

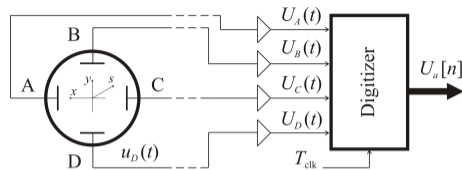
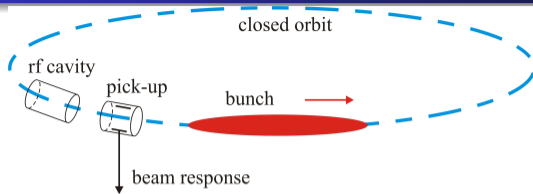
# Мониторинг амплитудных спектров бетатронных колебаний в бустерном синхротроне ОИЯИ

В.М. Жабицкий

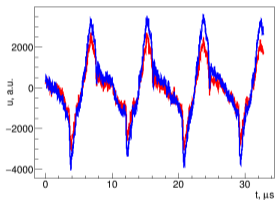
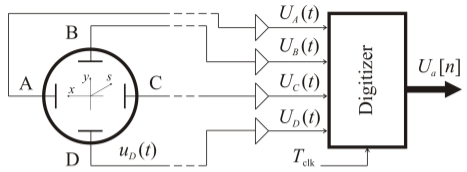
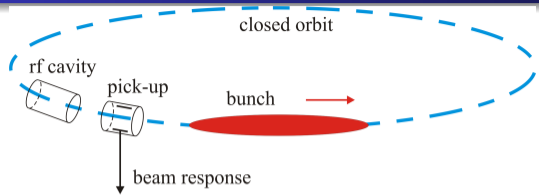
семинар Ускорительного Отделения  
Лаборатория физики высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М. Балдина  
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

27.03.2024

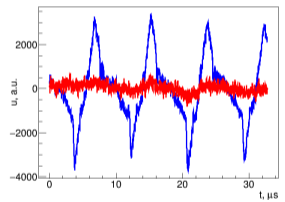
# Объект исследования: сгусток после инжекции ( $V_{rf} = 0$ )



# Объект исследования: сгусток после инжекции ( $V_{rf} = 0$ )

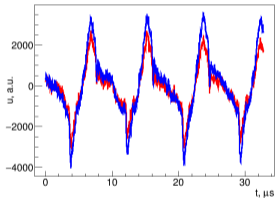
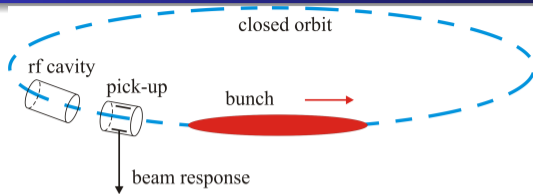


A C

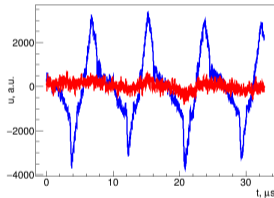


D D-B

# Объект исследования: сгусток после инжекции ( $V_{rf} = 0$ )

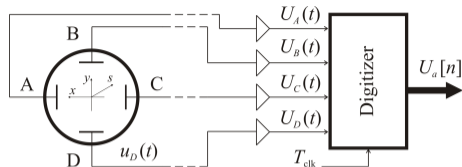


A



D

D-B



$$\omega_{bet} T_{rev} = 2\pi Q_{bet} \Rightarrow \text{beam stability}$$

$$u_a(t) \rightarrow U_a(t)$$

$$U_a[n] \triangleq U_a(t_n), \quad t_n = n \cdot T_{clk}$$

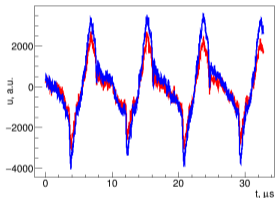
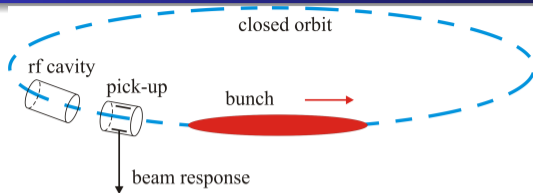
$$\Rightarrow T_{clk} \ll T_{rev}$$

$$\Rightarrow N_{bit}: (U_a^{\max} - U_a^{\min}) / \Delta U_a < 2^{N_{bit}} - 1$$

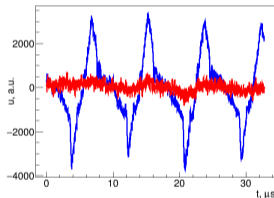
$$u_a(t) \sim q N(t) / D(t)$$

$$D(t) = \text{distance of a bunch from electrodes}$$

# Объект исследования: сгусток после инжекции ( $V_{rf} = 0$ )



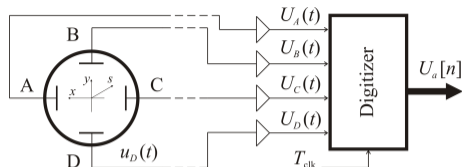
A



C

D

D-B



$$\omega_{\text{bet}} T_{\text{rev}} = 2\pi Q_{\text{bet}} \Rightarrow \text{beam stability}$$

$$u_a(t) \rightarrow U_a(t)$$

$$U_a[n] \triangleq U_a(t_n), \quad t_n = n \cdot T_{\text{clk}}$$

$$\Rightarrow T_{\text{clk}} \ll T_{\text{rev}}$$

$$\Rightarrow N_{\text{bit}}: (U_a^{\text{max}} - U_a^{\text{min}}) / \Delta U_a < 2^{N_{\text{bit}} - 1}$$

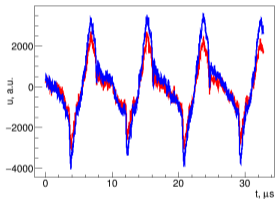
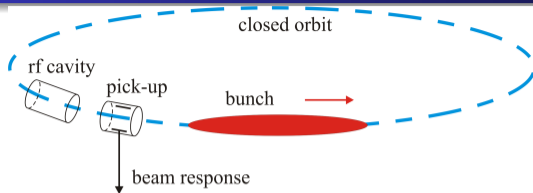
$$u_a(t) \sim q N(t) / D(t)$$

$$D(t) = \text{distance of a bunch from electrodes}$$

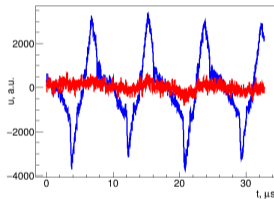
⇒ Выявление амплитудного спектра сигнала после инжекции до разгруппировки (расплывания по орбите) сгустка ионов ксенона  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  (Date: 25.01.2023)

Жабицкий В. М. Мониторинг бетатронных колебаний в бустерном синхротроне ОИЯИ  
Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т.21. №3(253). В печати.

# Объект исследования: сгусток после инжекции ( $V_{rf} = 0$ )



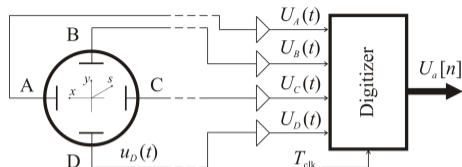
A



C

D

D-B



$$\omega_{\text{bet}} T_{\text{rev}} = 2\pi Q_{\text{bet}} \Rightarrow \text{beam stability}$$

$$u_a(t) \rightarrow U_a(t)$$

$$U_a[n] \triangleq U_a(t_n), \quad t_n = n \cdot T_{\text{clk}}$$

$$\Rightarrow T_{\text{clk}} \ll T_{\text{rev}}$$

$$\Rightarrow N_{\text{bit}} : (U_a^{\text{max}} - U_a^{\text{min}}) / \Delta U_a < 2^{N_{\text{bit}} - 1}$$

$$u_a(t) \sim q N(t) / D(t)$$

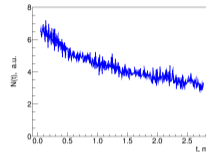
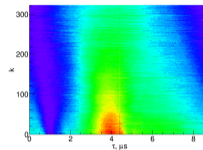
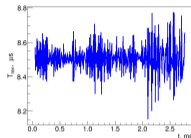
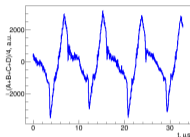
$$D(t) = \text{distance of a bunch from electrodes}$$

⇒ Выявление амплитудного спектра сигнала после инжекции до разгруппировки (расплывания по орбите) сгустка ионов ксенона  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  (Date: 25.01.2023)

Жабицкий В. М. Мониторинг бетатронных колебаний в бустерном синхротроне ОИЯИ  
Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т.21. №3(253). В печати.

# Мониторинг бетатронных колебаний

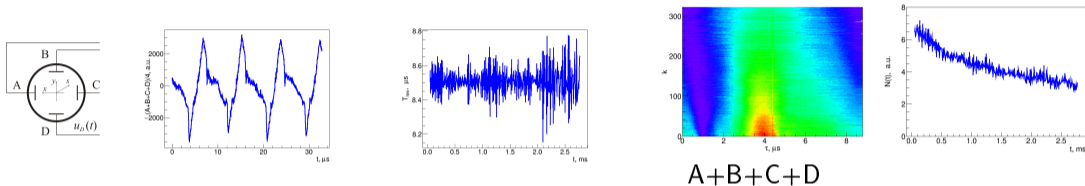
Эволюция бетатрон-продольной функции распределения ионов по длине сгустка, совершающего бетатронные колебания после инъекции:  $\dot{B} = 0$ ,  $V_{rf} = 0$ ,  $T_{clk} = 4$  ns



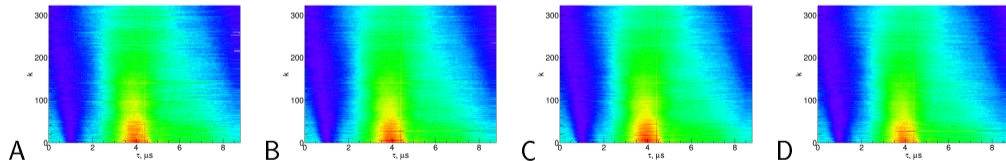
A+B+C+D

# Мониторинг бетатронных колебаний

Эволюция бетатрон-продольной функции распределения ионов по длине сгустка, совершающего бетатронные колебания после инжекции:  $\dot{B} = 0$ ,  $V_{rf} = 0$ ,  $T_{clk} = 4$  ns



Эволюция сигналов сгустков по оборотам

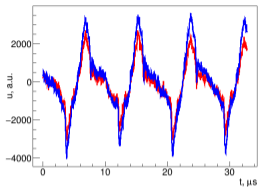


$$u_a(t) \sim U_a(t) = U_a(t = \tau + kT_{rev}), \quad \tau \in [0, \dots, T_{rev}), \quad t + T_{rev} = \tau + (k + 1)T_{rev}$$

$$u_a(t_n = nT_{clk}) = U_a(t_n) \triangleq U_a[n] = U_a[i, k], \quad i \in [0, \dots, i_r), \quad i_r = \text{round}(T_{rev}/T_{clk})$$

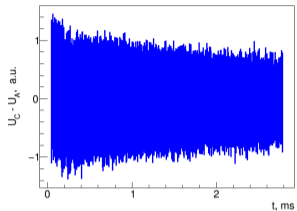


# Колебания в горизонтальной плоскости

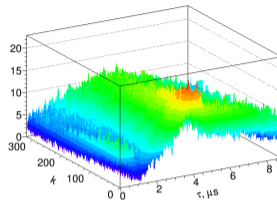


A

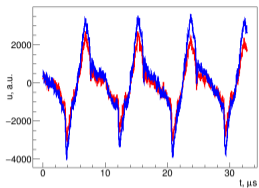
C



C-A

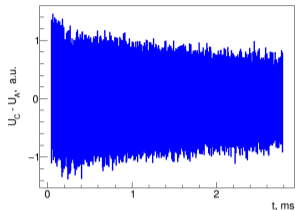


# Колебания в горизонтальной плоскости

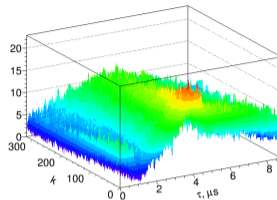


A

C



C-A



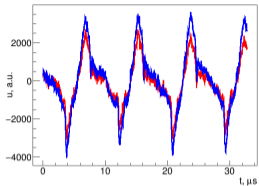
Учет правил  
полярности  
разностных  
сигналов:

$$\Delta U_- = U_C - U_A$$

$$-x = z$$

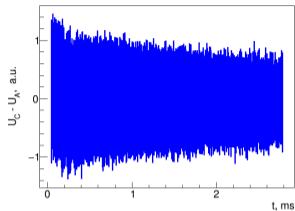
$$-\Delta x = \Delta z > 0$$

# Колебания в горизонтальной плоскости

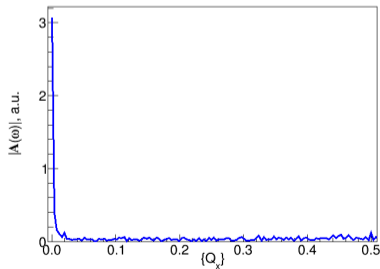
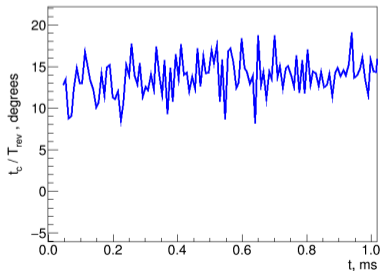
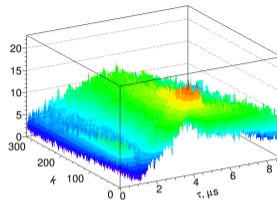


A

C

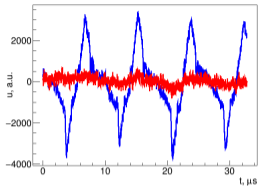


C-A



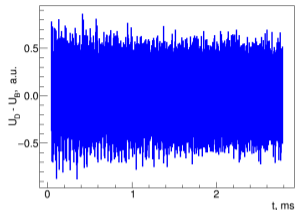
Учет правил  
полярности  
разностных  
сигналов:  
 $\Delta U_- = U_C - U_A$   
 $-x = z$   
 $-\Delta x = \Delta z > 0$

# Колебания в вертикальной плоскости

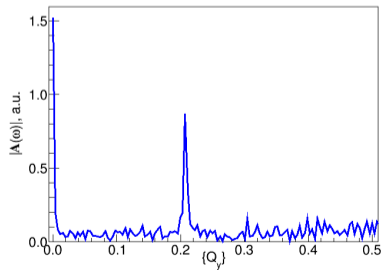
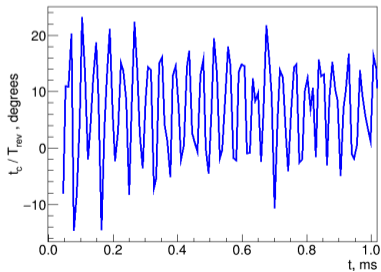


D

D-B



D-B



Учет правил  
полярности  
разностных  
сигналов:  
 $\Delta U_- = U_D - U_B$   
 $-y = z$   
 $-\Delta y = \Delta z > 0$

$$u_{<}(t) = \frac{S_z q N(t)}{D_z + z(t) + \Delta z} + \Delta u_{<}(t); \quad u_{>}(t) = \frac{S_z q N(t)}{D_z - z(t) - \Delta z} + \Delta u_{>}(t),$$

$D_z$  – апертура датчика,  $S_z$  – чувствительность датчика к смещениям ионов с зарядом  $q$

$$u_a(t_n) \iff u_a[i, k], \quad i \in [i_l = 0, \dots, i_r = T_{\text{rf}}/T_{\text{clk}}), \quad i + k + i_r = i + k + 1,$$

$$u_{<}[i, k] = \frac{q S_z N[i, k]}{D_z + z[i, k] + \Delta z} + \Delta u_{<}[i, k]; \quad u_{>}[i, k] = \frac{q S_z N[i, k]}{D_z - z[i, k] - \Delta z} + \Delta u_{>}[i, k].$$

$$u_{<}(t) = \frac{S_z q N(t)}{D_z + z(t) + \Delta z} + \Delta u_{<}(t); \quad u_{>}(t) = \frac{S_z q N(t)}{D_z - z(t) - \Delta z} + \Delta u_{>}(t),$$

$D_z$  – апертура датчика,  $S_z$  – чувствительность датчика к смещениям ионов с зарядом  $q$

$$u_a(t_n) \iff u_a[i, k], \quad i \in [i_l = 0, \dots, i_r = T_{\text{rf}}/T_{\text{clk}}), \quad i + k + i_r = i + k + 1,$$

$$u_{<}[i, k] = \frac{q S_z N[i, k]}{D_z + z[i, k] + \Delta z} + \Delta u_{<}[i, k]; \quad u_{>}[i, k] = \frac{q S_z N[i, k]}{D_z - z[i, k] - \Delta z} + \Delta u_{>}[i, k].$$

Изучаемый разностный сигнал

$$U_{-}[i, k] = w U_{>}[i, k] - U_{<}[i, k] = w u_{>}[i, k] - u_{<}[i, k] + w \Delta U_{>}[i, k] - \Delta U_{<}[i, k].$$

$$U_{-}[i, k] = \left( (1 - w) - (1 + w) \frac{z[i, k] + \Delta z}{D_z} \right) \frac{q S_z N[i, k]}{D_z} + \Delta U_{-}[i, k]$$

$w$  – коэффициент согласования (ослабления амплитуды) сигнала с электрода  $U_{>}$  в отношении сигнала с электрода  $U_{<}$ .

$$U_{-}[i, k] = w U_{>}[i, k] - U_{<}[i, k] = \left( (1 - w) - (1 + w) \frac{z[i, k] + \Delta z}{D_z} \right) \frac{q S_z N[i, k]}{D_z} + \Delta U_{=}[i, k]$$

If

$$w_{\text{bet}} = \frac{1 - \Delta z / D_z}{1 + \Delta z / D_z}$$

then

$$U_{-}^{\text{bet}}[i, k] = \frac{z[i, k] N[i, k]}{D_z} \frac{2q S_z}{(1 + \Delta z / D_z) D_z} + \Delta U_{=}[i, k].$$

$$U_{-}[i, k] = w U_{>}[i, k] - U_{<}[i, k] = \left( (1 - w) - (1 + w) \frac{z[i, k] + \Delta z}{D_z} \right) \frac{q S_z N[i, k]}{D_z} + \Delta U_{=}[i, k]$$

If

$$w_{\text{bet}} = \frac{1 - \Delta z / D_z}{1 + \Delta z / D_z}$$

then

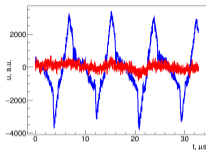
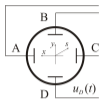
$$U_{-}^{\text{bet}}[i, k] = \frac{z[i, k] N[i, k]}{D_z} \frac{2q S_z}{(1 + \Delta z / D_z) D_z} + \Delta U_{=}[i, k].$$

$$\begin{aligned} \mathbb{M}_1(U_{-}^{\text{bet}}[k]) &= \frac{\mathbb{M}_1(z[k] N[k])}{D_z} \frac{\langle z[i, k] N[i, k] \rangle}{\langle U_{-}^{\text{bet}}[i, k] \rangle} \frac{2q S_z}{(1 + \Delta z / D_z) D_z} + \\ &+ \frac{\langle (i - 0.5i_r) \cdot \Delta U_{=}[i, k] \rangle \cdot T_{\text{clk}} / T_{\text{rev}}}{\langle U_{-}^{\text{bet}}[i, k] \rangle}. \end{aligned}$$



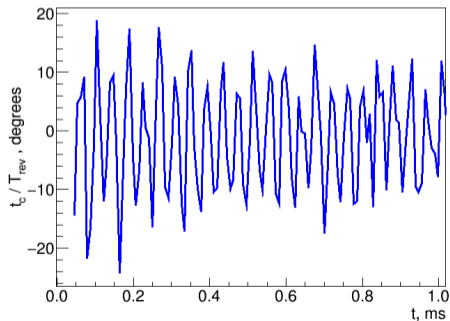
- Приведенные выражения для  $U_-[i, k]$  совпадают, если  $w = 1$  и  $\Delta z = 0$ .
- Выявить бетатронные колебания тем проще, чем меньше  $\Delta z$ .
- При тщательно налаженном режиме циркуляции сгустков, когда  $\Delta z \rightarrow 0$ , также легче наблюдать возбужденные бетатронные колебания.
- Чем больше апертура датчика  $2D_z$ , тем точнее приведенные оценки в разложениях по малому параметру  $|z + \Delta z|/D_z$ .

# Вертикальные колебания после инъекции



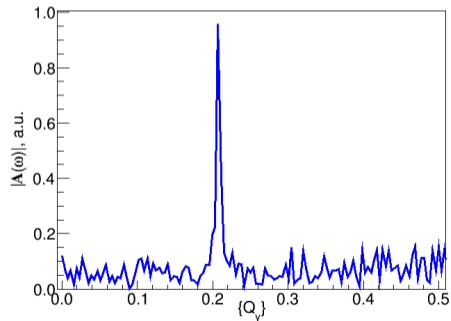
D

D-B

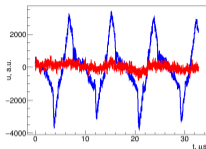
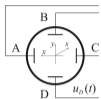


wD-B

w = 0.9



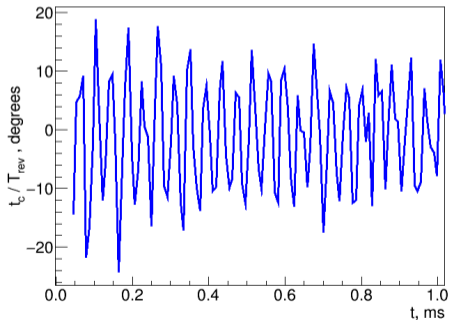
# Вертикальные колебания после инъекции



D

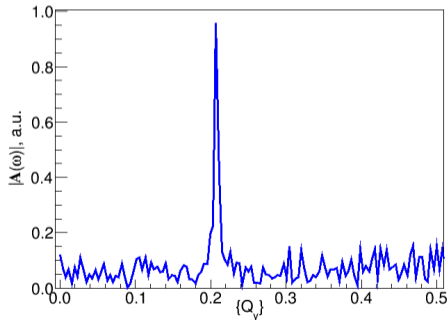
D-B

$$\frac{\Delta y}{D_y} = -\frac{1-w}{1+w} \approx -0.05$$

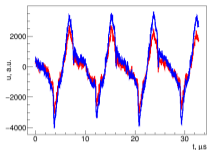
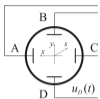


wD-B

w = 0.9

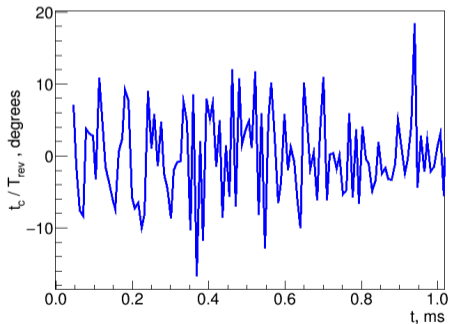


# Горизонтальные колебания после инжекции



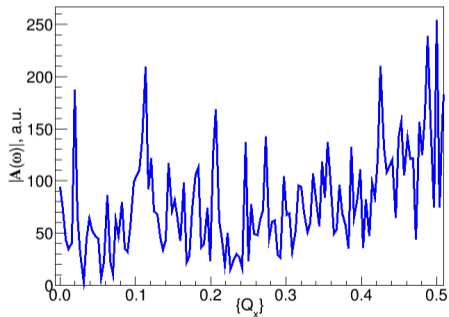
A

C

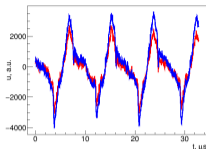
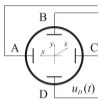


wC-A

w = 0.72



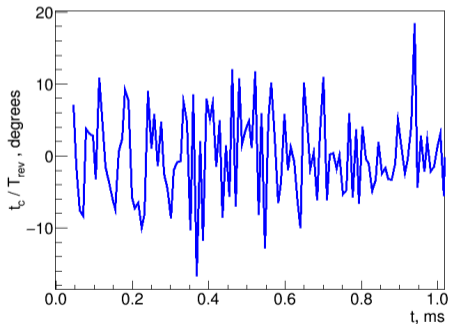
# Горизонтальные колебания после инжекции



A

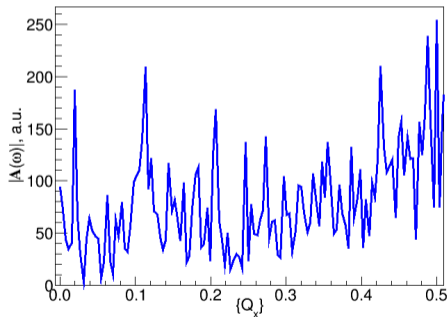
C

$$\frac{\Delta x}{D_x} = -\frac{1-w}{1+w} \approx -0.16$$



wC-A

w = 0.72



- Графики сигналов для мгновенных положений центра тяжести сгустков сохраняют особенности зависимостей по времени (изменения наклона траектории).
- Для выявленных  $w_{bet}$  равенство нулю постоянной составляющей в амплитудном спектре подтверждается нулевой величиной усредненного значения мгновенных положений центра тяжести сгустка за интервал наблюдения 1 ms.

*Здравствуйте Владислав Павлович!*

*Простите, что так долго не мог ответить на Ваше письмо, но я еще и сейчас очень слаб, и мне трудно говорить и писать о вещах, которые меня сильно волнуют.*

*Я не сомневаюсь, что Вы прекрасно руководите работой, и именно поэтому думаю, что, видимо, Вы встречаетесь на том самом первом этапе, который Вы стремитесь осуществить, со все новыми и новыми трудностями. Я хотел бы Вам посоветовать не добиваться с самого начала крутого фронта [импульса тока для формирования быстрого изменения магнитного поля для захвата частиц]. .... Советую главное — осуществить режим захвата, даже и не при крутом фронте. Конечно, будет захвачено мало частиц. Ну и Бог с ними. Зато Вы сможете отработать режим захвата в таких условиях, когда токовые трудности будут отсутствовать. Тем самым Вы будете иметь как бы некоторую контрольную точку [по величине показателя спада магнитного поля  $n$ ].... Если Вы сможете осуществить захват малых токов [в соответствии с проектным замыслом по  $n$ ], тогда, вероятно, Вам будет легче двигаться дальше. Однако я так оторван от этой работы, что, может быть, все, что я здесь написал, не имеет никакого отношения к делу. Тогда считайте все здесь написанное результатом моей болезни и тем, что я не понял ... часть Вашего письма.*

- Разработан метод реконструкции амплитудного спектра бетатронных колебаний ионного сгустка при наличии смещения датчика относительно исходного положения, выявленного при калибровке.
- Приведены оценки для смещения орбиты при подавлении постоянной составляющей в амплитудном спектре.
- Полученные результаты использованы для реконструкции амплитудного спектра бетатронных колебаний ионного сгустка после инжекции ионов ксенона в бустерный синхротрон ОИЯИ.

Автор благодарен Горбачеву Е.В. (ОИЯИ) за предоставленные экспериментальные данные и также Шабунину А.В. (Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского) за обсуждения.