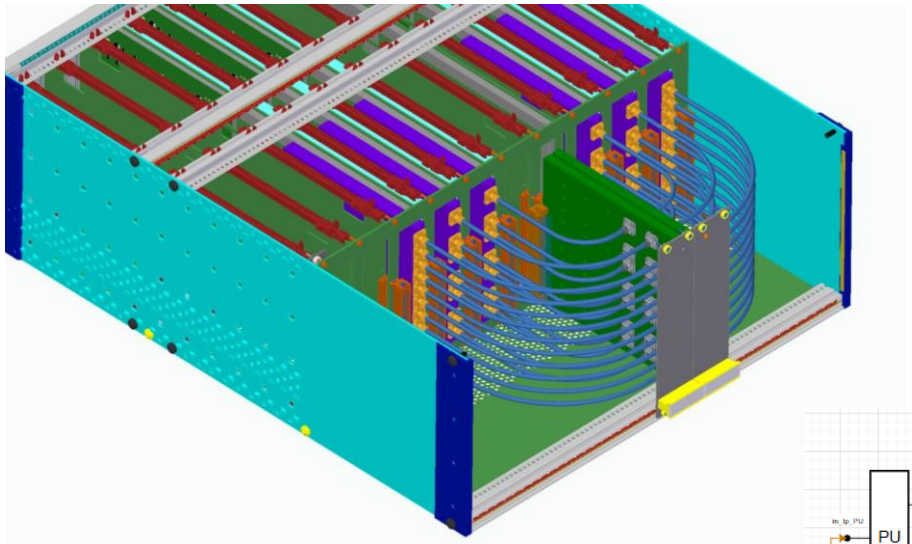
Модуль **питания.**

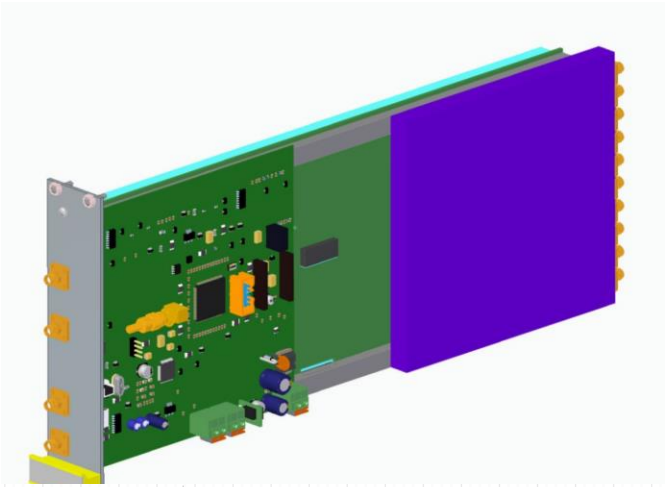
Фильтры гармоник расположены в **отдельной стойке.**

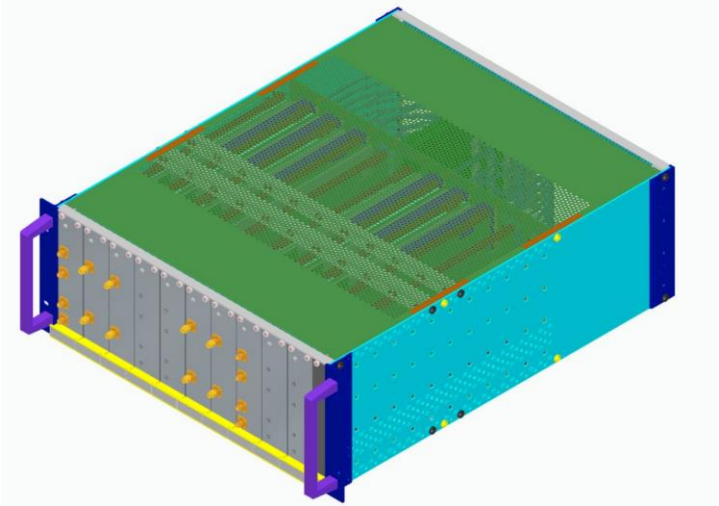
Усилители мощности расположены как можно **ближе к кикерам**.

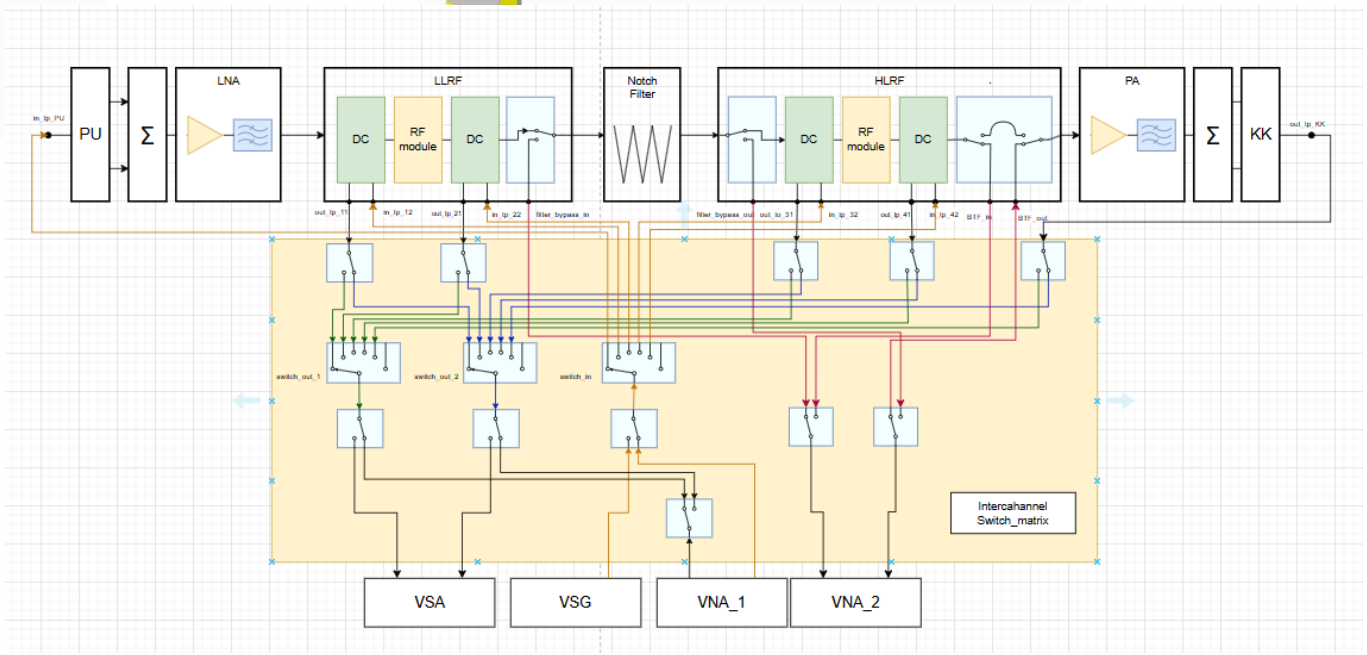


24. ССО. Концепция. Система управления. Конструкция крейта









25 Развёртывание системы

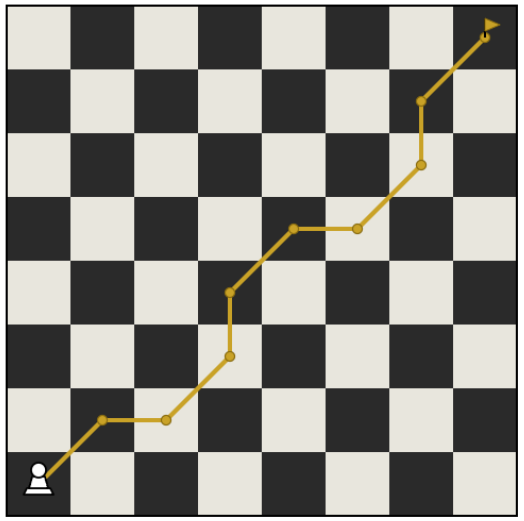
- Особенности разрабатываемой системы:
  - Модульность – все элементы системы унифицированы.
  - Единая технология - возможность быстрой оптимизации под конкретные требования.
  - Разработка кастомного “железа” – максимум коэффициента качества
- Поэтапный ввод в эксплуатацию:
  - Отработка элементов системы, накопление компетенций.
  - Возможность уточнить требования – оптимизация параметров под реальные характеристики.
  - Накопление компетенций – непрерывное улучшение системы

28

26 Заключение

- Показана логика построения системы ССО без технических подробностей.
- Качественно объяснены принятые инженерные решения.
- Коэффициент качества элементов системы и системы в целом.
- Не освещены вопросы:
  - Шоттки-мониторинг.
  - Управление системой.
  - Интерфейс пользователя
  - Метрология.
  - Взаимодействие с подсистемами Коллайдера.
  - И т.д.





ЛУЧШЕ ПЛАН ПЛОХОЙ, ЧЕМ НИКАКОГО

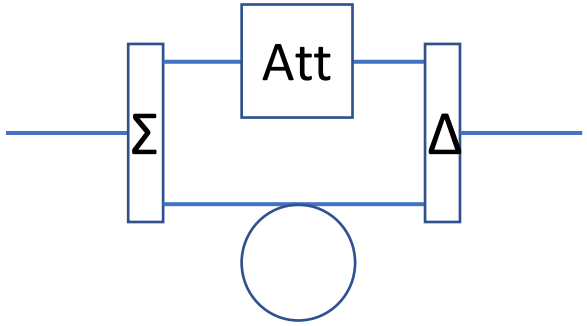
— гроссмейстер

Савелий Тартаковер

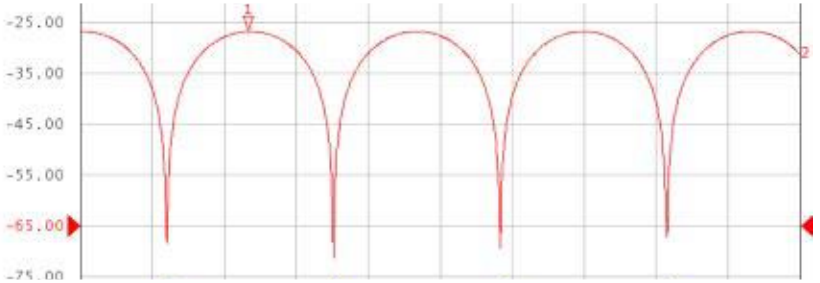
Спасибо за внимание!

-. доп. материалы

Компоненты. Фильтр гармоник. Принципиальная схема

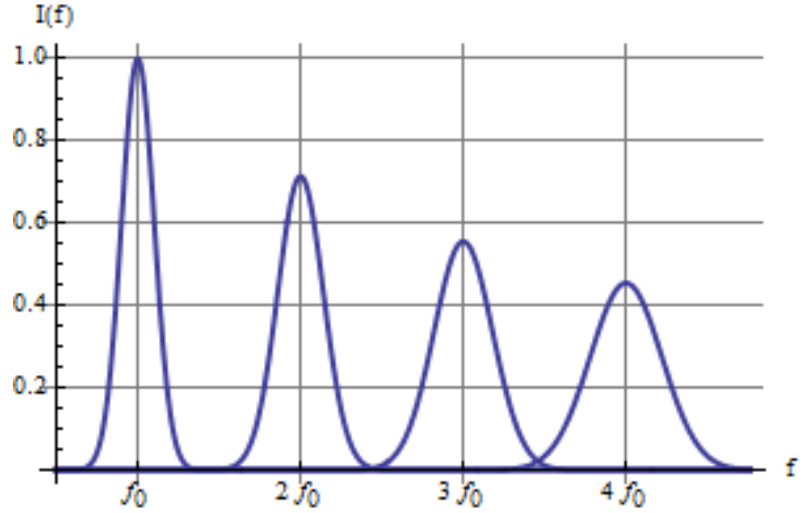


$$f_{notch} = \frac{1}{T_{LongLeg} - T_{ShortLeg}}$$



$$f_{notch} = f_{rev}$$

Энергия, ГэВ/н	2,5	4,5
Частота, Гц	573 584	587 132
Период обращения, пс	1 743 424	1 703 195
Точность задержки	1 пс	
Точность аттенюатора	0,01 дБ	



-. доп. материалы

Компоненты. Фильтр гармоник. Реализация

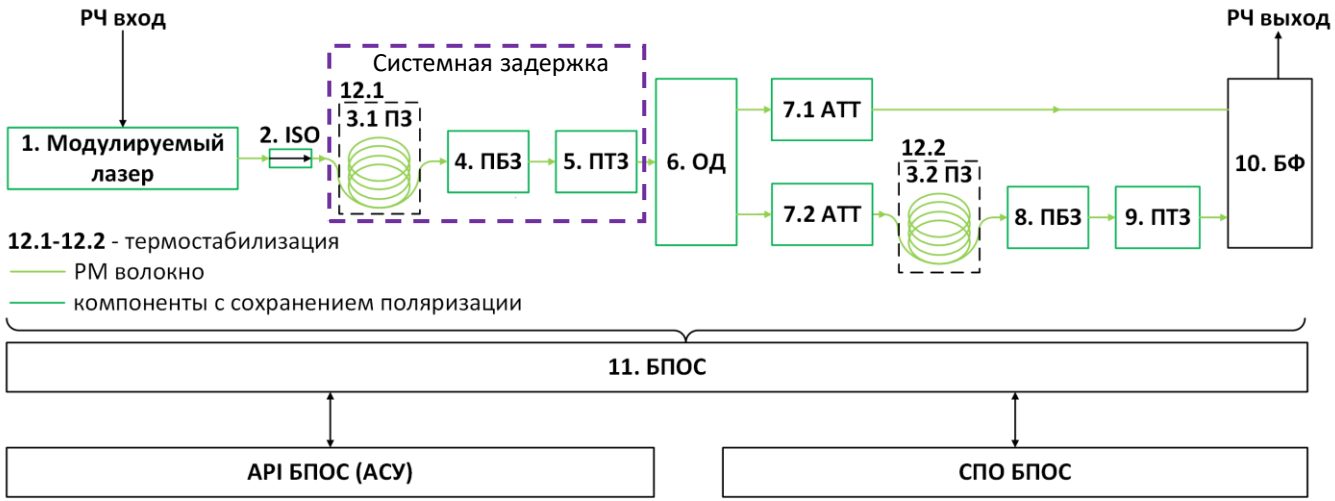


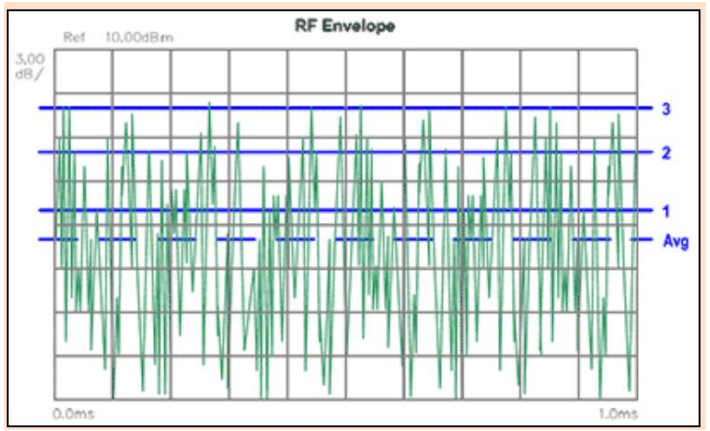
Рис.7 Блок-сема оптической реализации фильтра

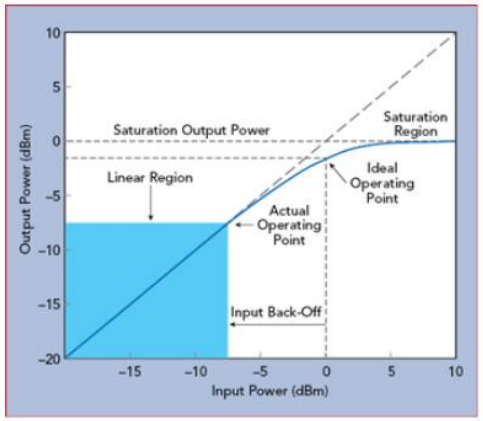
1.1 лазер с прямой модуляцией 1550 нм
1.2 Драйвер лазера
1.3 Модулятор
2. ISO – оптический изолятор
3.1-3.2 ПЗ – постоянная задержка
4./8. ПБЗ – перестраиваемая большая задержка
5./9. ПТЗ – перестраиваемая точная задержка
6. ОД – оптический делитель 50/50
7.1/7.2 АТТ – аттенюаторы
10. БФ – балансный фотоприемник
11. БПОС – блок приема и обработки сигналов
12.1-12.2 ТС – термостабилизация в виде бокса для волокна

-. доп. материалы

Компоненты. Усилитель мощности. Требования.Реализация.

- **Усиление** сигнала до требуемой мощности.
- Требуемый уровень **нелинейных искажений**.
- Требуемое **КПД**. Обеспечение **теплового** режима.
- **Фильтрация** гармоник выходного сигнала.
- **Защита** УМ от **переотражений**.
- **Компактность, низкая стоимость**



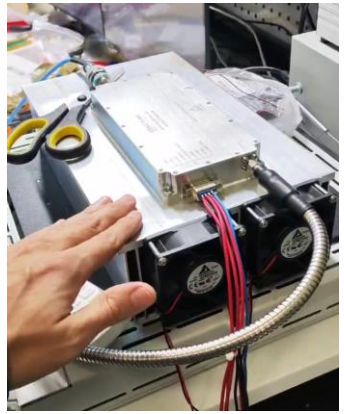


Амплитуда широкополосного сигнала. Линейная область работы УМ



=>





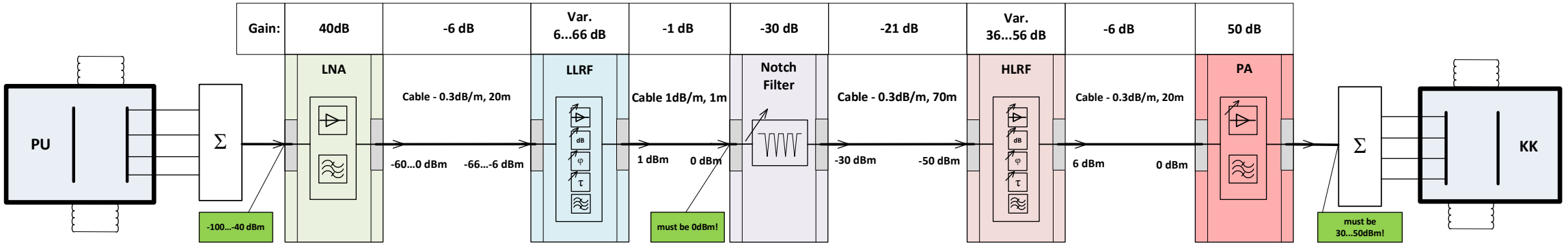
Первоначальный вариант УМ R&S

Вариант “на сейчас”

-. доп. материалы

Компоненты. СВЧ тракт. Системы LLRF и HLRF. Состав блоков LLRF и HLRF.

- Диапазон изменения входной мощности -100…-40dBm (регулировка порядка 60дБ)
- Опт. $P_{\text{ВХ}}$ для фильтра гармоник ~0дБм – требуется регулировка мощности
- Опт. $P_{\text{ВХ}}$ на кикере зависит от режима работы – требуется регулировка мощности.
- Кроме того, требуется регулировка задержки и фазы
- => можно выделить функциональные блоки:
    1. Блок LNA – предварительное усиление и фильтрация.
    2. Блок LLRF – усиление и регулировка $P_{\text{ВХ}}$ в опт. фильтре. + регулировка системной задержки.
    3. Блок HLRF – усиление и регулировка $P_{\text{ВХ}}$ в УМ + регулировка фазы и задержки (в случае нескольких каналов)
    4. Фильтр гармоник
    5. Кабели, соединяющие блоки.



-. доп. материалы

Компоненты. СВЧ тракт. перечень СВЧ модулей

	Блок	Модуль	Диап.1	Диап.2	Диап.3	Диап.4
1	Пикап (продольный)	Сумматор	++	++++	++	++
2		МШУ	++	+++	-	-
3		ФНЧ		+	-	-
4	Кикер (продольный)	ДМ для УМ	++	++++	++	++
5		Делитель высокой мощности	++	+++	-	-
6	Пикап (поперечный)	180 град. Гибрид	++	++	++	++
7		фазовращатель	+	+	-	-
8		рег. Задержка	+	+	-	-
9	Кикер (поперечный)	180 град. гибрид выс. мощ.	+	+	-	-
10	LLRF	усил-ль фикс.	+	+++	-	-
11		ус-ль с байпасом	+	+++	-	-
12		НО с ДМ	+	+++	-	-
13		атт. Дискрет.	+	+++	-	-
14		атт. Аналог.	+	+++	-	-
15		фильтры	+	+	-	-
16		эквалайзер	+	+	-	-
17	HLRF	усил-ль средней мощ-ти	+	+++	-	-
18		векторный модулятор	-	+	-	-
19		дискретная задержка	-	++	-	-

- Запущен “конвейер разработки модулей СВЧ”.
- Разработка подразумевает выпуск полного КД с возможностью контрактного изготовления
- Модули для первой очереди (продольная система диап. 2) находятся в высокой степени готовности
- Остальные диапазоны разрабатываются в порядке очереди (приоритета)

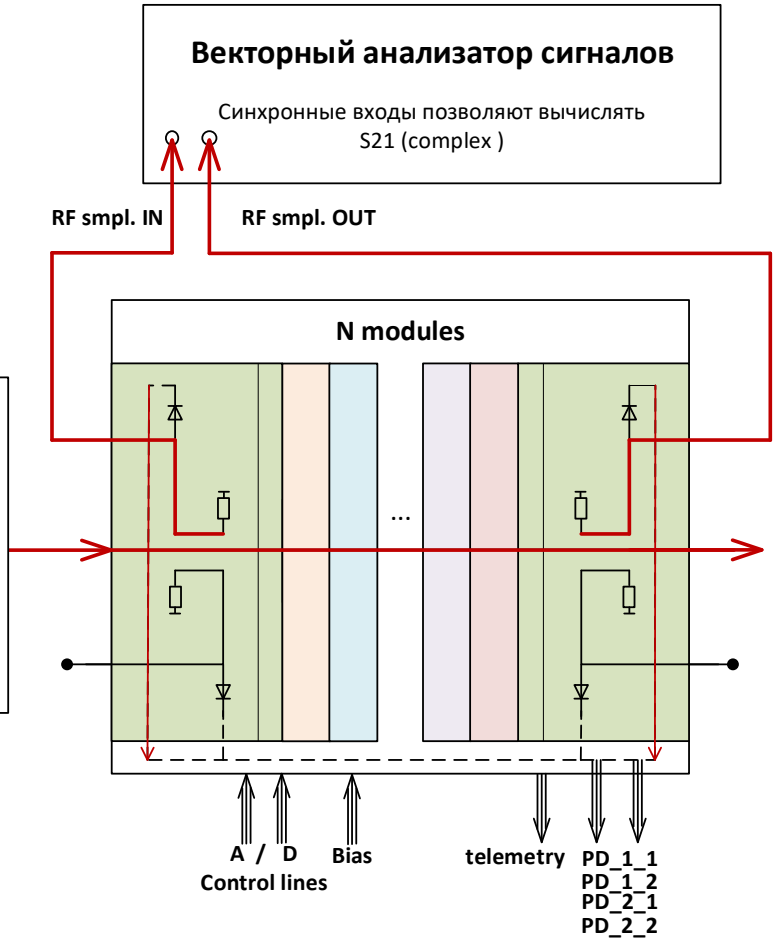
++++	Расчёт + трассировка +изготовление +измерение
+++	Расчёт + трассировка +изготовление
++	Расчёт + трассировка
+	Расчёт
-	проектирование не начато

-. доп. материалы

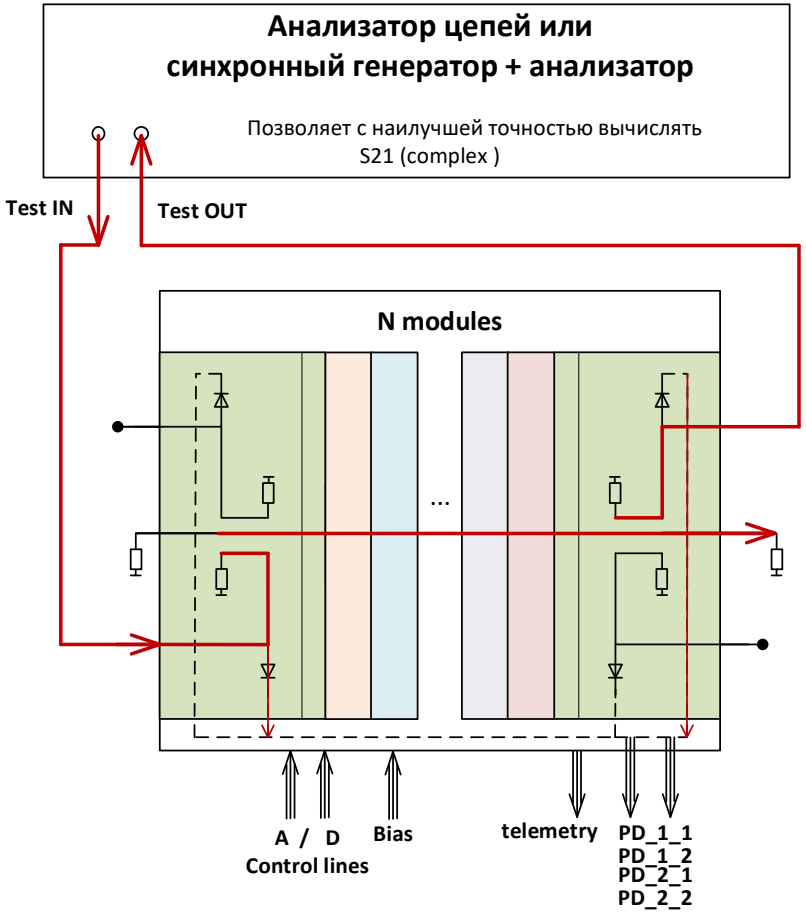
СВЧ тракт. Управление. Контроль параметров блоков внешними приборами.

Входной сигнал (Варианты):

1. Пучок.
2. Однотоновый пилот-сигнал.
3. Многотоновый пилот сигнал.
4. Синтезированный Шоттки.
5. Записанный Шоттки



Измерение анализатором сигналов с помощью тестого сигнала

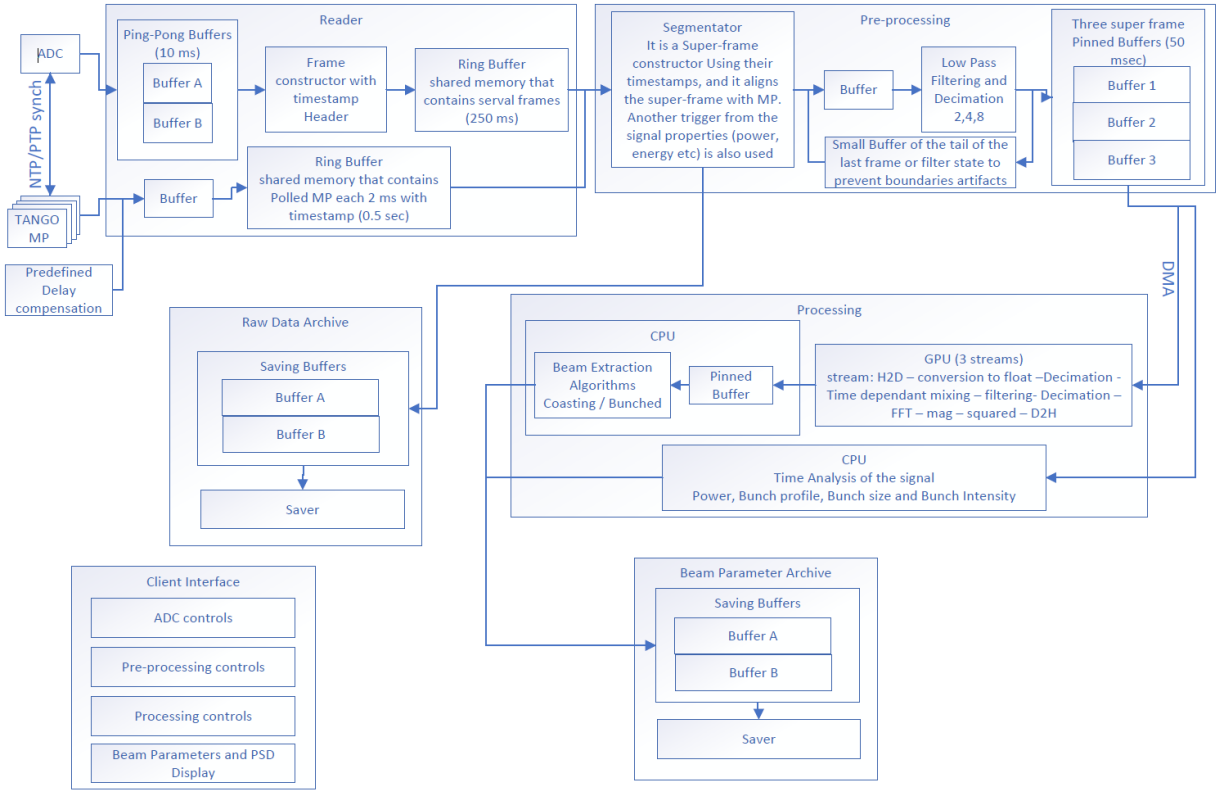


Измерение анализатором цепей

-. доп. материалы

СВЧ тракт. Управление. Шоттки-анализ

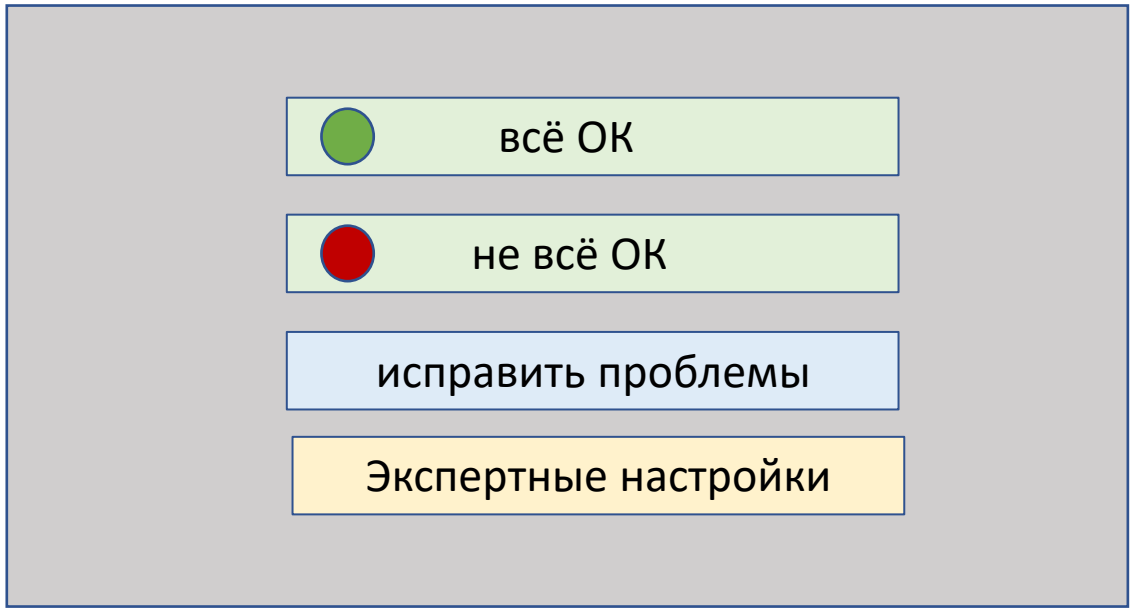
- Для работы с сигналами Шоттки разработана программа.
- Использование Шоттки-сигналов для управление ССО.
- Дигитайзеры. Требование к универсальности. Многоканальный дигитайзер.
- Богатство Шоттки-сигнала.
- Структура программы Шоттки-анализа.
- Проблема большого потока данных.
- Синхронизация.
- Таймстемп.
- Сегментация.
- Система триггеров.
- Использование GPU.



-. доп. материалы

СВЧ тракт. Управление. Интерфейс пользователя. Автоматизация управления.

- Интерфейс максимально простой. Сложность скрыта для разгрузки оператора
- Максимальный уровень автоматизации.
- Максимальная интеграция с другими системами (например объединение с электронным охлаждением)
- **Проблема! Разрабатывается в последнюю очередь.**



Идеальный интерфейс пользователя

-. доп. материалы

1. КОМАНДА!
2. Кабели.
3. Трубы.
4. Пикапы/скворечники.
5. Компоненты/модули.
6. Коммутатор. Первый вариант.
7. Система управления.
8. Шоттки-мониторинг.
9. Танго-устройства.













