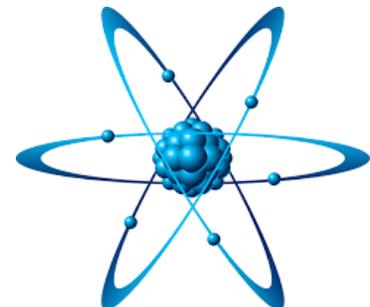


Skobeltsyn
Institute of Nuclear Physics

Lomonosov Moscow State University



Компенсация эффекта изменения резонансной частоты нормальнопроводящих ускоряющих структур линейных ускорителей импульсного действия

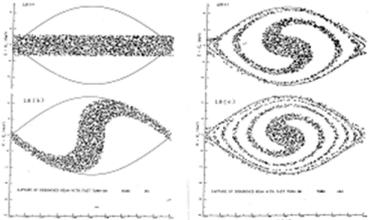
- Ермаков Андрей Николаевич,
- Старший научный сотрудник ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, к.ф.-м.н.,
- E-mail: a_ermak1978@mail.ru
- +7(495)939-24-51

- 18 марта 2021 г.

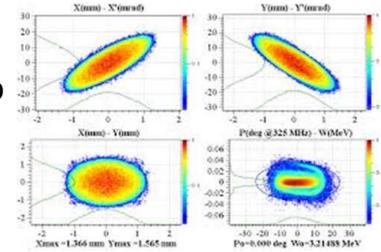
Линейный ускоритель

LINAC (линейный ускоритель) – это система ускорения заряженных частиц в электромагнитном поле вдоль линейной траектории.

Динамика продольного движения заряженных частиц

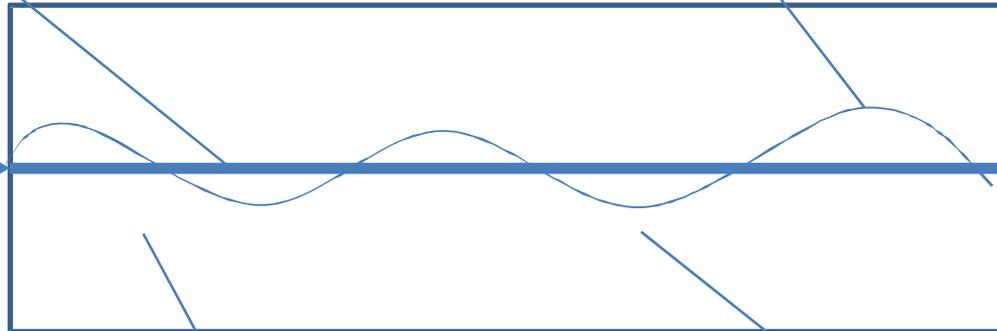


Динамика поперечного движения заряженных частиц

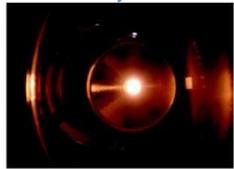


Динамика движения частиц в линейном ускорителе

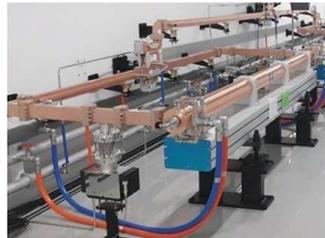
Источник частиц



Ускоренный пучок



Ускоряющие структуры



Элементы фокусировки: квадруполи и соленоиды

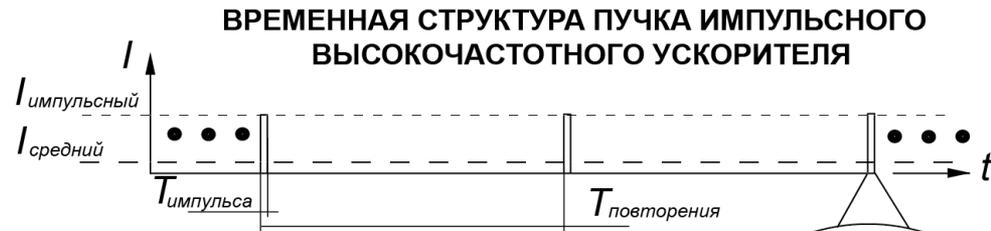


Технология линейного ускорителя

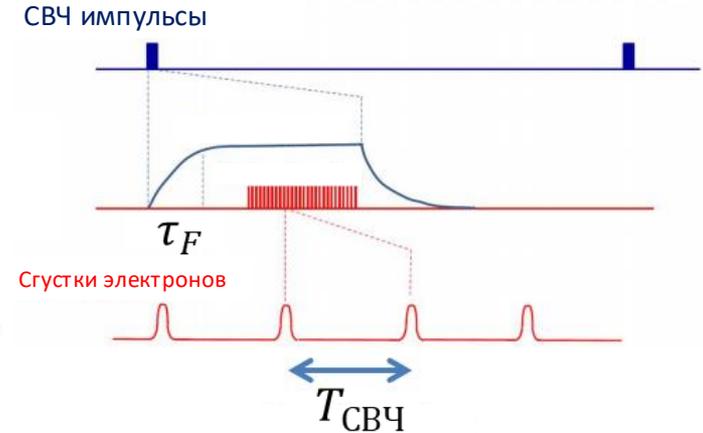
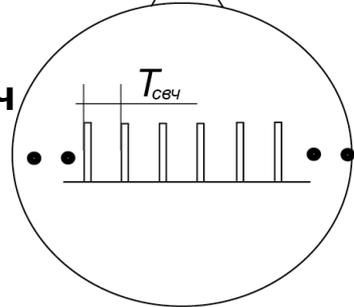
Системы линейного ускорителя



Временная структура пучка



Около 10 тысяч
импульсов



Характерные значения для радиографического ускорителя

$$T_{\text{повторения}} = 2.5 - 20 \text{ мс}$$

$$T_{\text{импульса}} = 3 - 4 \text{ мкс}$$

$$T_{\text{СВЧ}} = 350 \text{ пс}$$

$$I_{\text{импульсный}} = 10 - 150 \text{ мА}$$

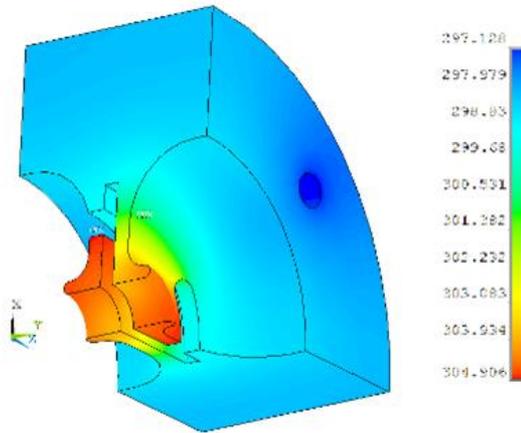
$$I_{\text{средний}} = 10 - 100 \text{ мкА}$$

$$D = \frac{T_{\text{повт}}}{T_{\text{имп}}} - \text{скважность} \quad \tau_F = \frac{2Q}{\omega_{RF}} - \text{время заполнения}$$

$$I_{\text{сред}} = I_{\text{имп}} / D$$

$$T_{\text{СВЧ}} = \frac{2\pi}{\omega_{RF}} - \text{расстояние между сгустками электронов}$$

Эффект сдвига резонансной частоты ускоряющей структуры

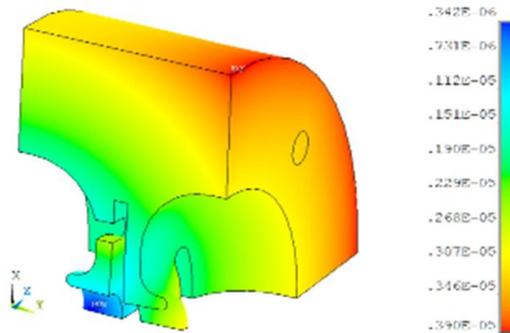


$$\Delta f_{1/2} = \frac{f_{0ac}}{Q_L} \approx 1,5 \text{ МГц}$$

$$\Delta f_{ac} = \Delta f_{ac1} + \Delta f_{ac2}$$

Деформация Равномерный нагрев

Поле температур в ускоряющей ячейке



При скважности 840, $E = 6 \text{ МэВ}$, $D = 10 \text{ Гр/мин}$
и расходе жидкости охлаждения 0,2 л/сек

Для воды: $\Delta f_{ac} \approx -1,75 \text{ МГц}$ $\Delta f_{cc} \approx -0,66 \text{ МГц}$
 $\alpha \approx 36000 \text{ Вт/м}^2/\text{К}$

Для этиленгликоля:

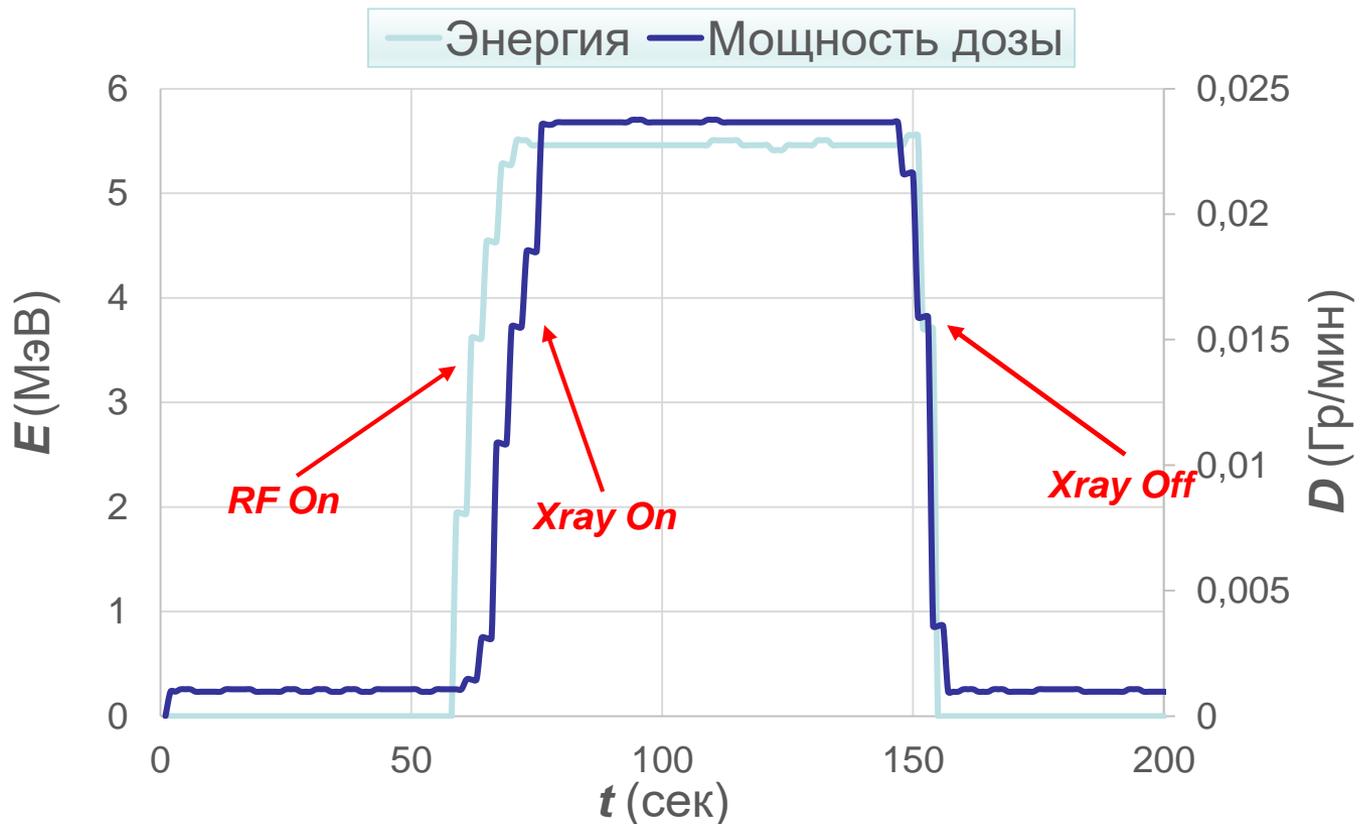
$\Delta f_{ac} \approx -2,84 \text{ МГц}$ $\Delta f_{cc} \approx -1,69 \text{ МГц}$
 $\alpha \approx 7200 \text{ Вт/м}^2/\text{К}$

Поле деформаций в ускоряющей ячейке

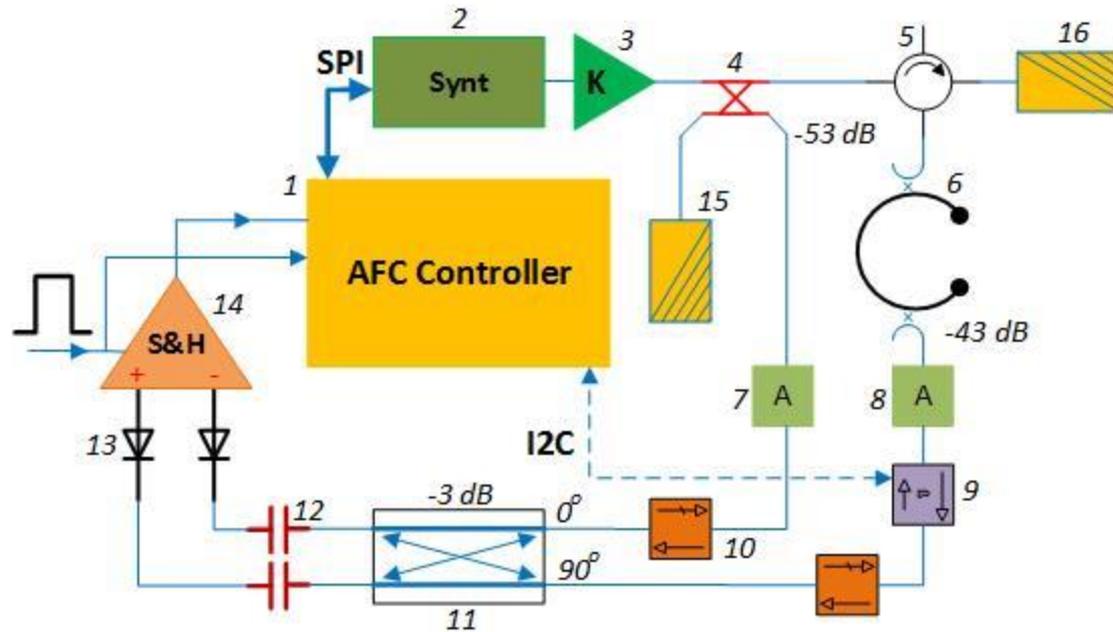
Управление частотой

$$f_{final} = f_0 + \Delta f_{ac}$$

f_0 – резонансная частота вакуумированной структуры, полученная в холодных измерениях при температуре t_0

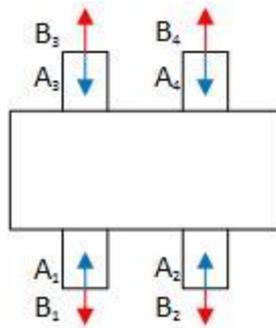


Система автоматической подстройки часоты синтезатора (генератора)



Структурная схема АПЧГ. 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.

Система автоматической подстройки частоты синтезатора (генератора)



$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Матрица передачи 3 дБ гибридного моста.

Падающие и отраженные волны на входах 3 дБ гибридного моста.

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} \text{ — столбец входной (падающей) волны}$$

$$B = S \times A$$

$$U_{AFC} = V_1 - V_2 = 2k_a A_{30} A_{40} \cos \theta \quad B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} \text{ — столбец выходной (отраженной) волны}$$

$$U_{AFC} = k \sqrt{P_{kl} P_c(t)} \sin \Delta \varphi$$

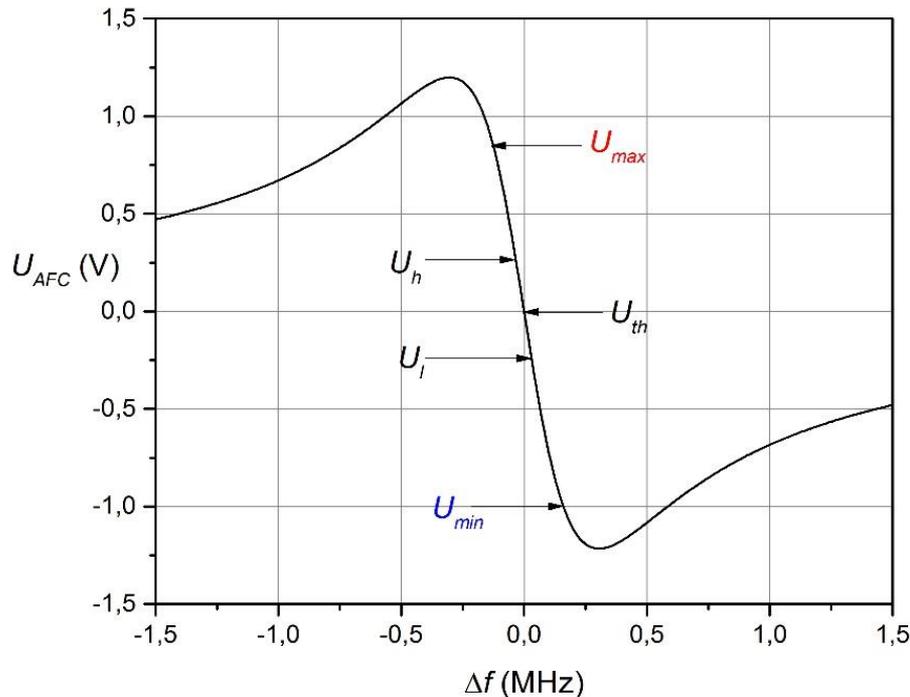
выражение для сигнала на выходе разностного усилителя

$$\Delta \varphi = \psi(t) = \arctan \left(-2Q_L \frac{f_g - f(t)}{f(t)} \right)$$

Система автоматической подстройки частоты синтезатора (генератора)

Функция перестройки частоты синтезатора:

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



Резонансная частота:

$$f(t_{i+1}) = f_{final} + (f_{start} - f_{final})e^{-t_i/\tau}$$

f_{start} – резонансная частота до подачи СВЧ мощности в момент времени $t = 0$, f_{final} – стационарная резонансная частота, τ – тепловая постоянная ускоряющей структуры

Шаг по времени определим, как $\Delta t = \frac{1}{f_{rep}}$, где f_{rep} – частота следования импульсов СВЧ поля

Зависимость напряжения на выходе схемы выборки-хранения от разности частот СВЧ сигналов направленного ответвителя и петли связи ускоряющей структуры.

Система автоматической подстройки частоты синтезатора (генератора)

Напряжение на ускоряющем зазоре в момент времени t_i :

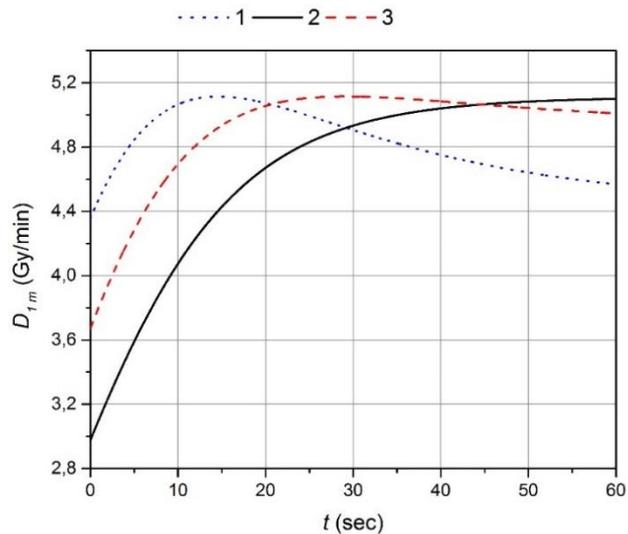
$$\left\{ \begin{array}{l} f_g(t_1) = f_{g0}, \quad t_1 = 0, \\ \psi(t_i) = \tan^{-1} \left(-2Q_L \frac{f_g(t_i) - f(t_i)}{f(t_i)} \right), \\ V_c(t_i) = \frac{\cos \psi(t_i)}{1 + \beta} \left\{ \sqrt{4\beta Z_e P_{kl} - [I_b Z_e \sin(\psi(t_i) - \varphi_b)]^2} - I_b Z_e \cos(\psi(t_i) - \varphi_b) \right\} \\ t_{i+1} = t_i + \Delta t \\ f_g(t_{i+1}) = F_{AFC}(U_m(t_i)). \end{array} \right.$$

Мощность дозы тормозного гамма-излучения на расстоянии 1 м от мишени:

$$D_{1m} \left(\frac{\Gamma_p}{\text{МИН}} \right) = 0,33 e I (\text{мА}) V_c (\text{МВ})^3$$

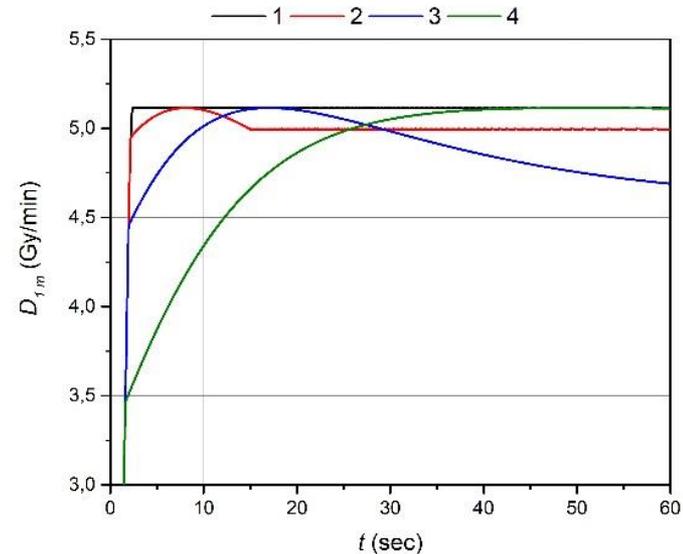
I – средний ток ускоренного пучка электронов

Система автоматической подстройки частоты синтезатора (генератора)



Зависимость мощности дозы от времени.
Частота синтезатора: 1 – 2856,9 МГц, 2 – 2856,8 МГц, 3 – 2856,85 МГц

$f_{start} = 2857,0$ МГц, $f_{final} = 2856,8$ МГц и
тепловая постоянная структуры $\tau = 20$ сек



Стабилизация во времени мощности дозы в зависимости от значения окна АПЧГ. 1 – 1 мВ, 2 – 100 мВ, 3 – 200 мВ, 4 – 300 мВ.

$f_{g0} = 2856,6$ МГц

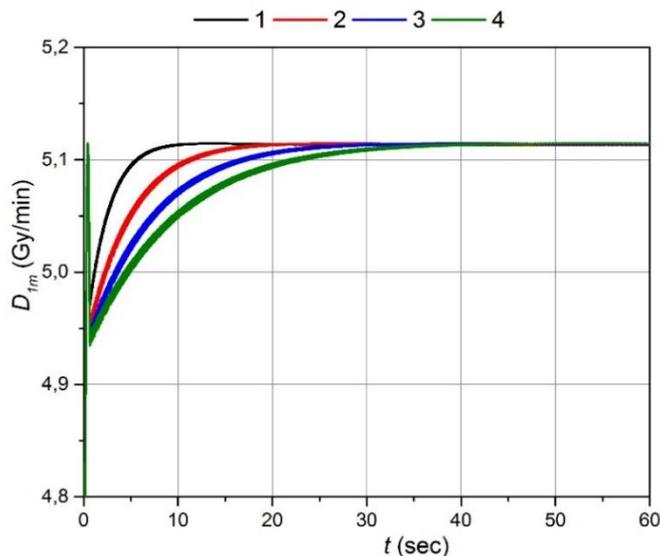
Система автоматической подстройки частоты синтезатора (генератора)

Качественное описание изменения сдвига фазы циркулятора за счет разогрева при поступлении СВЧ мощности:

$$\Delta\varphi_h = \varphi_0 \cdot e^{-\frac{t}{t_h}}$$

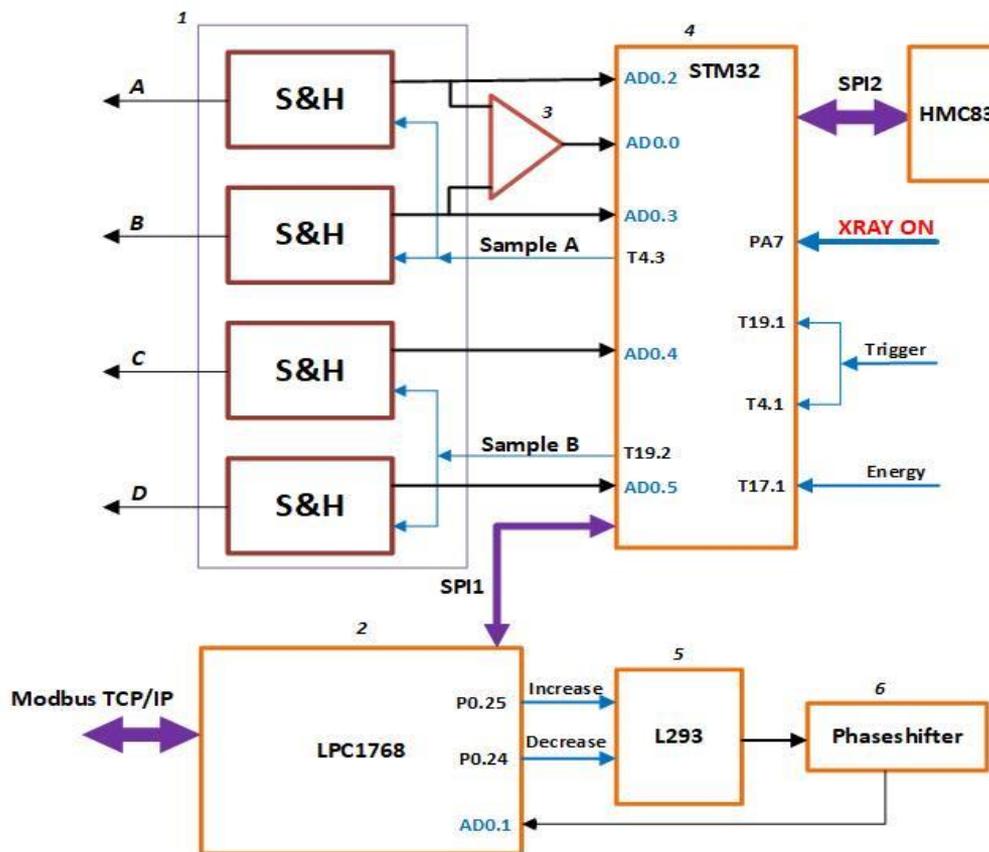
$$U_m(t_i) = k\sqrt{P_{kl}P_c(t_i)} \sin\left(\Delta\varphi(t_i) + \varphi_0 \cdot e^{-\frac{t_i}{t_h}}\right)$$

φ_0 – относительный сдвиг фазы «холодного» циркулятора, t_h - постоянная времени теплового процесса

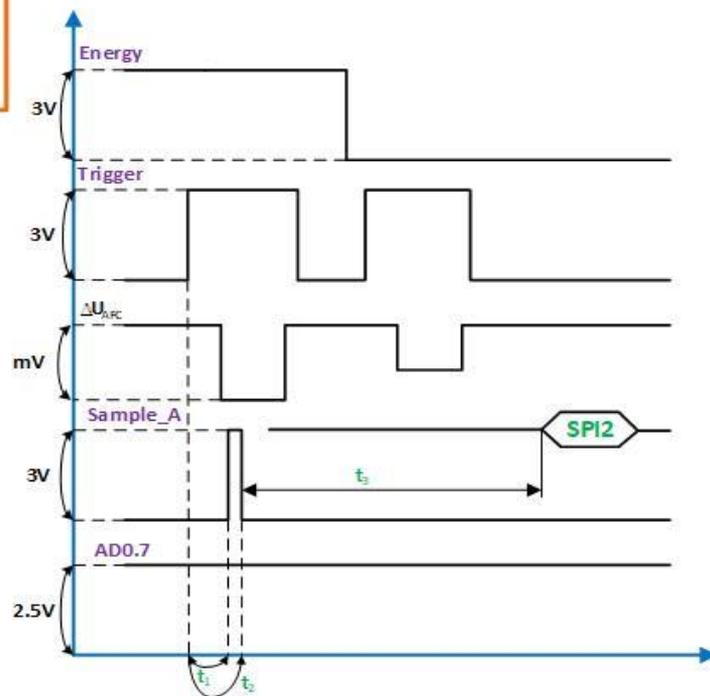


Зависимость мощности дозы от времени. t_h :
1 – 5 сек, 2 – 10 сек, 3 – 15 сек, 4 – 20 сек.

Система автоматической подстройки частоты синтезатора (генератора)

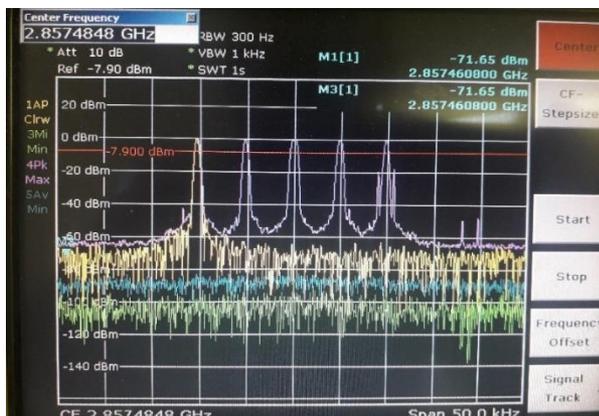


Структурная схема контроллера АПЧГ. 1 – 4-х канальная схема выборки-хранения, 2 – плата связи, 3 – схема вычитания, 4 – модуль микроконтроллера STM32, 5 – модуль управления электродвигателем фазовращателя, 6 – фазовращатель, 7 – синтезатор HMC833.

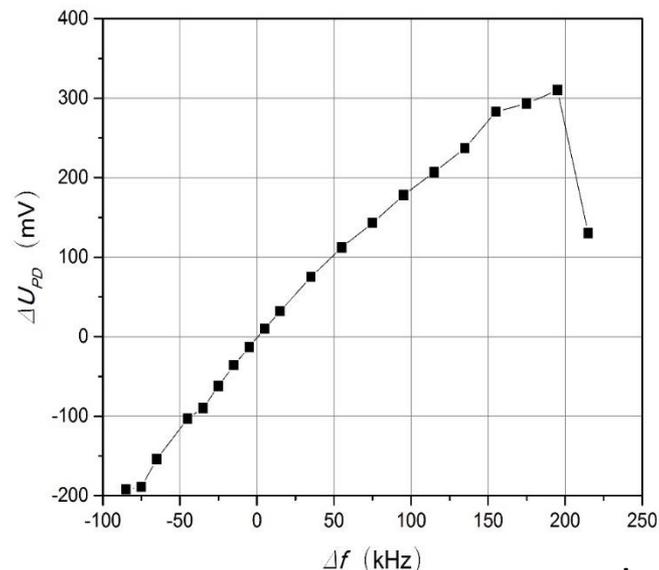


Временная диаграмма основных сигналов контроллера АПЧГ

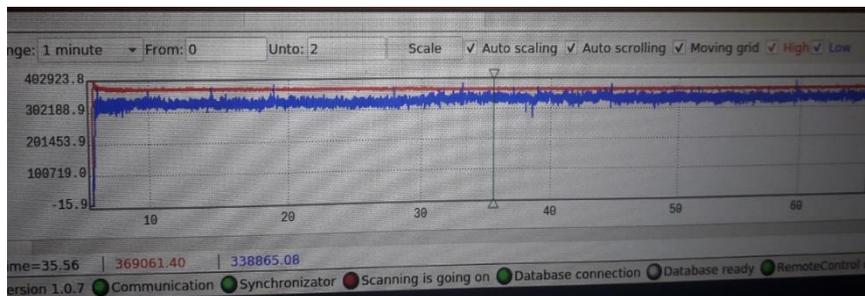
Система автоматической подстройки частоты синтезатора (генератора)



Спектр выходного сигнала синтезатора в режиме быстрого переключения

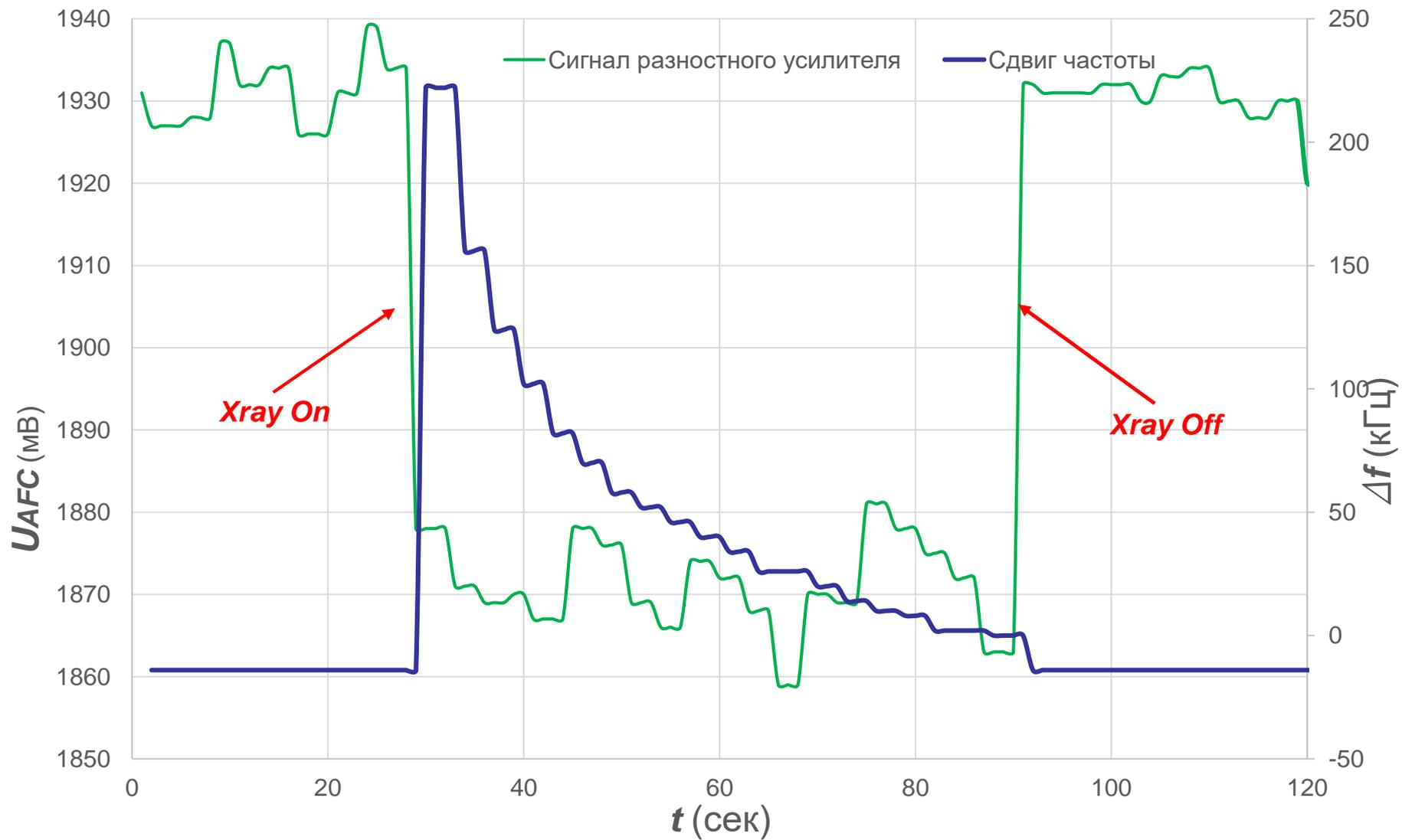


Зависимость сигнала на выходе фазового детектора от разницы частоты синтезатора и резонансной частоты горячей структуры

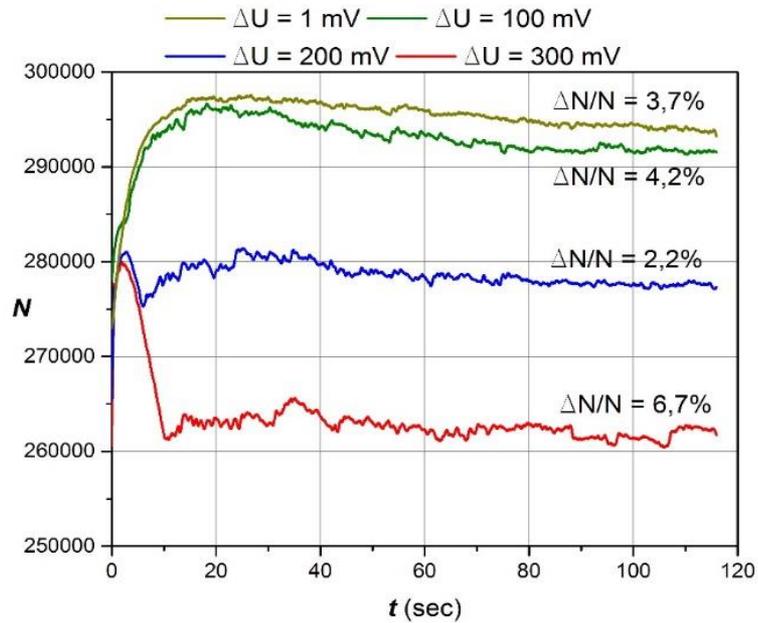


Временная зависимость отсчетов детекторной линейки СИДК при включенной АПЧГ в процессе сканирования объекта

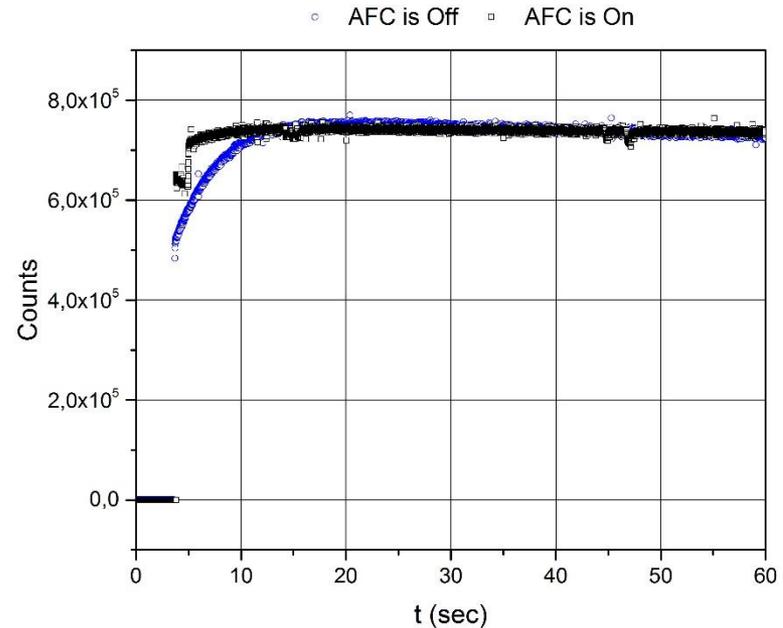
Система автоматической подстройки частоты синтезатора (генератора)



Система автоматической подстройки частоты синтезатора (генератора)

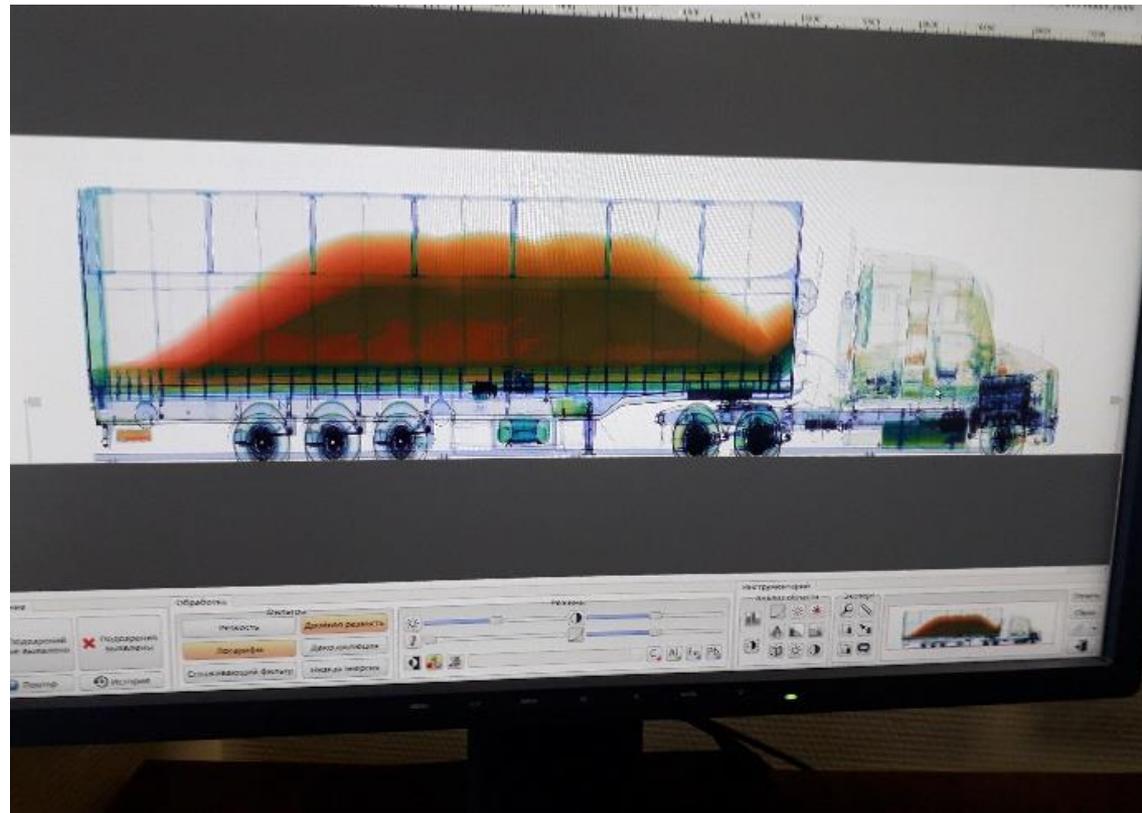


Временная зависимость отсчетов детекторной линейки при различных значениях окна АПЧГ



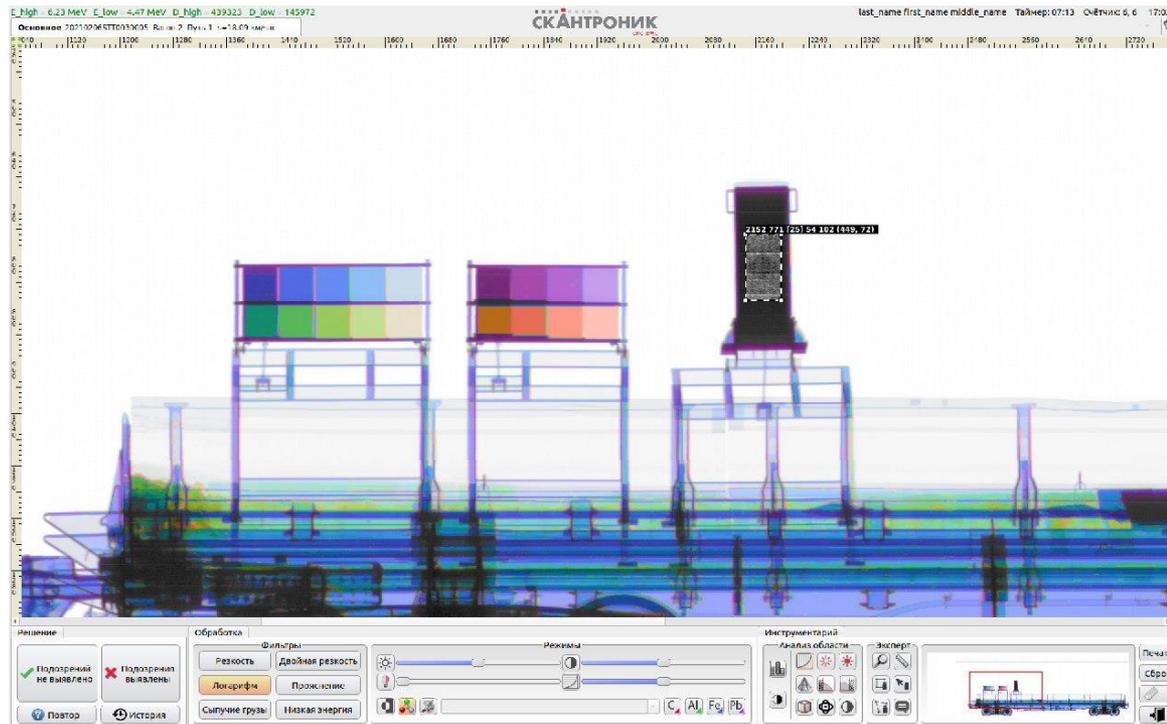
Временная зависимость отсчетов детекторной линейки СИДК при включенной/выключенной АПЧГ

Основные результаты



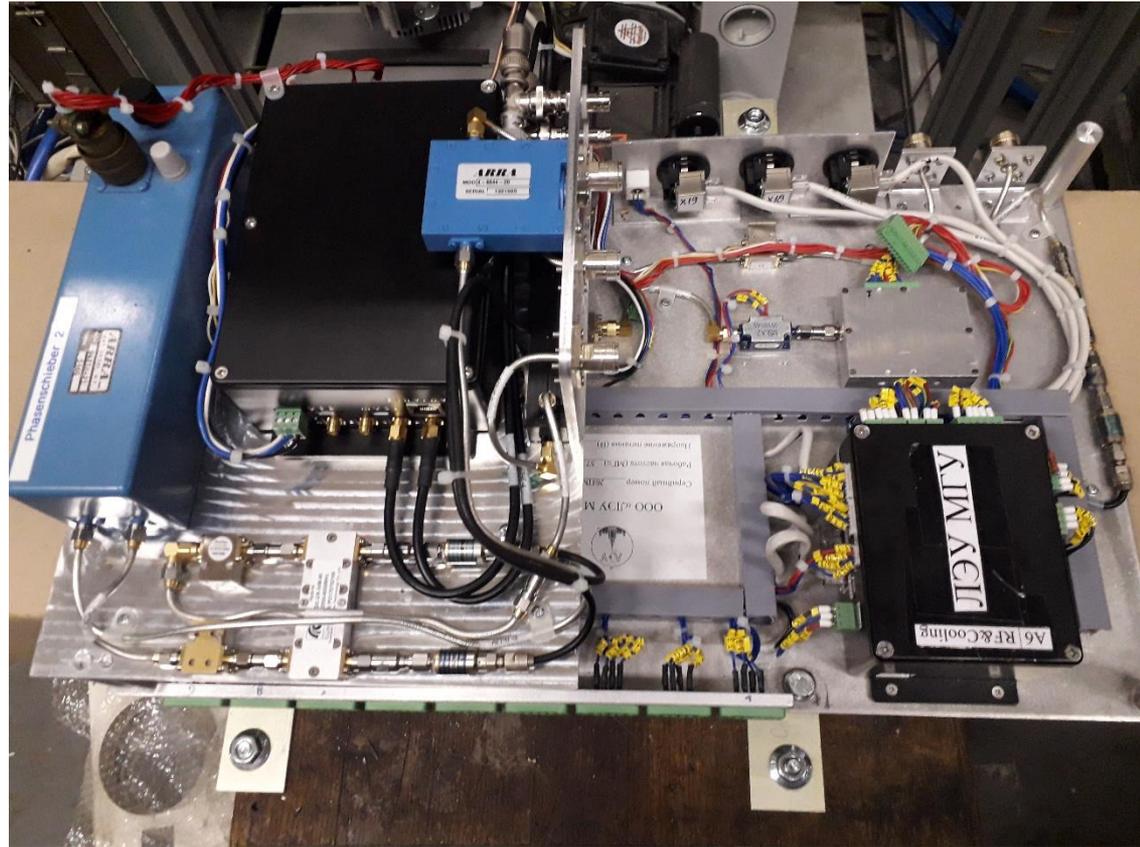
Изображение сканируемого объекта на СИДК с включенной системой АПЧГ

Основные результаты



Изображение станда калиброванных объектов на ЖИДК с включенной системой АПЧГ

Основные результаты



Система СВЧ питания низкого уровня мощности для медицинского ускорителя КЛТ-6

Спасибо за внимание!