

Многосекционные линейные ускорители электронов НИИЯФ МГУ

- Ермаков Андрей Николаевич,
- Ведущий научный сотрудник ОЭТВАЯ НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, к.ф.-м.н.,
- E-mail: a_ermak1978@mail.ru
- +7(495)939-24-51

- 6 апреля 2023 г.

В НИИЯФ МГУ приступают к реализации двух проектов:

- Линейный ускоритель электронов на энергию пучка, регулируемую в диапазоне 10 - 35 МэВ со средним током пучка 100 мкА для исследования фотоядерных реакций и наработки медицинских изотопов

- Линейный ускоритель электронов для комptonовского источника интенсивного монохроматического рентгеновского излучения с регулируемой энергией

Цели проектов

- В НИИЯФ МГУ ведутся исследования возможности получения медицинских радиоизотопов необходимых для позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) и радиотерапии в результате фотоядерных реакций (γ, n) , (γ, p) и (γ, pn) . Достоинствами фотоядерных методов являются возможность использования компактных ускорителей электронов в непосредственной близости от медицинского центра и, в ряде случаев, простая химия разделения макроколичеств мишени и микроколичеств целевого нуклида, в ряде случаев - невозможность наработки изотопов традиционными циклотронными или реакторными методами

Цели проектов

- К настоящему времени в НИИЯФ МГУ совместно с Химическим факультетом МГУ и ГЕОХИ РАН уже выполнены исследования возможности наработки на электронных ускорителях при энергии 55 МэВ изотопов ^{18}F , ^{47}Sc , ^{67}Cu , $^{69\text{m}}\text{Zn}$, ^{166}Ho , ^{177}Lu , ^{167}Tm , разработана химия их выделения, разрабатываются носители. В перспективе исследования на других энергиях ускорителя и обогащенных мишенях (чтобы минимизировать образование побочных нуклидов). Список медицинских изотопов, для которых проводятся и планируются исследования: ^{72}As , ^{111}In , $^{117\text{m}}\text{Sn}$, ^{119}Sb , ^{161}Ho , ^{161}Tb , ^{175}Yb , ^{143}Pr , $^{198,199}\text{Au}$, ^{186}Re , $^{195\text{m}}\text{Pt}$, ^{225}Ac и др.

Цели проектов

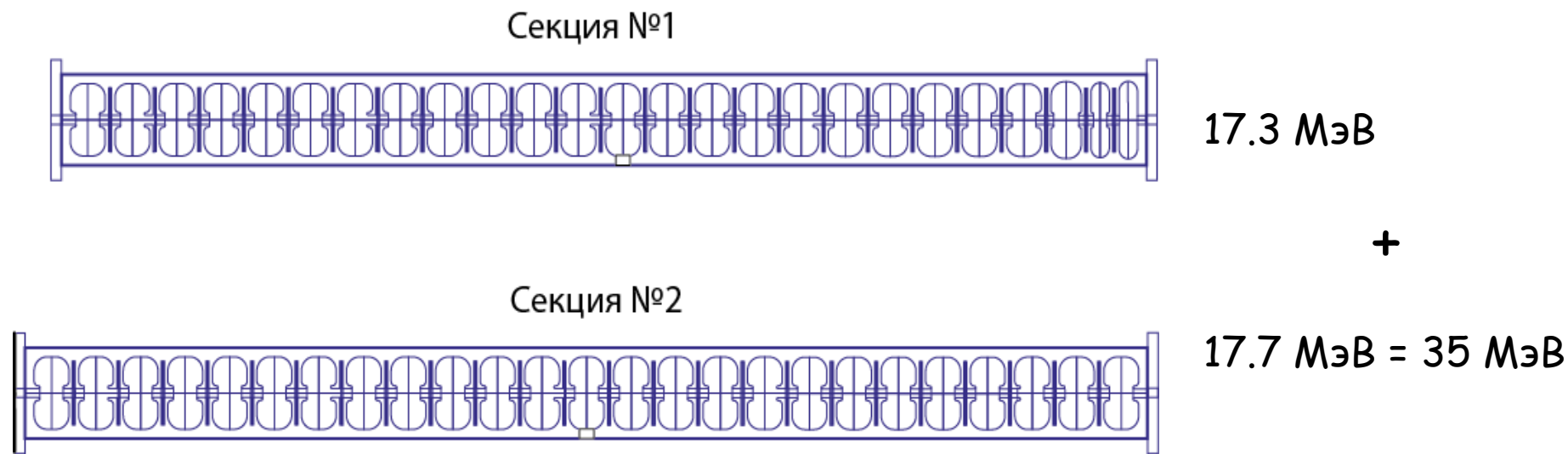
Комптоновский источник интенсивного монохроматического рентгеновского излучения с регулируемой энергией как центр коллективного пользования:

- Рентгенография и компьютерная томография с использованием метода фазового контраста
- Дифференциальный контраст и разностная ангиография
- Микрочучковая радиотерапия
- Рентгеновский структурный дифракционный анализ
- Рентгеновский флуоресцентный анализ
- Рентгеновская абсорбционная спектроскопия

Основные параметры ускоренного пучка

Номинальная энергия электронов в пучке	35 МэВ
Диапазон регулировки энергии электронов в пучке	10-35 МэВ
Энергетический разброс электронов на выходе из ускорителя	не более 10%
Номинальный импульсный ток ускоренного пучка электронов	100 мА
Номинальный средний ток пучка электронов на мишенном устройстве	100 мкА
Диапазон регулировки среднего тока электронов	30-100 мкА
Диаметр выходного пучка (доверительная вероятность для электронов оказаться в заданном диаметре 95,4%)мм	3-10 мм
Пространственная стабильность пучка на выходе из электронопровода (среднеквадратичное изменение положения пучка (2*сигма))	1 мм

Принцип построения линейного ускорителя

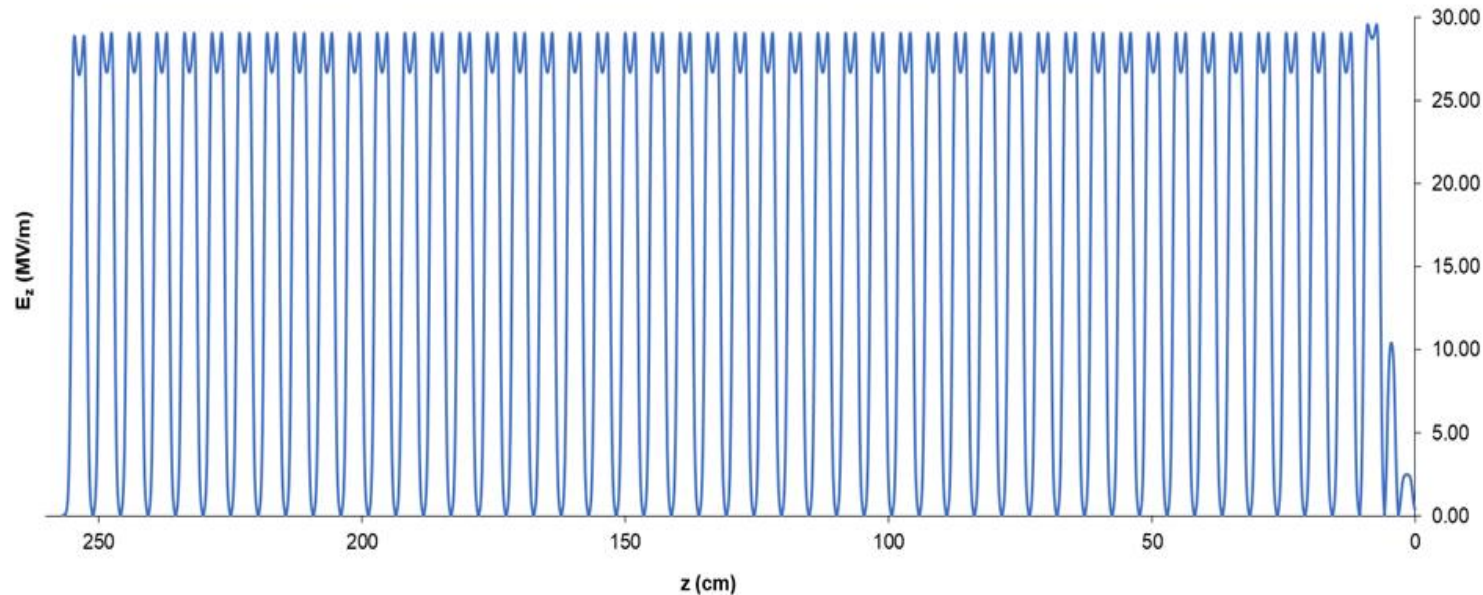


Двухсекционный линейный ускоритель на стоячей волне с бипериодической ускоряющей структурой с внутренними ячейками связи. Рабочая частота 2856 МГц.

Первая секция включает в себя три группирующе-фокусирующих ускоряющих ячейки, различающихся длиной и уровнем поля, и двадцать две регулярные ускоряющие ячейки. Варианты данной структуры с меньшим числом ускоряющих ячеек успешно эксплуатируются на 20 ускорителях производства ЛЭУ МГУ для радиографии и ИДК.

Вторая секция состоит из двадцати пяти регулярных ячеек. Суммарная длина двух ускоряющих структур около 2600 мм.

Распределение ускоряющего поля двух секций



Суммарные затраты СВЧ мощности на ускорение пучка с импульсным током 100 мА до энергии 35 МэВ составляют около **5.2 МВт** (1-я секция) и **5.4 МВт** (2-я секция).

Оценки затрат СВЧ мощности на создание ускоряющего поля первой секции

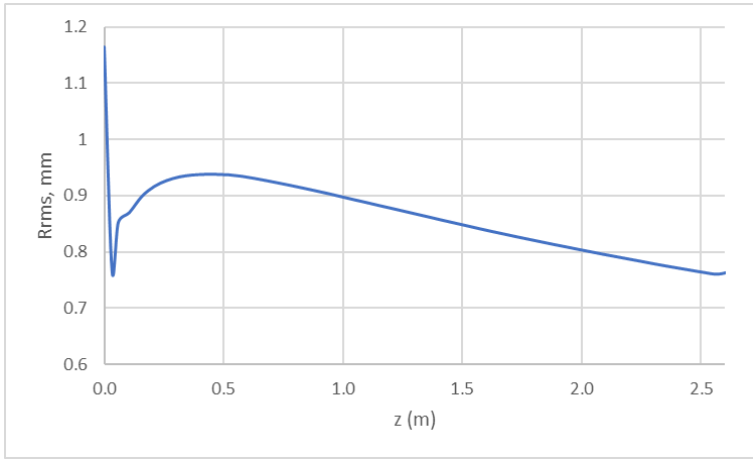
#	L , см	Q	P (1 МВ/м), кВт	E (17.3 МэВ), МВ/м	P (17.3 МэВ), кВт
1	3.8	10430	0.724	1.74	2.19
2	2.6	7760	0.354	5.25	9.76
3	4.68	14230	0.474	20.5	199.2
4-25	5.23	14430	0.485	17.2	143.5
	126.1				3400

Оценки затрат СВЧ мощности на создание ускоряющего поля второй секции

#	L , см	Q	P (1 МВ/м), кВт	E (17.7 МэВ), МВ/м	P (17.7 МэВ), кВт
1-25	5.23	14430	0.485	17.2	143.5
	130.75				3600

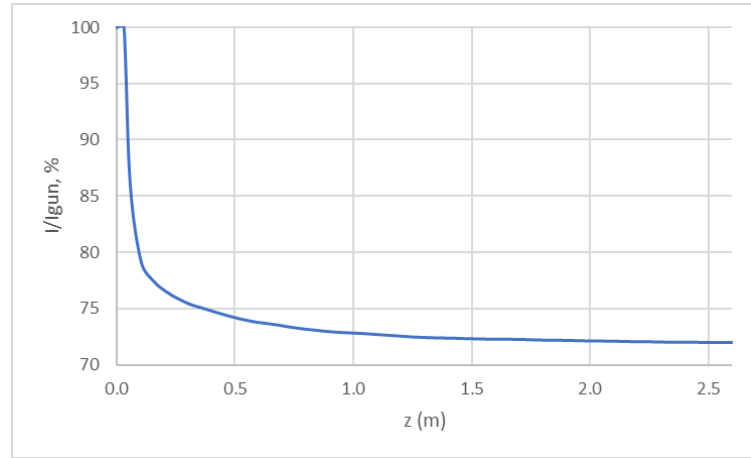
Расчет динамики пучка в линейном ускорителе

Изменение среднеквадратичного размера пучка в процессе ускорения.

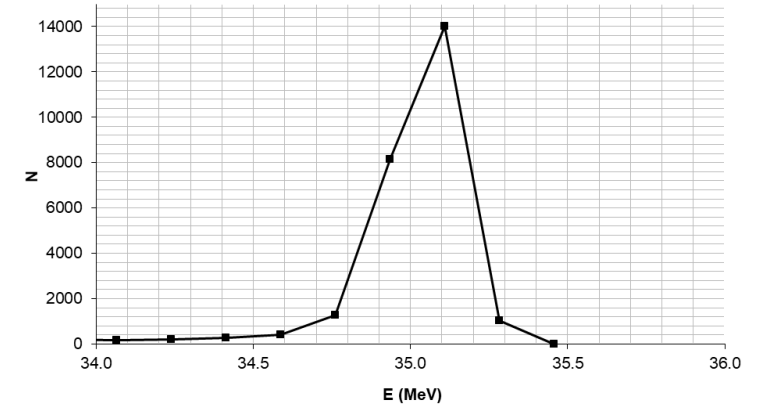


PARMELA Code [L.M. Young, "PARMELA", Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1835 (preprint), Los Alamos, 1996, 93 p.]

Изменение тока пучка в процессе ускорения



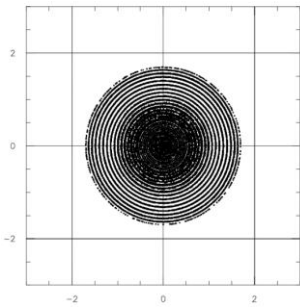
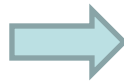
Спектр ускоренного пучка на выходе второй секции



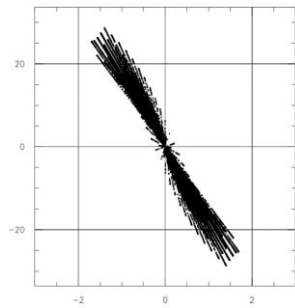
EGUN Code

[W. B. Herrmannsfeldt, "EGUN-an electron optics and gun design program", updated version of SLAC-226, Stanford]

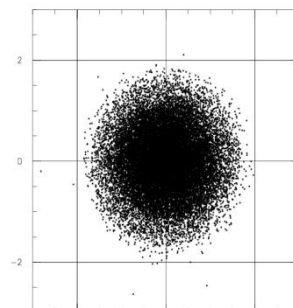
$U_c = 40 \text{ кВ}$, $U_e = 2 \text{ кВ}$,
 $I_c = 320 \text{ мА}$



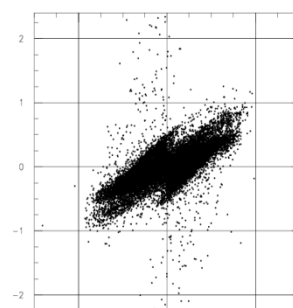
(xy)



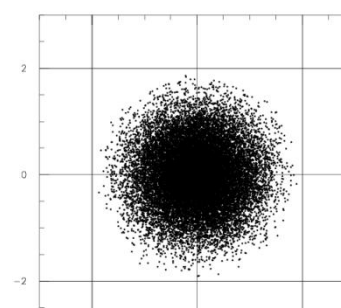
(xx')



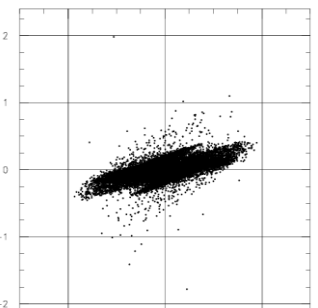
(xy)



(xx')



(xy)



(xx')

Проект линейного ускорителя электронов для исследования фотоядерных реакций и наработки медицинских изотопов

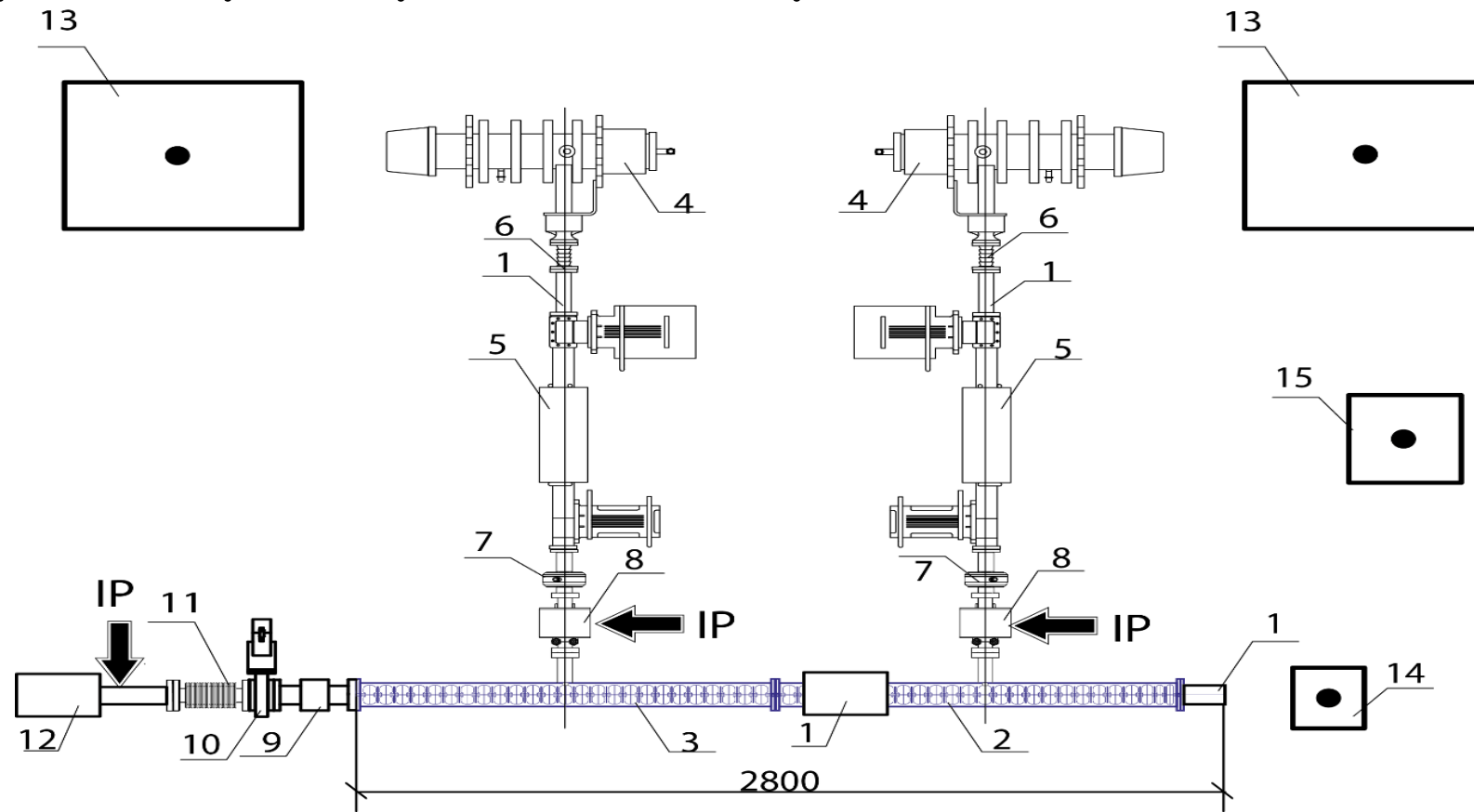
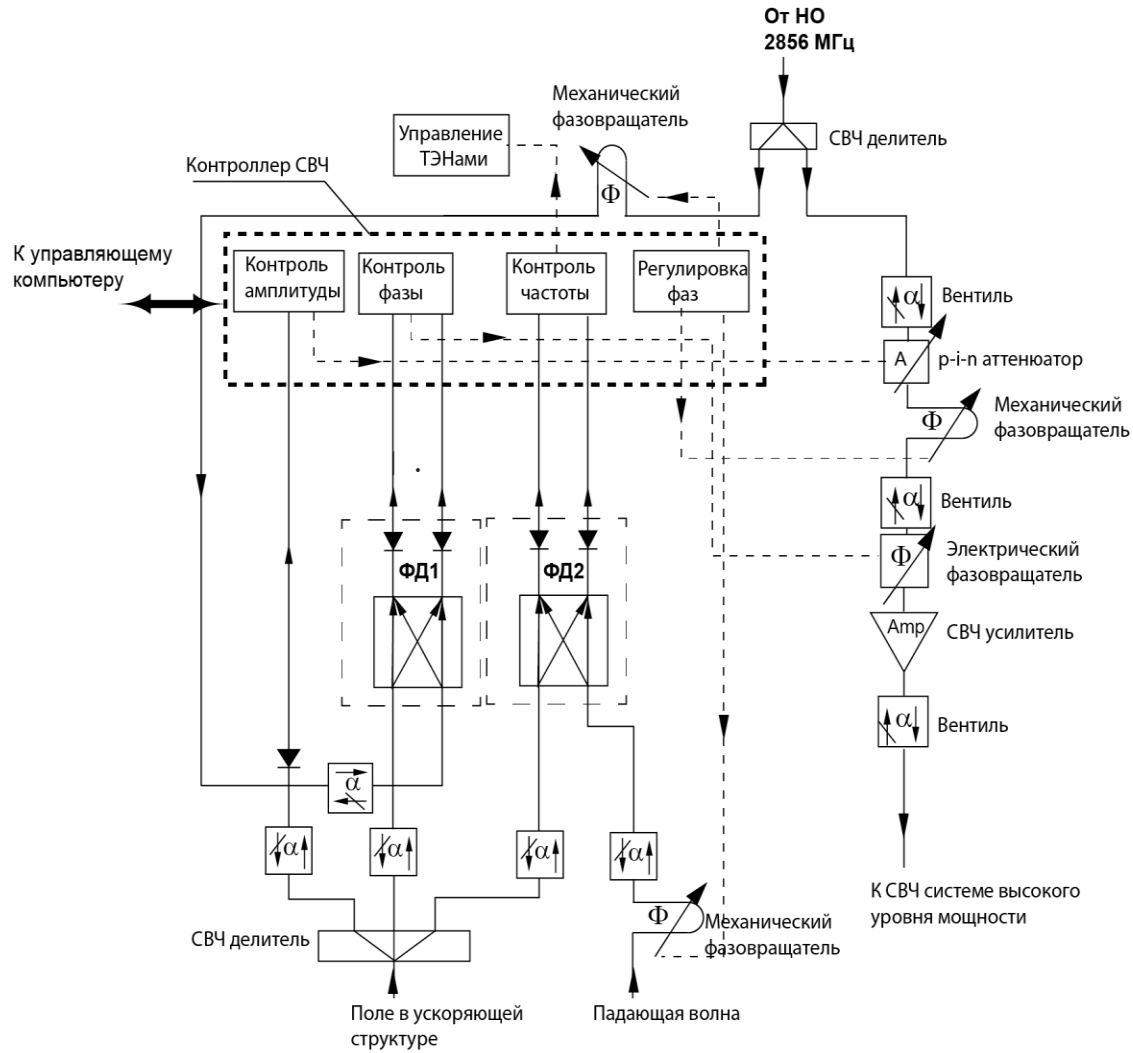
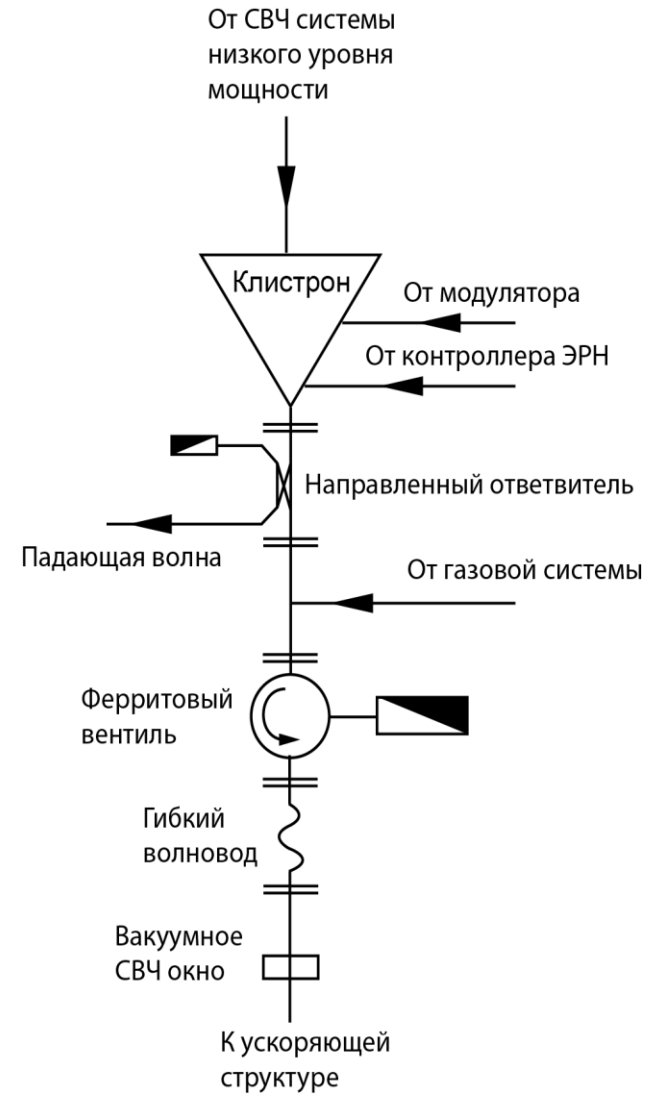


Схема ускорителя. 1 - электронная пушка с термокатодом, 2 - секция нерегулярной ускоряющей структуры, 3 - секция регулярной ускоряющей структуры, 4 - клистрон, 5 - ферритовый вентиль, 6 - гибкий волновод, 7 - вакуумное СВЧ окно, 8 - узел откачки, 9 - датчик тока пучка, 10 - вакуумный затвор, 11 - сильфон, 12 - тормозная мишень, 13 - высоковольтный модулятор клистрона, 14 - высоковольтный модулятор пушки, 15 - система контроля и управления.

Система СВЧ питания

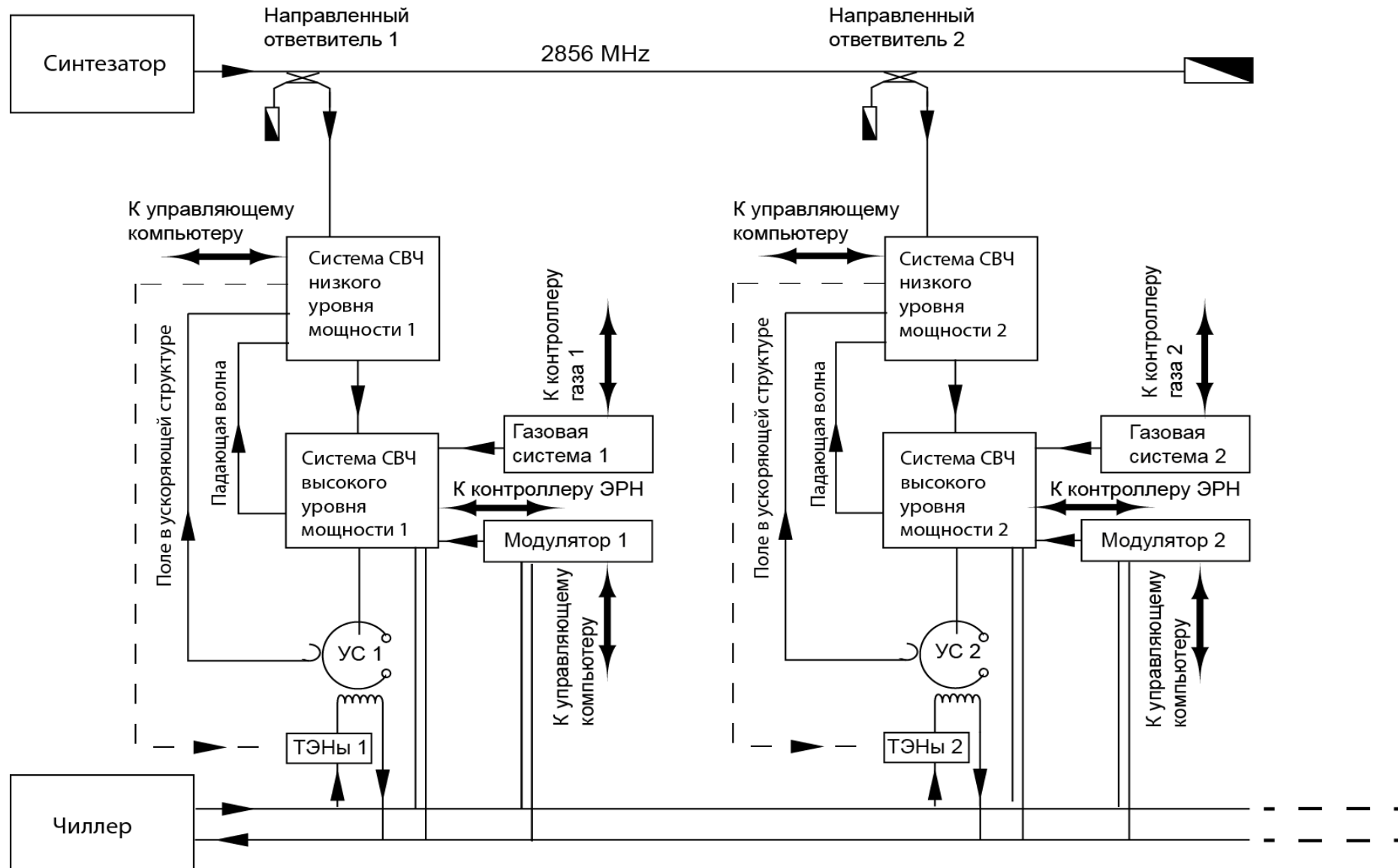


Низкий уровень мощности

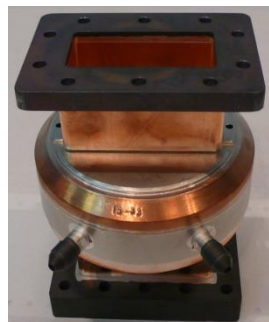


Высокий уровень мощности

Блок-схема системы высокочастотного питания ускорителя



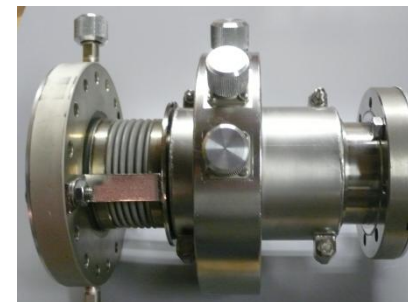
Компоненты ускорителя



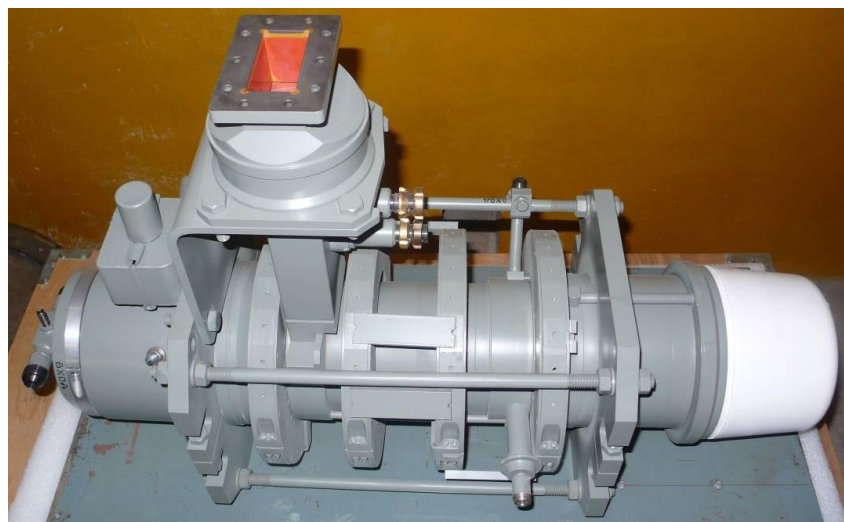
Вакуумное СВЧ окно



Узел откачки



Датчик тока



Клистрон КИУ-168



Ферритовый вентиль ВФВВ2-16А

Параметры электронного пучка

Параметры электронного пучка, важные для комптоновского источника, которые определяют схему построения и параметры ускорителя электронов:

- энергия;
- ширина спектра;
- нормализованный поперечный эмиттанс;
- заряд сгустка;
- длительность сгустка;
- частота следования сгустков.

Оценки потока рентгеновских (гамма) фотонов

$$\frac{dN_{ph}}{dt} = \sigma_{Th} \times \frac{Q_b}{e} \times \frac{w_L}{E_{ph}} \times \frac{\gamma}{4\pi\beta\xi\varepsilon_n} \times f_{rep}, \text{ где } w_L - \text{ энергия лазерного импульса.}$$

$$\overline{P}_L = w_L f_{rep} - \text{ средняя мощность лазера}$$

Таким образом, $\frac{dN_{ph}}{dt} \sim \frac{Q_b}{\varepsilon_n}$. Поскольку $\varepsilon_n = \varepsilon_n(Q_b)$ – возникает задача выбора оптимального значения заряда сгустка.

Нормализованный поперечный эмиттанс электронного сгустка

Среднеквадратичный нормализованный эмиттанс электронного сгустка СВЧ пушки определяется большим числом факторов и в зависимости от степени их корреляции может находиться в пределах

$$\sqrt{\varepsilon_{n,therm}^2 + \varepsilon_{SC}^2 + \varepsilon_{RF}^2 + \varepsilon_{Bz}^2 + \varepsilon_{mp}^2 + \varepsilon_T^2} < \varepsilon_{n,rms}^{RF\ gun} < \varepsilon_{therm} + \varepsilon_{SC} + \varepsilon_{RF} + \varepsilon_{Bz} + \varepsilon_{mp} + \varepsilon_T$$

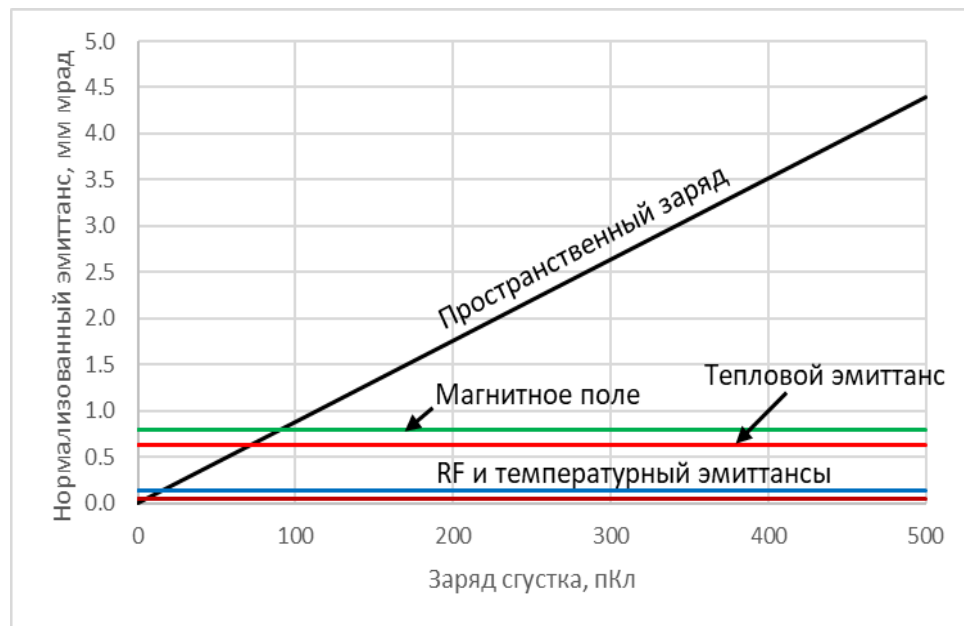
- тепловой эмиттанс обусловленный эффектами рассеяния электрона, поглотившего фотон, на пути его движения к поверхности катода
- вклад в эмиттанс нелинейных сил пространственного заряда
- рост эмиттанса, обусловленный зависящими от времени поперечными силами электромагнитного поля
- составляющая эмиттанса вследствие ненулевого магнитного поля на катоде
- рост эмиттанса из-за вклада мультиполных компонент ускоряющего поля
- вклад в эмиттанс, обусловленный тепловым движением электронов при отличной от нуля температуре катода

Нормализованный поперечный эмиттанс электронного сгустка

В процессе оптимизации СВЧ пушки осуществляется минимизация вклада перечисленных выше составляющих эмиттанса, при этом фундаментальным пределом является тепловой эмиттанс, который зависит от свойств фотокатода и размеров лазерного пятна на нем:

$$\epsilon_{n,therm\ xy} = \sigma_{L,xy} \sqrt{\frac{E_{phot,c} - \Phi_{eff}}{3m_0c^2}}$$

Выше величины заряда сгустка 100 пКл вклад пространственного заряда в величину эмиттанса становится доминирующим и для заряда заметно большего 100 пКл:



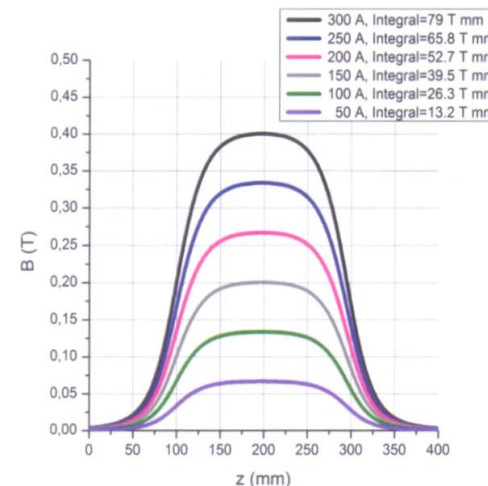
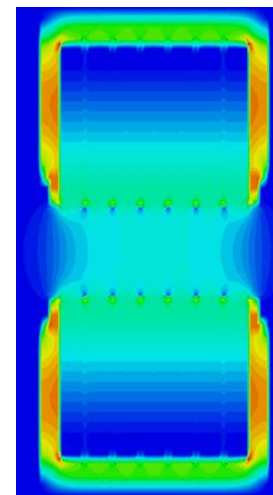
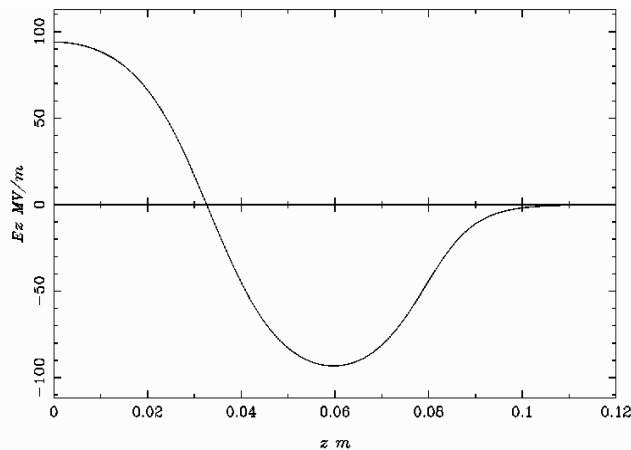
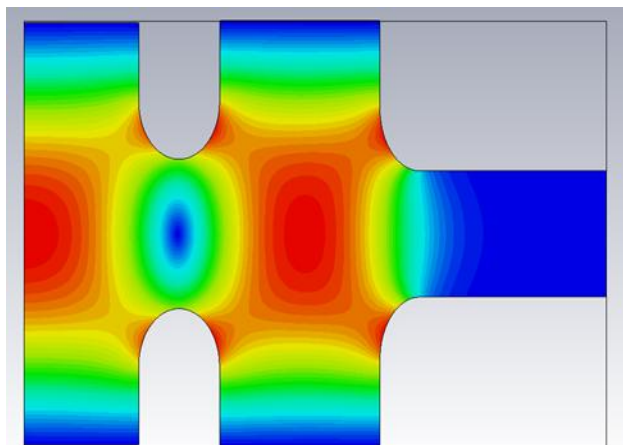
$$\epsilon_{n,rms}^{RF\ gun} \approx \epsilon_{SC} \sim Q_b$$

Светимость:

$$L \sim \frac{Q_b}{\epsilon_{SC}} \approx \frac{Q_b}{Q_b} \rightarrow 1$$

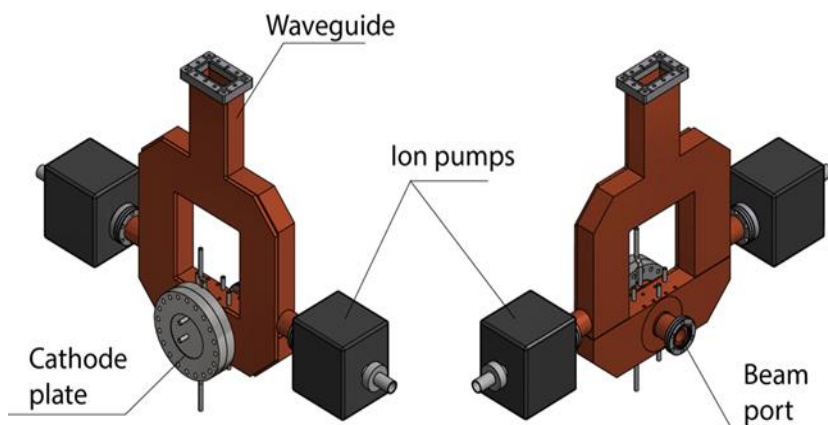
Вклад различных составляющих в величину среднеквадратичного нормализованного эмиттанса

СВЧ пушка с медным фотокатодом и соленоид



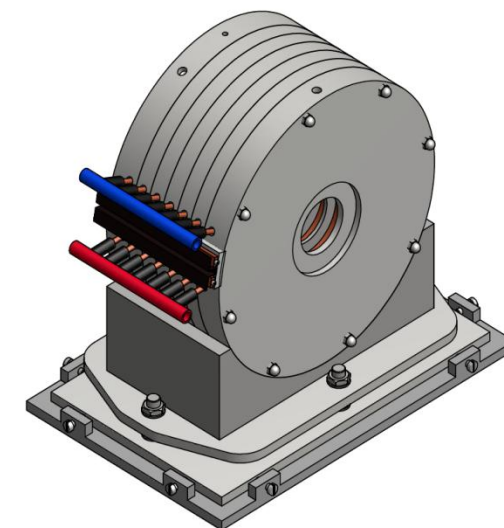
Распределение электрического поля СВЧ пушки в объеме и на оси.

Распределение магнитного поля соленоида, установленного на выходе СВЧ пушки



СВЧ пушка

Рабочая частота 2856 МГц, энергия пучка на выходе 4.4 МэВ, напряженность ускоряющего поля на катоде 94 МВ/м, потребляемая СВЧ мощность 5.5 МВт, заряд электронного сгустка 100 - 200 пКл, энергия лазерного импульса 25 мкДж для длины волны лазерного излучения $\lambda=255$ нм, длительность лазерного импульса 10 пс.



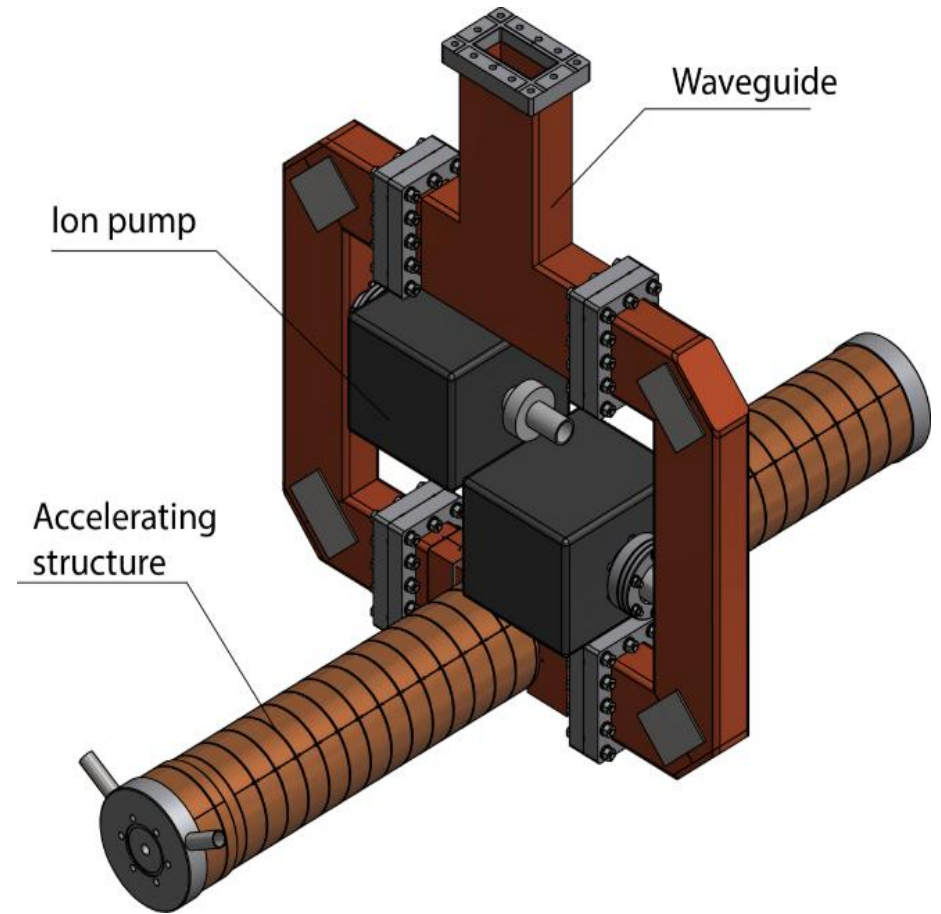
Соленоид

Ускоряющая структура

Линейный ускоритель реализуется на основе двух секций ускоряющей структуры со стоячей волной с внутренними ячейками связи, работающей на $\pi/2$ - колебании на частоте 2856 МГц. Каждая секция состоит из 21 ускоряющей ячейки 20 ячеек связи, имеет длину 1146 мм и обеспечивает прирост энергии 22.8 МэВ при затратах СВЧ мощности 5.6 МВт.

Характеристика	Значение
Частота ускоряющей ячейки	2856 МГц
Добротность ячейки	14191
Затраты СВЧ мощности	5.6 МВт
Эффективное шунтовое сопротивление ячейки	84 Ом/м
Коэффициент связи	6.2 %
Количество ячеек	21

Для секции с одним окном связи из-за наличия дипольной компоненты поля наблюдается скачкообразный рост эмиттанса в вертикальной плоскости, при этом эмиттанс возрастает примерно на 20% при прохождении двух секций. Для компенсации дипольной компоненты поля в узел ввода мощности было введено второе симметрично расположенное окно связи

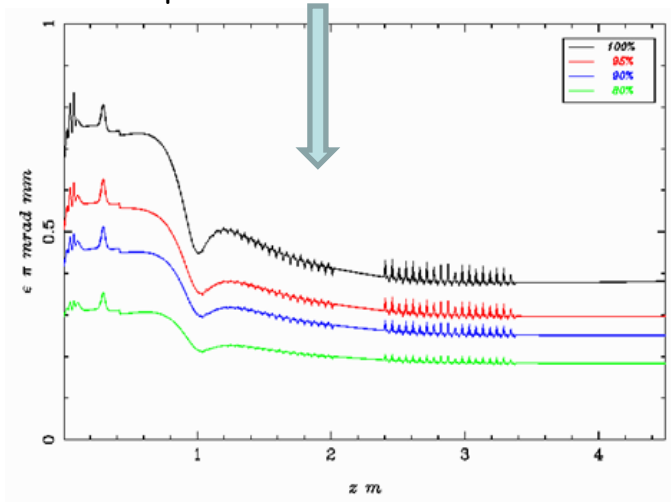


Секция ускоряющей структуры

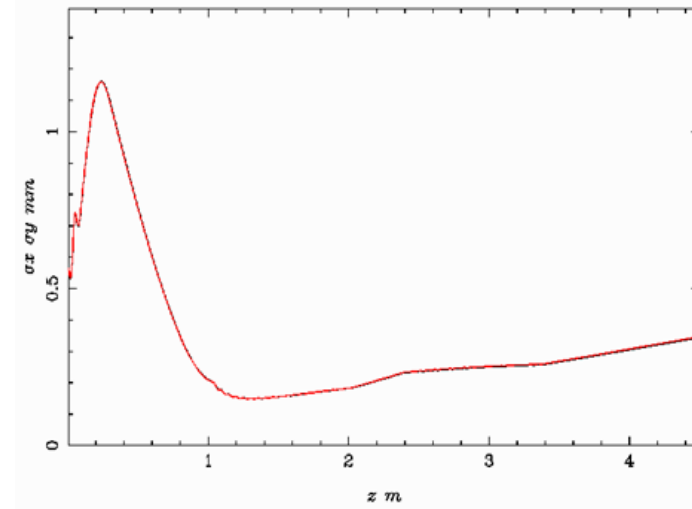
Динамика пучка

Поочередное действие на сгусток конечной длины зависящего от времени радиального электрического поля на входе в ускоряющую ячейку, азимутального магнитного поля в ее центре и радиального электрического поля на выходе

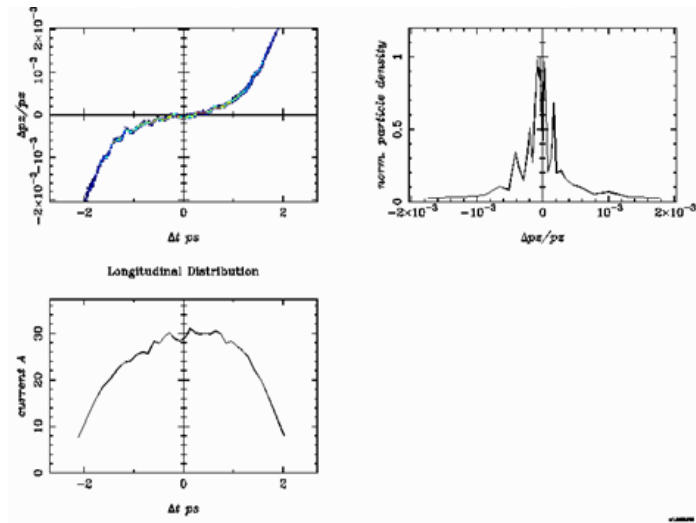
(а)



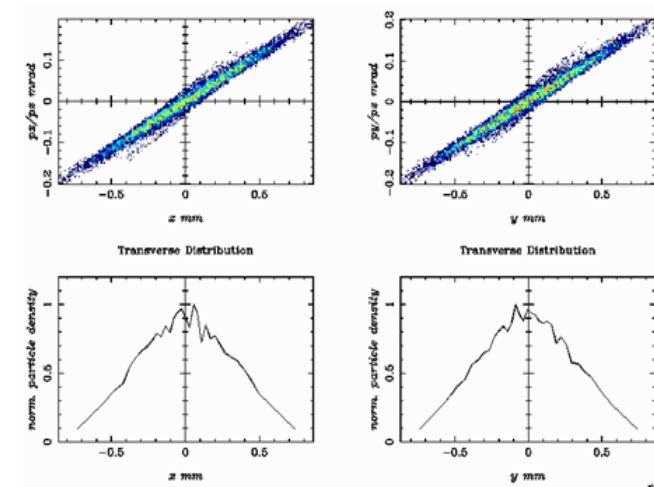
(б)



(в)



(г)

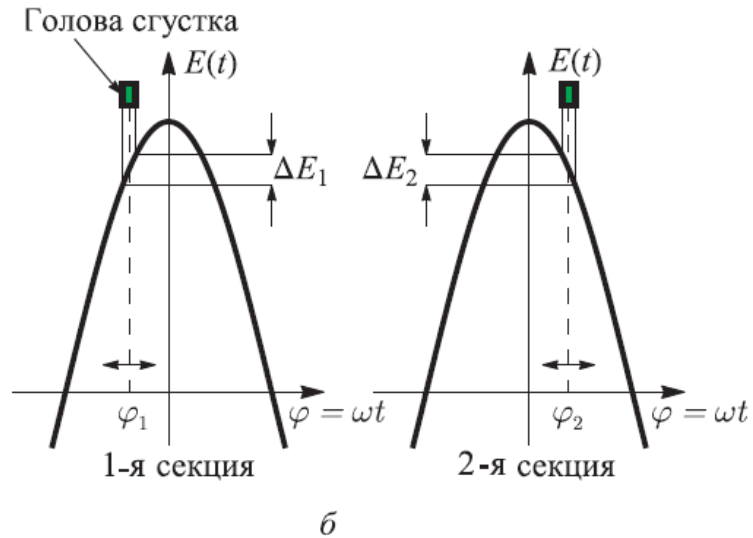
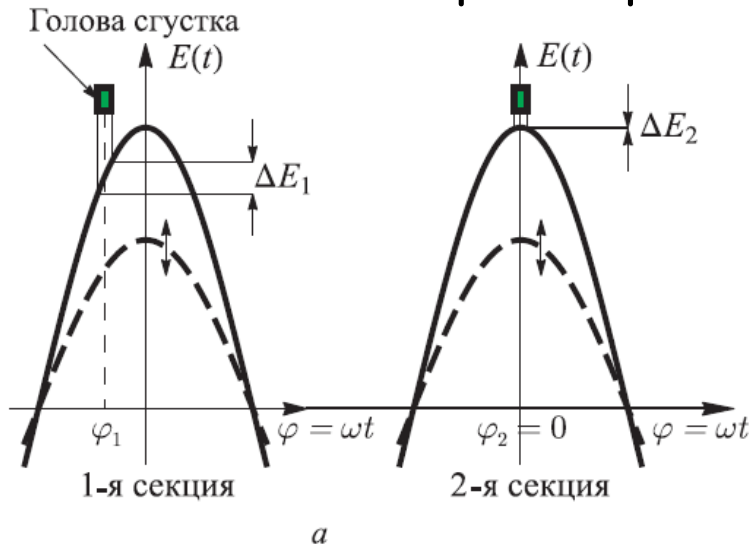


(а) Изменение нормализованного поперечного эмиттанта пучка для различной доли тока и (б) среднеквадратичного размера пучка в процессе ускорения. (в) Продольный и (г) поперечный эмиттансы пучка на выходе ускорителя.

Параметры пучка на выходе линейного ускорителя комптоновского источника рентгеновского излучения

Максимальная энергия ускоренного пучка	50 ± 2 МэВ
Диапазон регулирования энергии	35 - 50 МэВ
Разброс по энергии	$0,25 \pm 0,1\%$
Нормализованный эмиттанс	$1 \pm 0,5$ мм мрад
Среднеквадратичный радиус пучка в точке взаимодействия	30 ± 10 мкм
Заряд сгустка	100 пКл
Длительность сгустка	10 ± 4 пс
Максимальная частота следования сгустков	1000 Гц

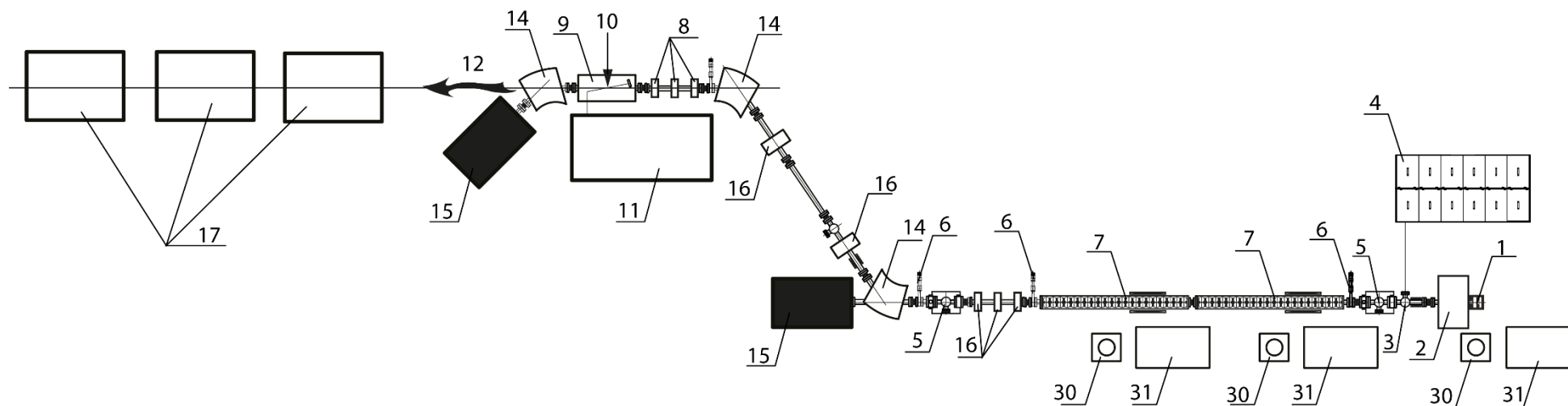
Регулирование энергии ускоренного пучка в пределах 35-50 МэВ при сохранении низкого энергетического разброса



В первом варианте регулирование энергии осуществляется за счет изменения амплитуд ускоряющего поля обеих секций. Фаза поля первой секции выбирается вблизи фазы максимума ускорения на возрастающем участке для того, чтобы компенсировать энергетический разброс, вызванный действием сил пространственного заряда на участке дрейфа, где частицы, идущие в голове сгустка (раньше по времени), ускоряются, а в хвосте — тормозятся, а также компенсировать скольжение по фазе, обусловленное отличием скорости частиц от скорости света. Во втором варианте регулирование энергии достигается изменением фаз поля при постоянной амплитуде. Фазы поля первой и второй секций выбираются по разные стороны от фазы максимального ускорения так, чтобы энергетический разброс пучка, возникший в первой секции, был скомпенсирован во второй.

Два варианта регулирования энергии пучка:
а — изменением амплитуд, б — изменением фаз ускоряющего поля

Схема и принцип работы ускорителя



Состав КИ рентгеновского излучения на основе линейного ускорителя. 1 - СВЧ пушка с фотокатодом, 2 - соленоид, 3 - окно ввода лазерного излучения, 4 - лазер фотокатода, 5 - станция диагностики пучка, 6 - вакуумный затвор, 7 - ускоряющая структура, 8 - триплет квадрупольных линз, 9 - камера взаимодействия, 10 - точка взаимодействия, 11 - основной лазер, 12, 13 - рентгеновское излучение, 14 - поворотный магнит, 15 - поглотитель пучка, 16 - квадрупольная линза, 17 - рабочие станции, 30 - импульсный клистрон, 31 - модулятор

Система СВЧ питания на основе отечественных многолучевых клистронов

Клистрон КИУ-284

Рабочая частота	2856 МГц
Максимальная импульсная мощность	6 МВт
Максимальная средняя мощность	25 кВт
Максимальный импульсный ток катода	300 А
Максимальное напряжение на катоде	-55 кВ
Максимальный ток накала	28 А
Напряжение накала	26 В
Напряжение ЭРН	4 кВ

Модулятор

Максимальная импульсная мощность	16.5 МВт
Максимальная средняя мощность	50 кВт
Максимальная амплитуда импульса тока	300 А
Максимальная амплитуда напряжения	-55 кВ
Длительность вершины импульса	2 мкс
Плоскостность вершины импульса	1 %
Максимальная частота следования импульсов	1000 Гц
Стабильность амплитуды импульса	$\pm 0.01\%$
Ток накала	28 А
Напряжение накала	26 В

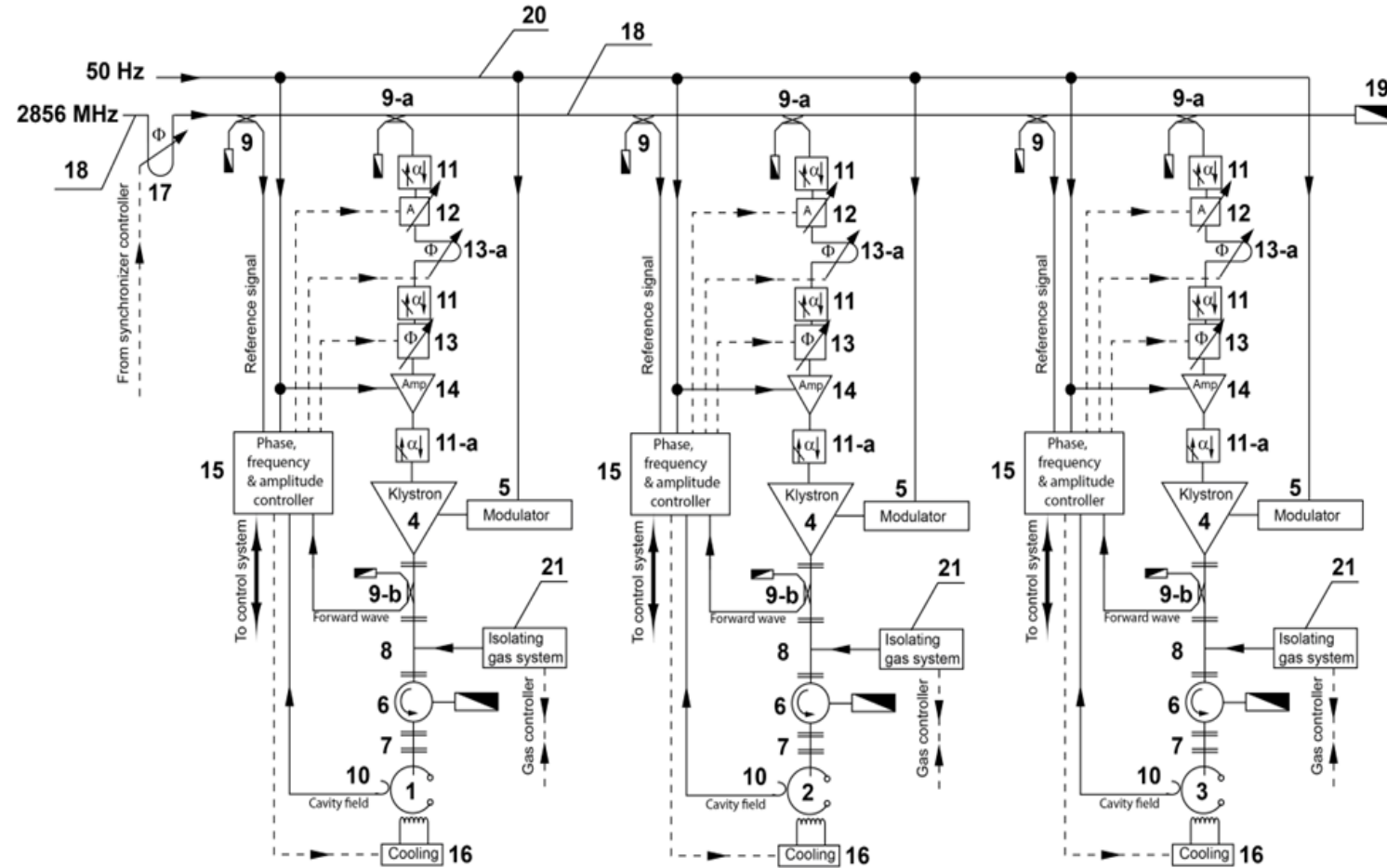
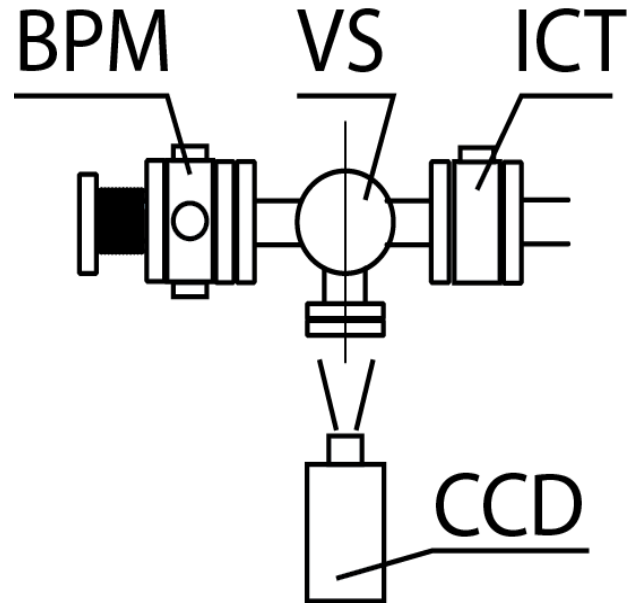
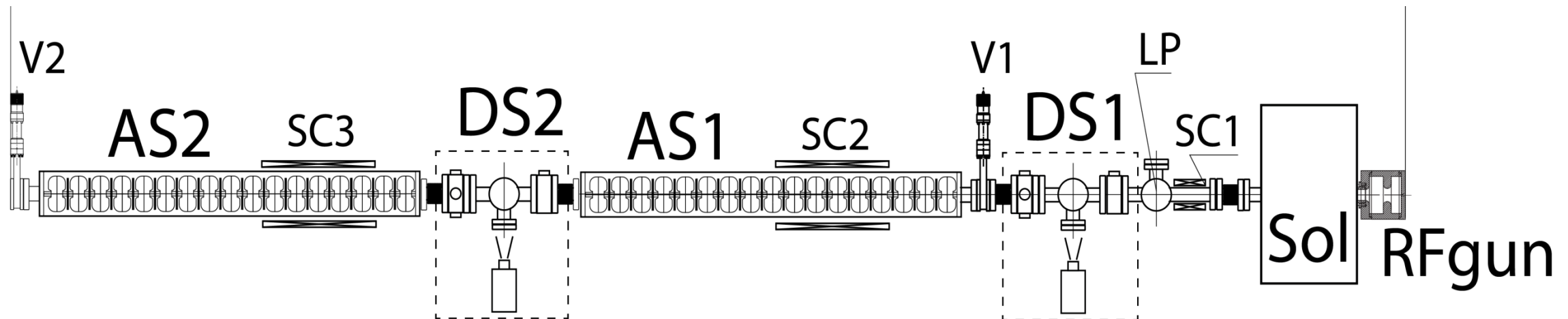


Схема системы СВЧ питания линейного ускорителя. 1 - СВЧ пушка, 2, 3 - секции линейного ускорителя со стоячей волной, 4 - клистрон, 5 - модулятор, 6 - циркулятор, 7 - вакуумное окно, 8 - волновод подачи изолирующего газа, 9, 9-а - направленные ответвители падающей волны, 10 - антенна контроля поля, 11, 11-а - ферритовые вентили, 12 - быстрый регулируемый аттенюатор, 13 - быстрый регулируемый фазовращатель, 13-а, 17 - механические фазовращатели, 14 - СВЧ усилитель, 15 - система контроля и стабилизации амплитуды, фазы и резонансной частоты, 16 - модуль стабилизации температуры, 18 - линия опорного сигнала, 19 - согласованная нагрузка, 20 - линия синхронизации 100 - 1000 Гц, 21 - система подачи изолирующего газа.

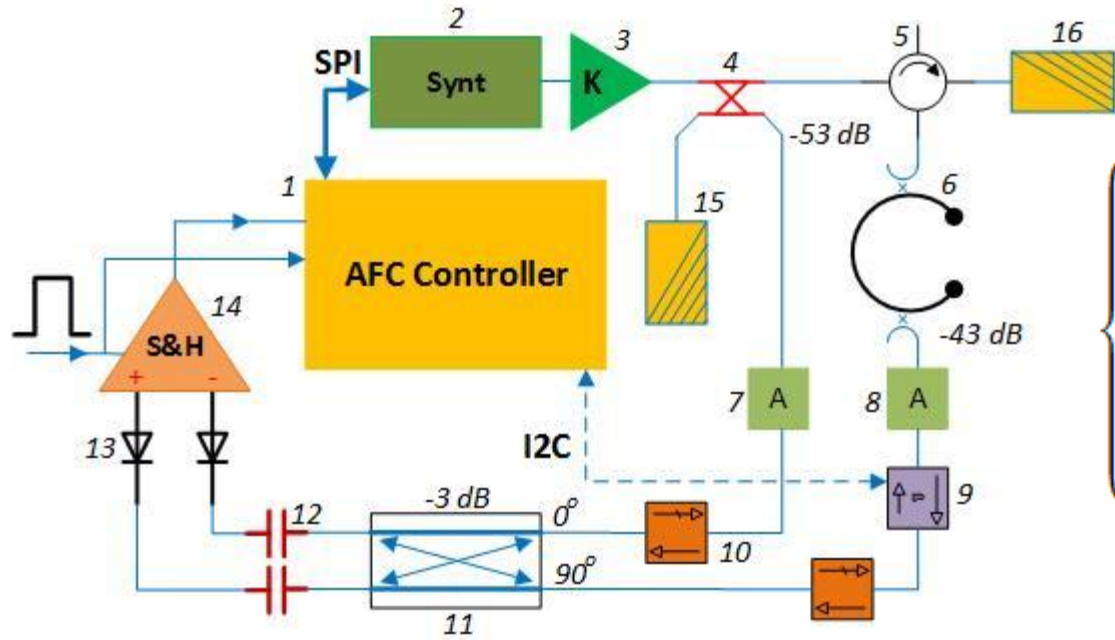
Диагностика пучка



ICT - датчик заряда сгустка
VS - экран переходного излучения
BPM - датчик положения пучка
CCD - CCD камера



Стабилизация параметров пучка линейного ускорителя



$$V_c(t_i) = \frac{\cos \psi(t_i)}{1 + \beta} \left\{ \sqrt{4\beta Z_e P_{kl} - [I_b Z_e \sin(\psi(t_i) - \varphi_b)]^2} - I_b Z_e \cos(\psi(t_i) - \varphi_b) \right\}$$

$$f_g(t_1) = f_{g0}, \quad t_1 = 0,$$

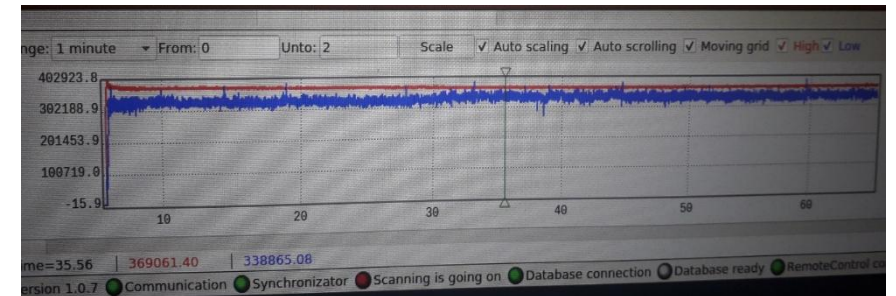
$$\psi(t_i) = \tan^{-1} \left(-2Q_L \frac{f_g(t_i) - f(t_i)}{f(t_i)} \right),$$

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t$$

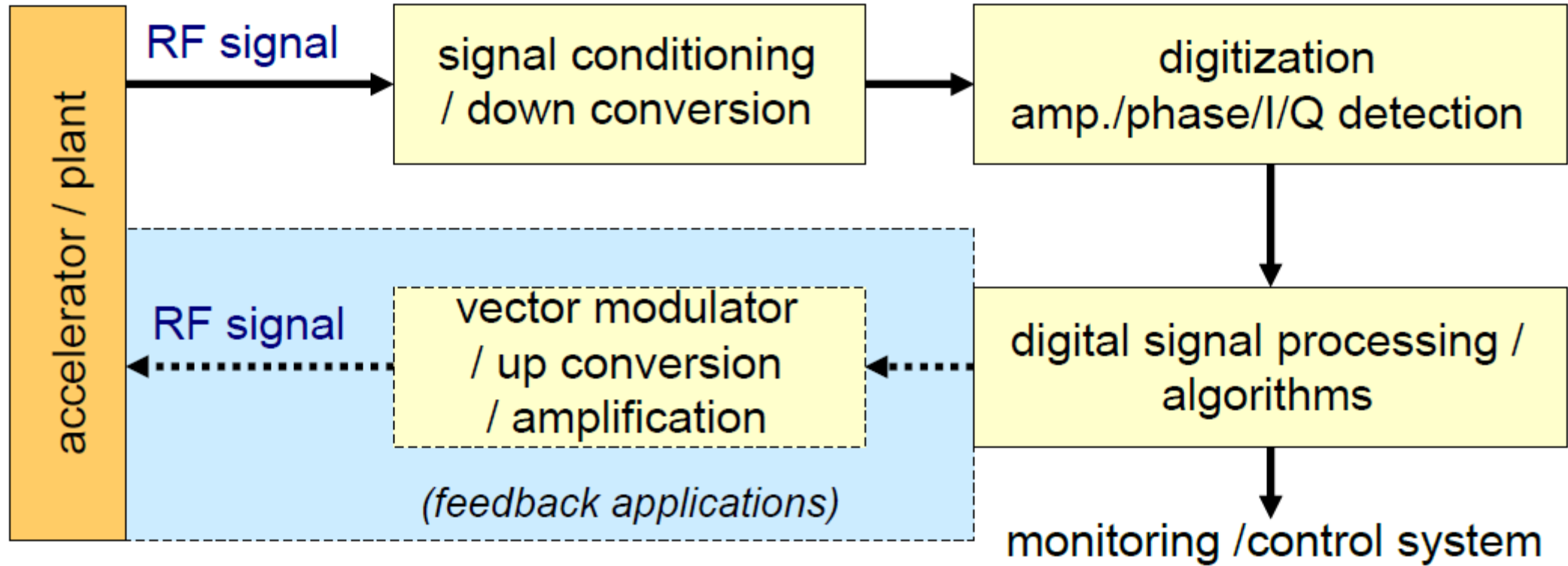
$$f_g(t_{i+1}) = F_{AFC}(U_m(t_i)).$$

$$F_{AFC}(U_m(t_i)) = \begin{cases} f_g(t_{i+1}) = f_g(t_i) + \Delta f_{step} & \text{при } U_m(t_i) > U_h \\ f_g(t_{i+1}) = f_g(t_i) - \Delta f_{step} & \text{при } U_m(t_i) < U_l \end{cases}$$

Структурная схема АТЧГ. 1 - контроллер, 2 - синтезатор НМС833, 3 - усилительный тракт, 4 - волноводно-коаксиальный направленный ответвитель, 5 - циркулятор, 6 - ускоряющая структура, 7 - переменный аттенюатор, 8 - фиксированный аттенюатор, 9 - фазовращатель, 10 - коаксиальный вентиль, 11 - 3 дБ балансный смеситель, 12 - коаксиальная гальваническая развязка, 13 - детекторная головка, 14 - схема выборки-хранения, 15 - коаксиальная согласованная нагрузка, 16 - волноводная согласованная нагрузка.



Стабилизация параметров пучка линейного ускорителя



T. Schilcher, "RF Applications in Digital Signal Processing", Digital Signal Processing CAS 2007, pp.249-283

A. Salom and F. Perez, "Digital LLRF for ALBA Storage Ring", Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy

M. Diop, P. Marchand, F. Ribeiro, R. Sreedharan, "Digital Low Level RF System for SOLEIL"

Стабилизация параметров пучка линейного ускорителя

$$f_{RF}: y_{RF}(t) = A_{RF} \cdot \sin(\omega_{RF} t + \varphi_{RF})$$

$$f_{LO}: y_{LO}(t) = A_{LO} \cdot \cos(\omega_{LO} t + \varphi_{LO})$$

$$f_{IF}: y_{IF}(t) = y_{RF}(t) \cdot y_{LO}(t)$$

$$y_{IF}(t) = [A_{RF} \cdot \sin(\omega_{RF} t + \varphi_{RF})] \cdot [A_{LO}$$

$$y_{IF}(t) = \frac{1}{2} A_{RF} A_{LO} [\sin\{(\omega_{RF} - \omega_{LO})t + (\varphi_{RF} - \varphi_{LO})\} + \sin\{(\omega_{RF} + \omega_{LO})t + (\varphi_{RF} + \varphi_{LO})\}]$$

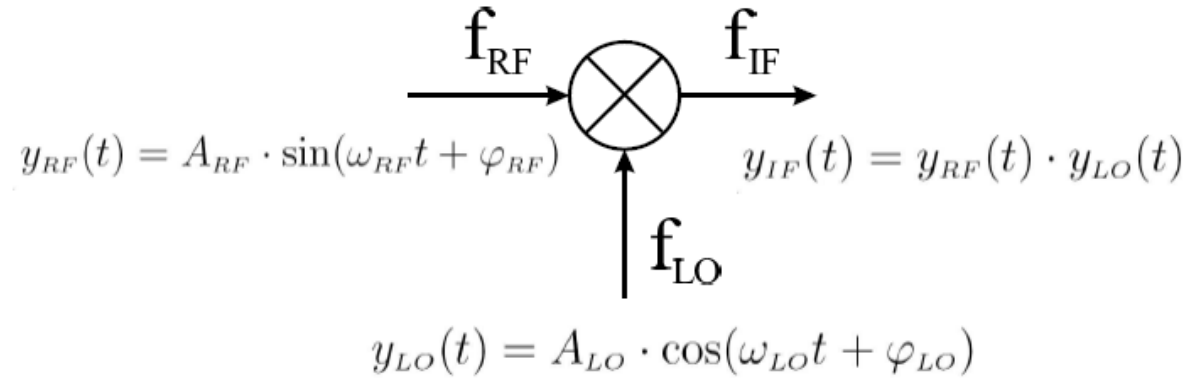
$$y_{IF}(t) = \frac{1}{2} A_{RF} A_{LO} [\sin\{(\omega_{RF} - \omega_{LO})t + (\varphi_{RF} - \varphi_{LO})\}]$$

$$\Rightarrow y_{IF}(t) = A_{IF} \cdot \sin(\omega_{IF} t + \varphi_{IF})$$

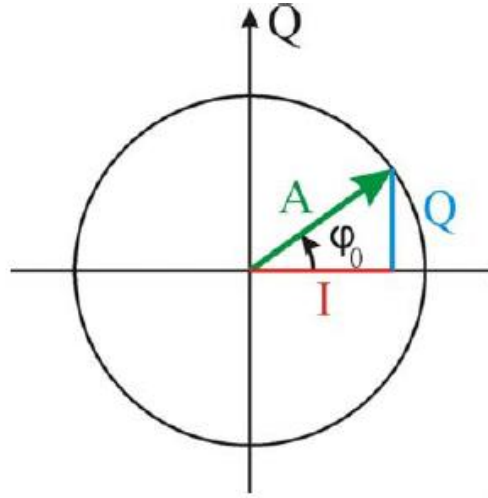
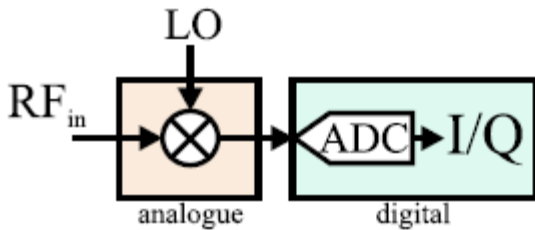
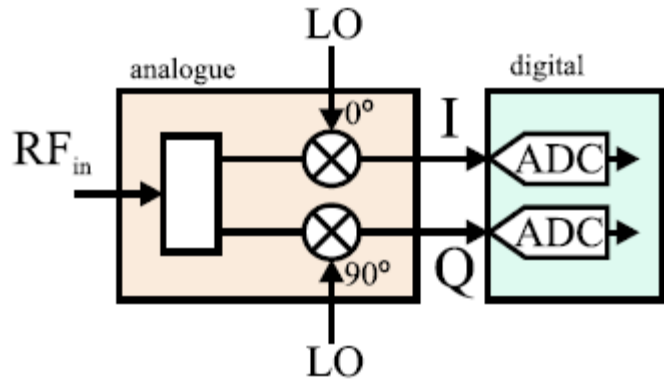
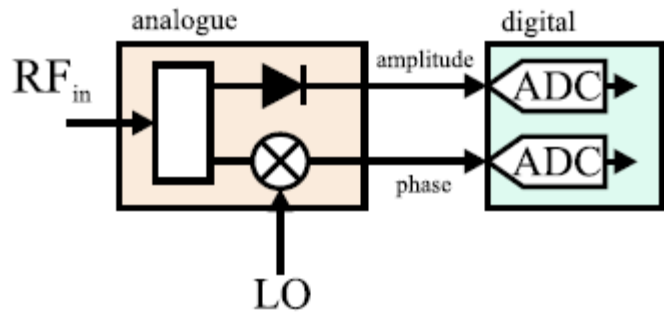
$$\omega_{IF} = (\omega_{RF} - \omega_{LO})$$

$$A_{IF} = \frac{1}{2} A_{RF} A_{LO} \sim A_{RF}$$

$$\varphi_{IF} = \varphi_{RF} - \varphi_{LO} \sim \varphi_{RF}$$



Стабилизация параметров пучка линейного ускорителя



$$y(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$

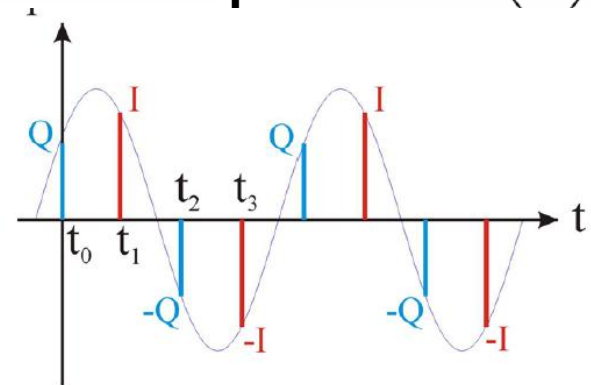
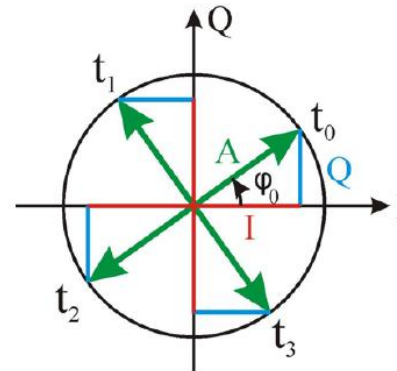
$$y(t) = \underbrace{A \cos \varphi_0}_{=: I} \sin \omega t + \underbrace{A \sin \varphi_0}_{=: Q} \cos \omega t$$

I: in-phase component

Q: quadrature-phase component

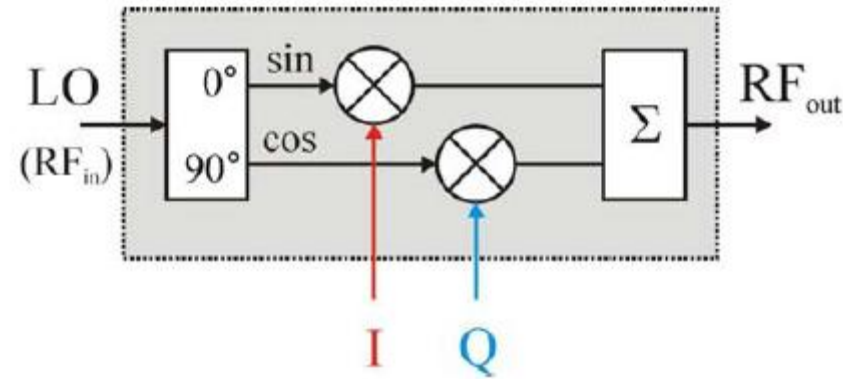
$$y(t) = I \cdot \sin \omega t + Q \cdot \cos \omega t$$

$$\left. \begin{aligned} I &= A \cdot \cos \varphi_0 \\ Q &= A \cdot \sin \varphi_0 \end{aligned} \right| \begin{aligned} A &= \sqrt{I^2 + Q^2} \\ \varphi_0 &= \text{atan} \left(\frac{Q}{I} \right) \end{aligned}$$



$$\left. \begin{aligned} y(t) &= I \cdot \sin \omega t + Q \cdot \cos \omega t \\ I &= A \cdot \cos \varphi_0 \\ Q &= A \cdot \sin \varphi_0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \omega t_0 = 0 : & & y(t_0) &= Q \\ \omega t_1 = \pi/2 : & & y(t_1) &= I \\ \omega t_2 = \pi : & & y(t_2) &= -Q \\ \omega t_3 = 3\pi/2 : & & y(t_3) &= -I \end{aligned}$$

Стабилизация параметров пучка линейного ускорителя



$$\begin{aligned} RF_{out}(t) &= I \cdot A_{RF} \cdot \sin \omega t + Q \cdot A_{RF} \cdot \cos \omega t \\ &= A_{out} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \end{aligned}$$

$$A_{out} = A_{RF} \sqrt{I^2 + Q^2} \quad \varphi_0 = \text{atan} \left(\frac{Q}{I} \right)$$

Модуляция выходного сигнала по амплитуде:

$$I(t) = A_0(t) \cdot \cos \varphi_0$$

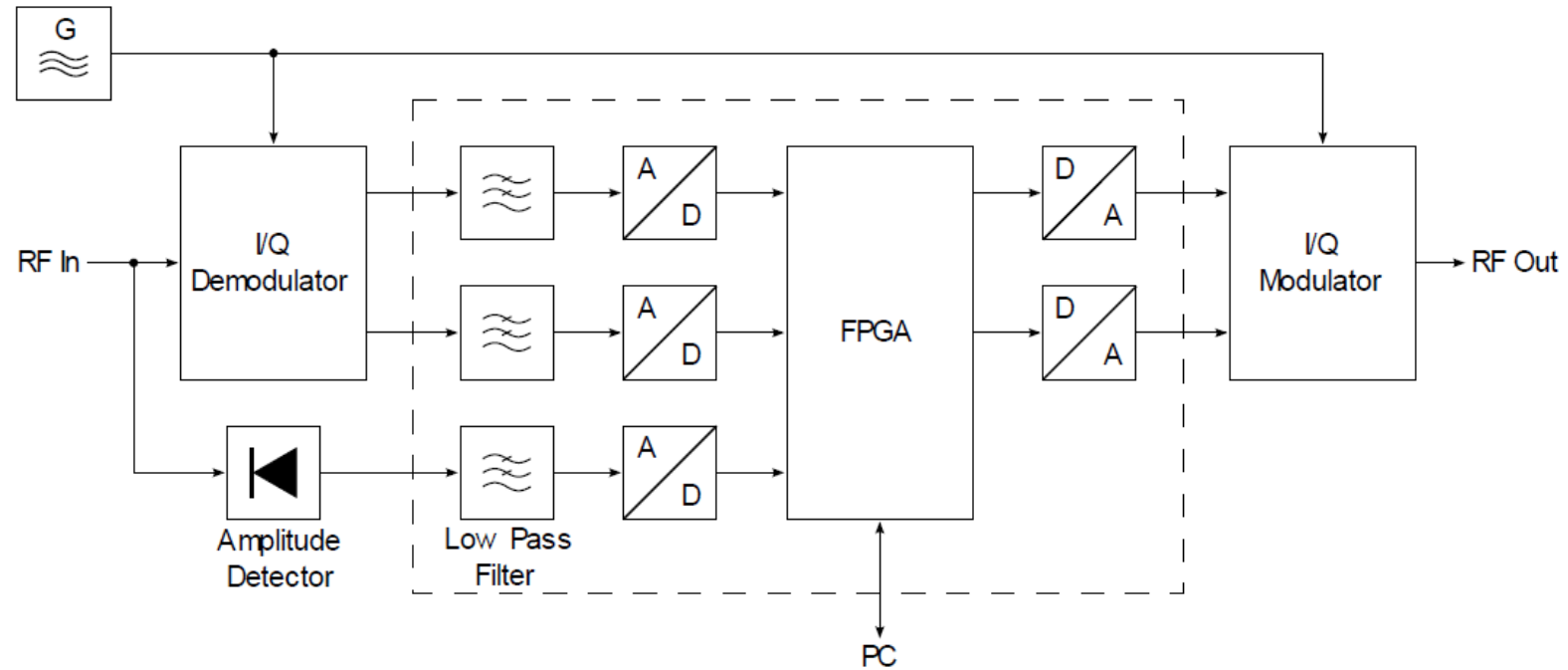
$$Q(t) = A_0(t) \cdot \sin \varphi_0$$

Модуляция выходного сигнала по фазе:

$$I(t) = A_0 \cdot \cos \varphi_0(t)$$

$$Q(t) = A_0 \cdot \sin \varphi_0(t)$$

Стабилизация параметров пучка линейного ускорителя



IKP TU Darmstadt Martin Konrad xkonrad@ikp.tu-darmstadt.de

Спасибо за внимание!