

Электронно-оптический канал К500

Параметры Накопителя-охладителя (НО слева) и ВЭПП-3(справа), E = 398 МэВ

Периметр	2743.05	см
Ток пучка максимальный	35.5	мА
Число частиц	2×10^{10}	
Частота обращения	10.9258	МГц
Гармоника ВЧ	63	
Частота ВЧ	699.25	МГц
Напряжение	78	кВ
Потери на оборот	2.2	кВ
Кэфф. пространственного уплотнения орбит	0.027	
Ширина сепаратрисы	0.85	%
Синхротронная частота	0.0073	
Времена радиационного затухания z,x,s	32,21,23	мсек
Энергетический разброс	0.04	%
Эмиттанс пучка: $\varepsilon_x, \varepsilon_z$	14, 5	нм
Продольный размер (с учётом Тушека)	0.65 (0.8)	см

Периметр	7440	см
Ток пучка максимальный	200	мА
Число частиц	3.1×10^{11}	
Частота обращения	4.03	МГц
Гармоника ВЧ	2	
Частота ВЧ (Базальт 50)	8.06	МГц
Напряжение ВЧ1 U_{max}	15	кВ
Потери на оборот	0.36	кВ
Кэфф. пространственного уплотнения орбит α	0.075	
Ширина сепаратрисы	1	%
Синхротронная частота ν_s	0.00084	
Времена радиационного затухания τ_z, τ_x, τ_s	550 , 557, 275	мсек
Энергетический разброс	0.014	%
Эмиттанс пучка: $\varepsilon_x, \varepsilon_z$	11, 1.2	нм
Продольный размер σ_s	16	см

После постановки нового ВЧ
длина сгустка будет $\sigma_s \approx 15$ см

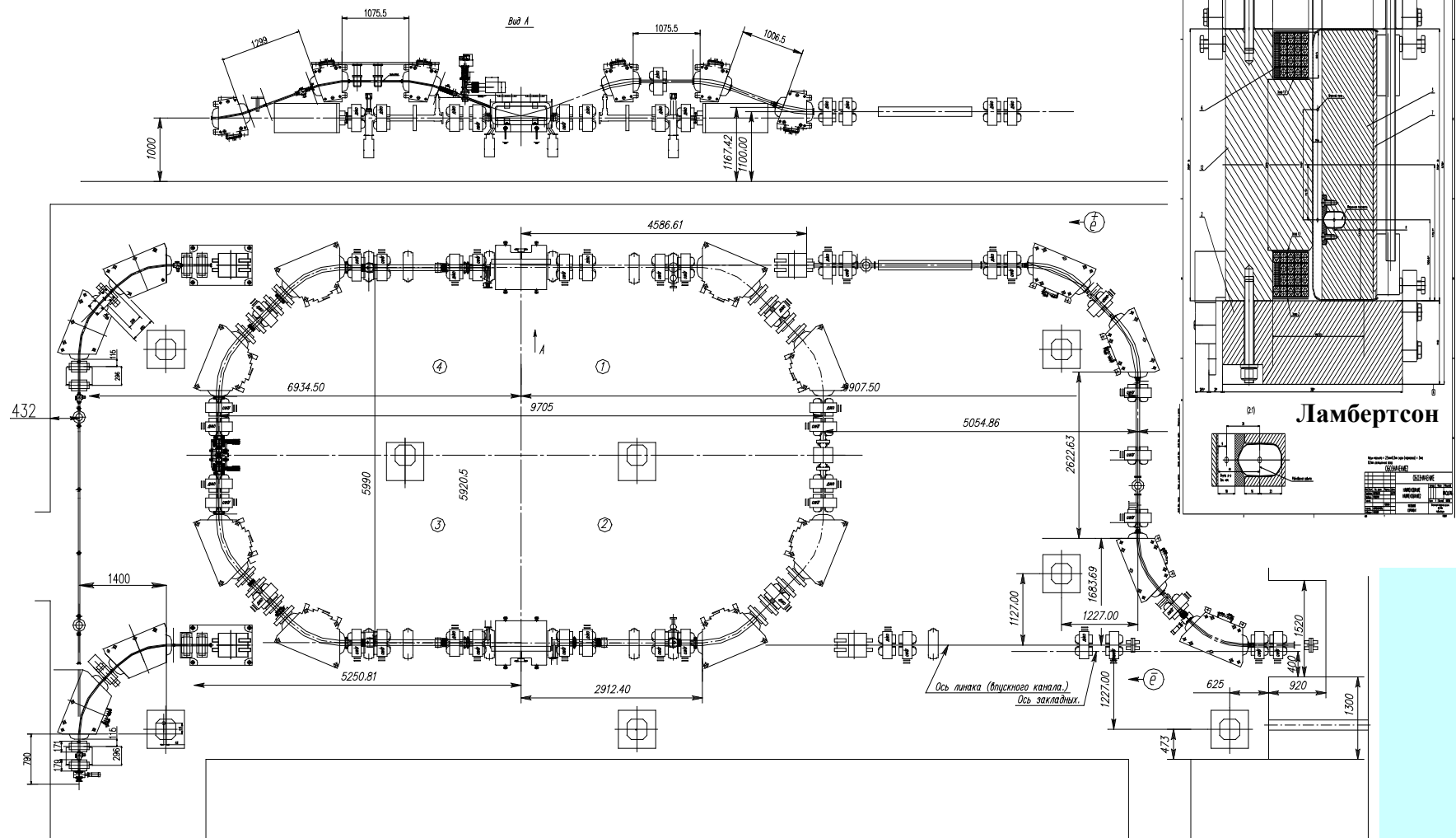
$$\text{Отношение частот обращения: } F_{\text{ВЭПП-3}}/F_{\text{но}} = 0.37$$

$$I_{\text{ВЭПП-3}} = I_{\text{НО}} * 0.37$$

Октябрь 2016

Киселев В.А.

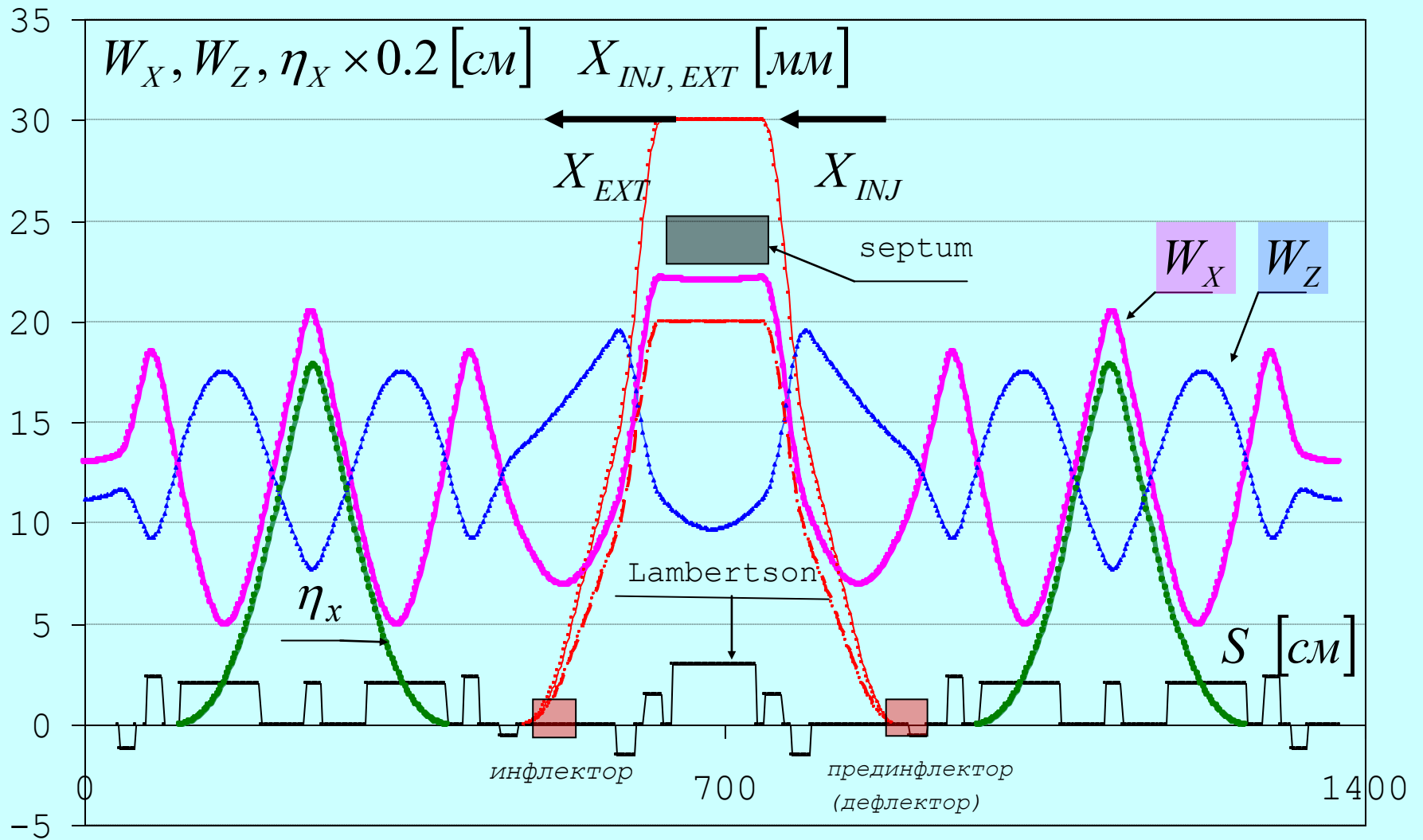
Накопитель-охладитель



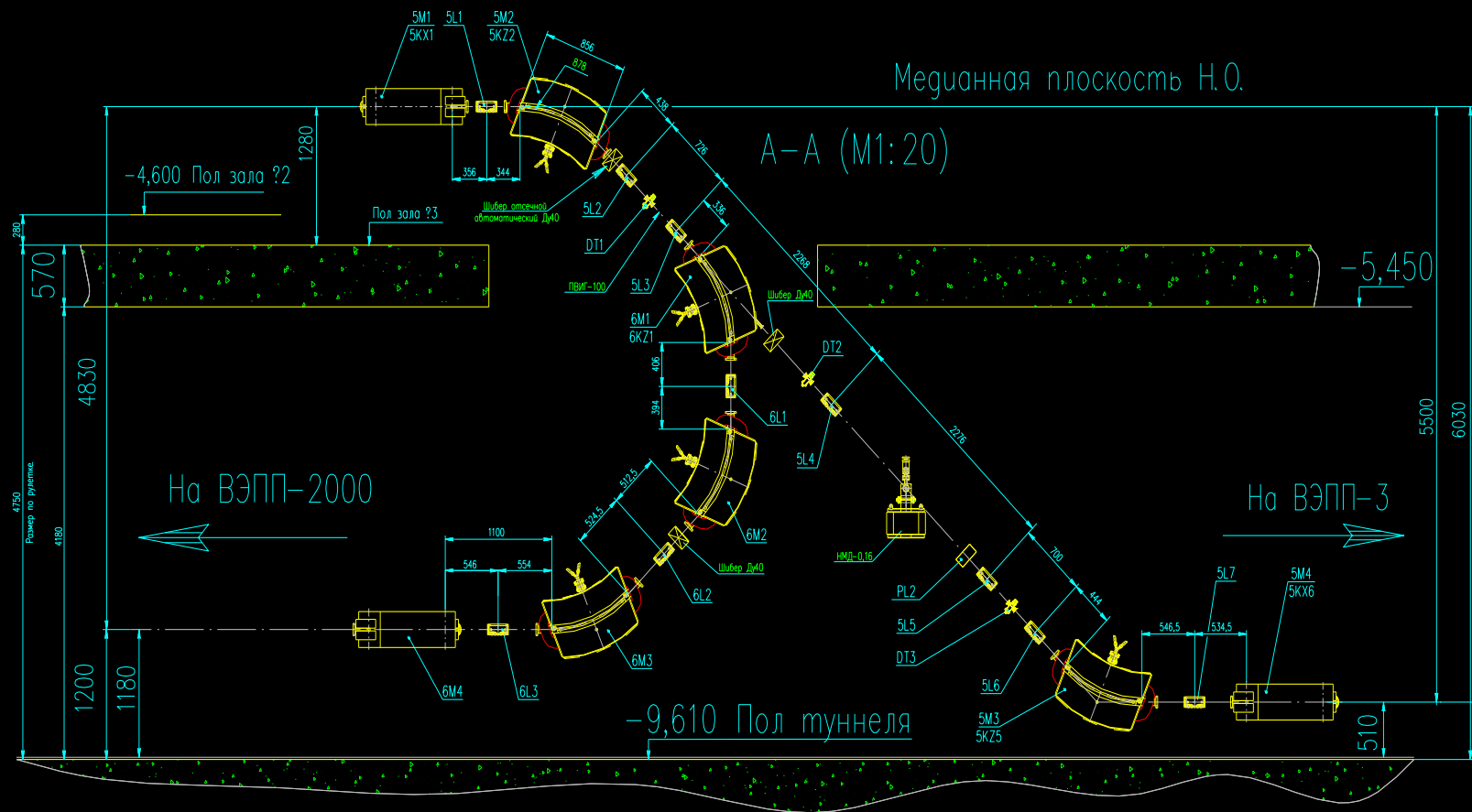
Октябрь 2016

Киселев В.А.

НО (впуск-выпуск)



Участок спуска в тоннель



Электронная часть канала К500 (выпуск + участок спуска)

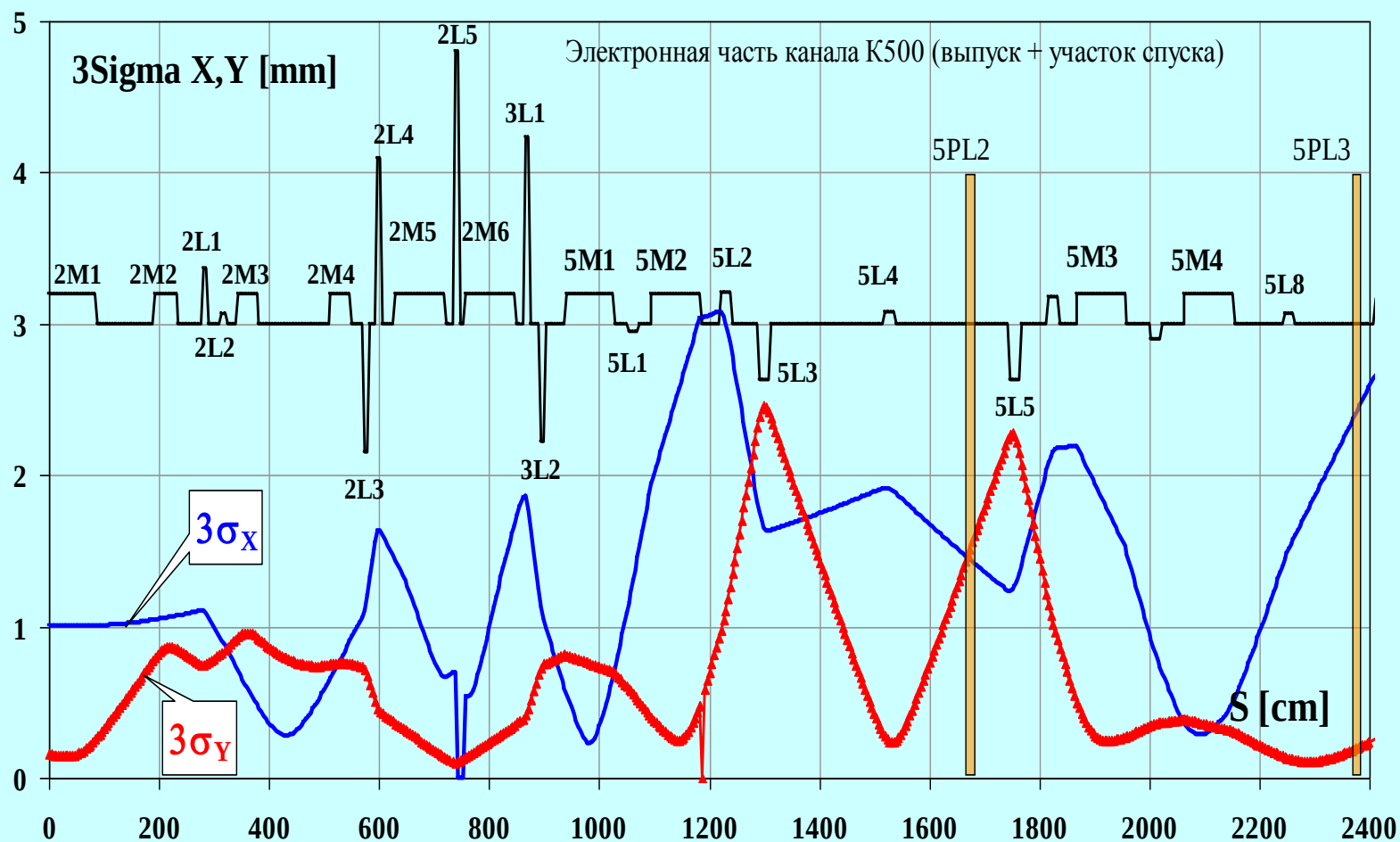


Рис. 4. Размер пучка

Электронная часть канала K500 (выпуск + участок спуска)

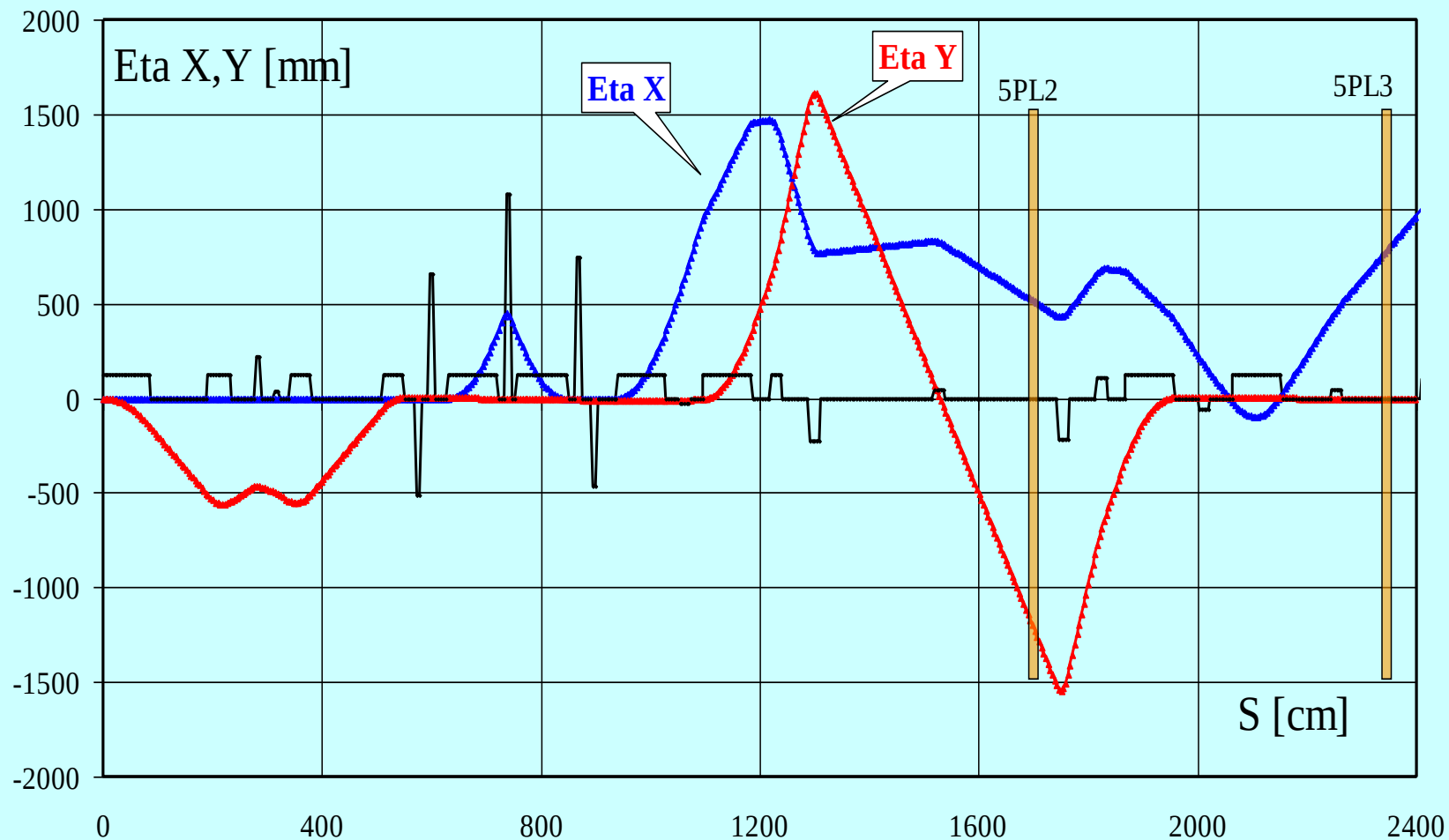


Рис. 5. Дисперсионная функция

Электронная часть канала K500 (выпуск + участок спуска)

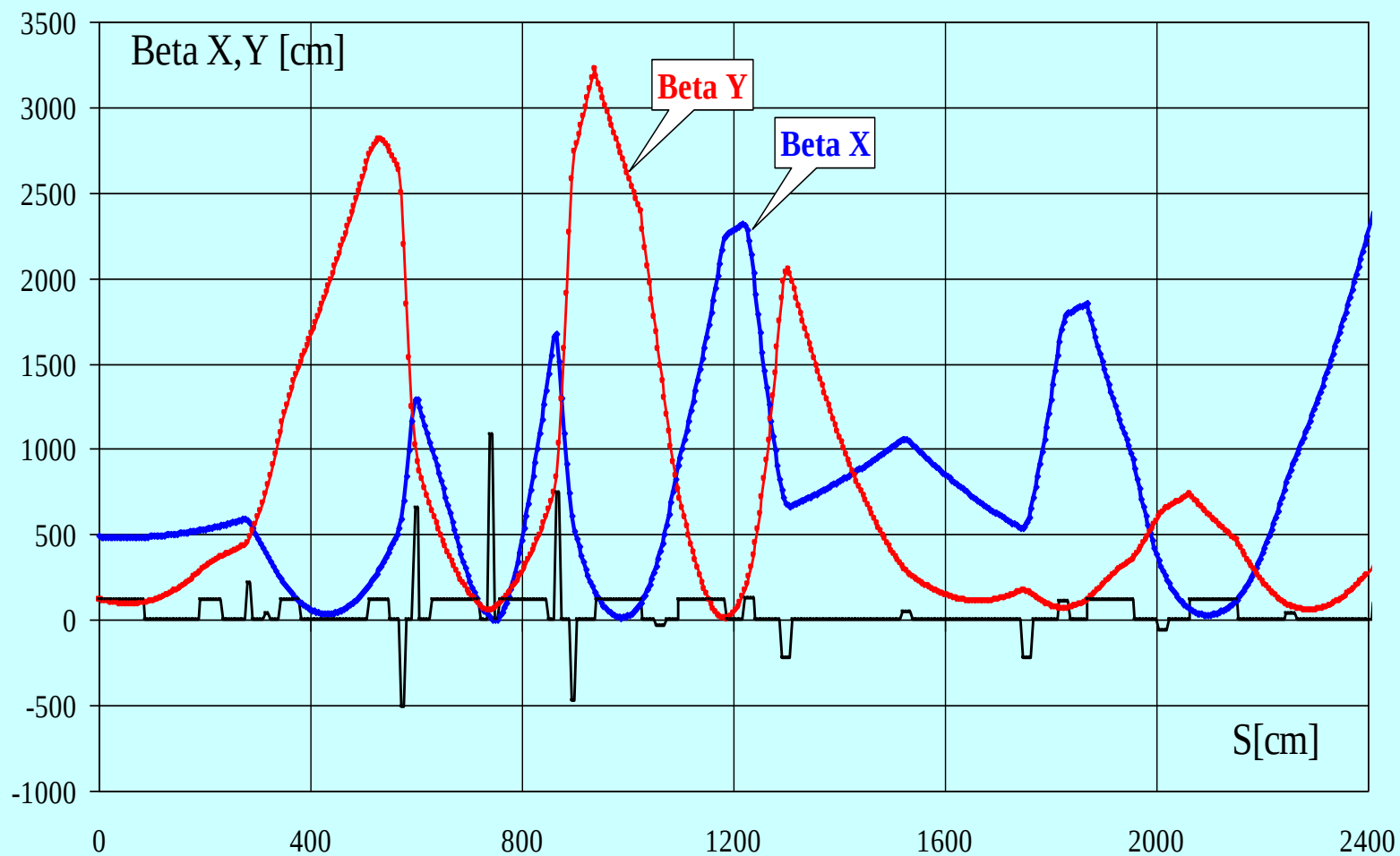
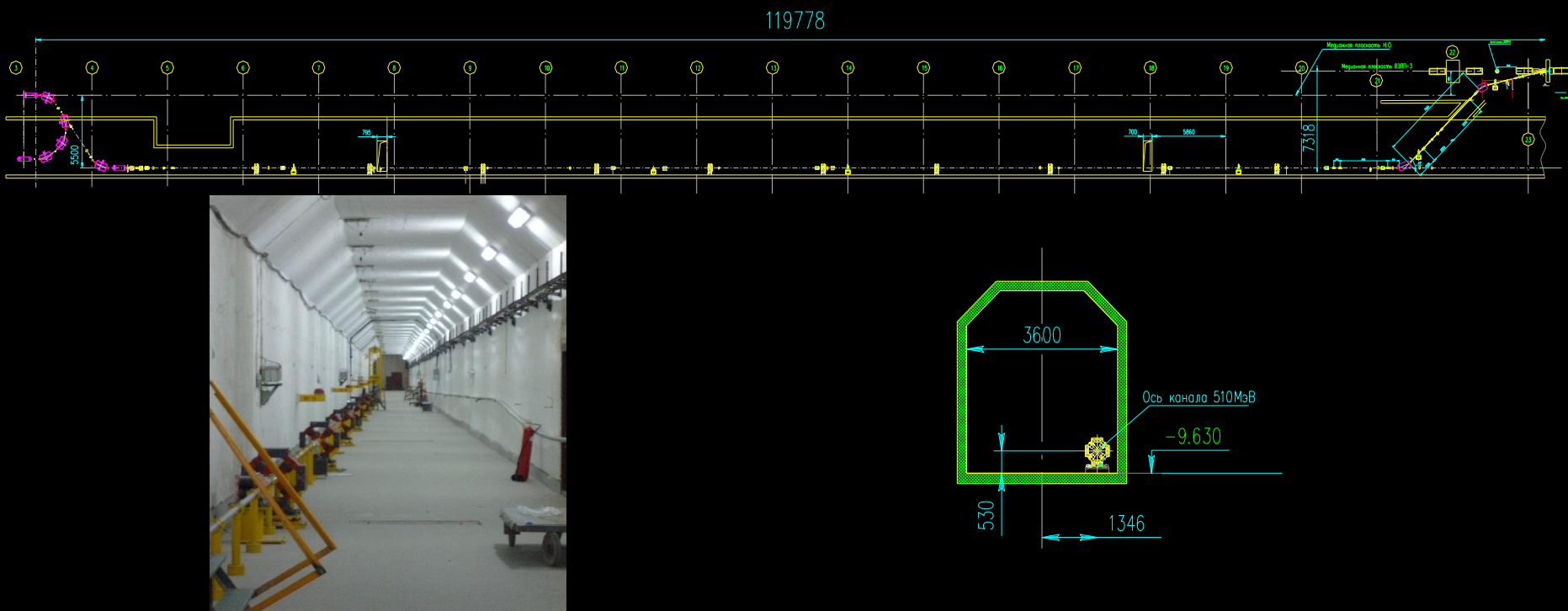


Рис. 6. Амплитудные функции

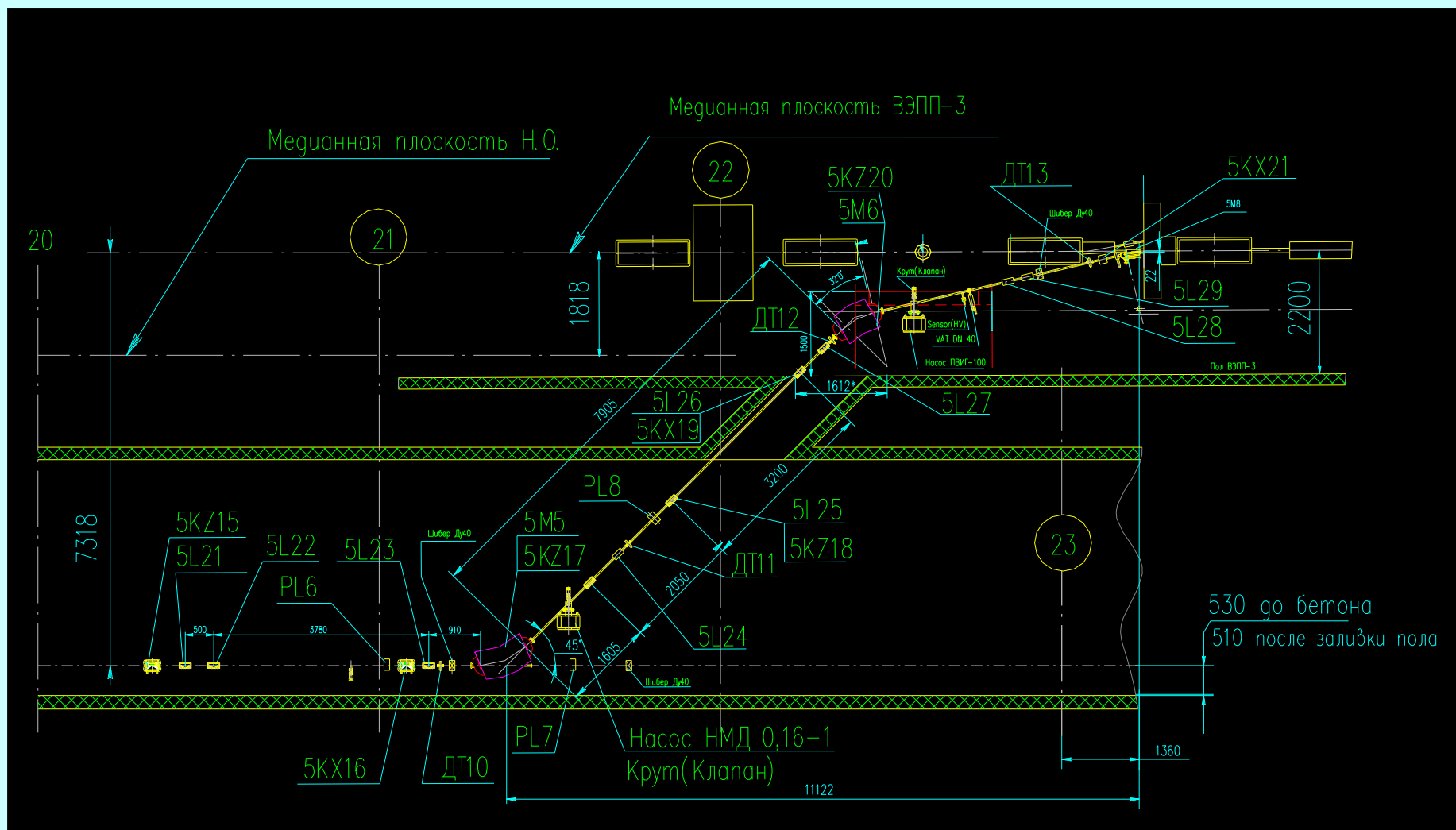
Прямолинейный участок



Октябрь 2016

Киселев В.А.

Участок подъема к ВЭПП-3



Амплитудные функции

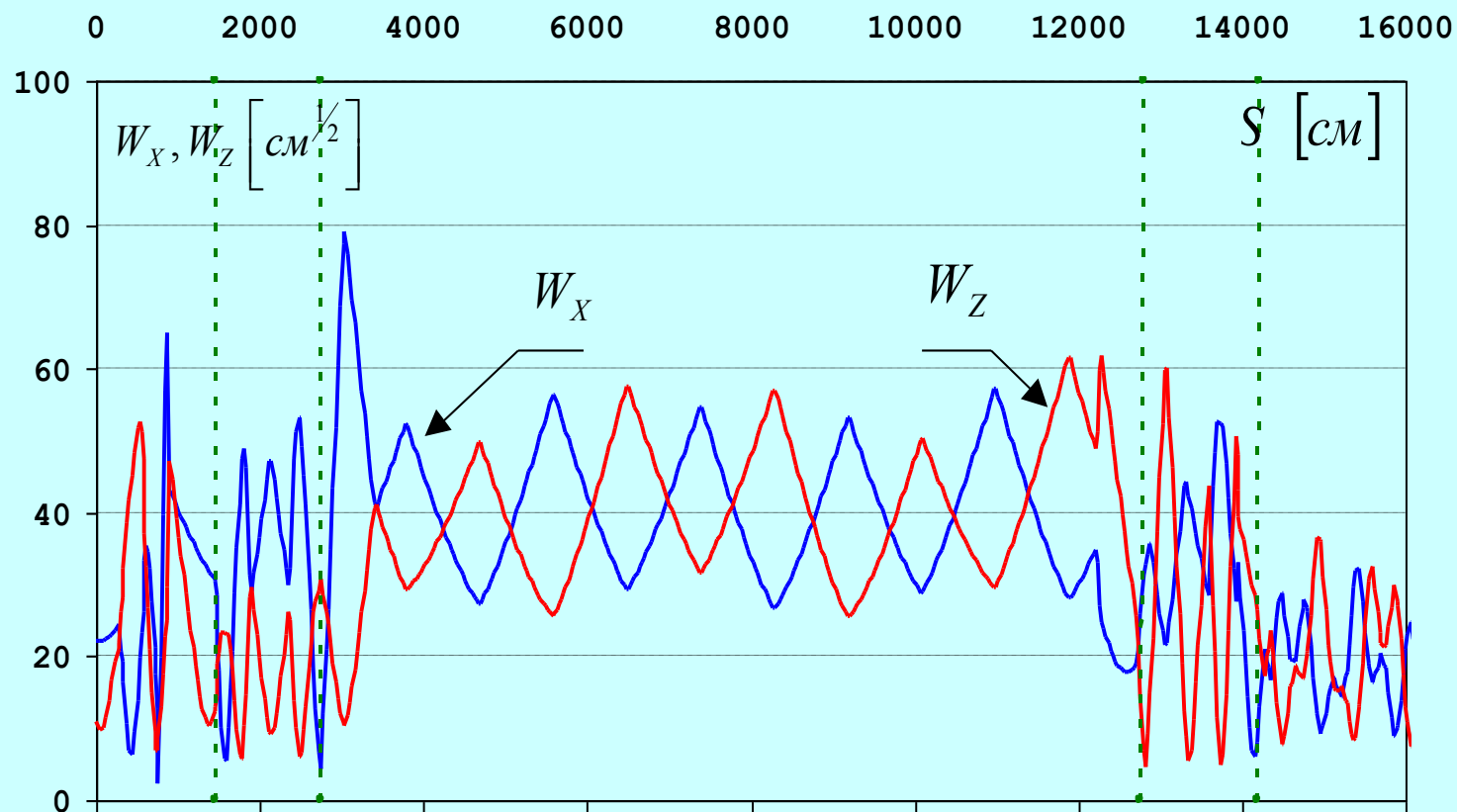


Рис.9. Амплитудные функции

Дисперсионные функции

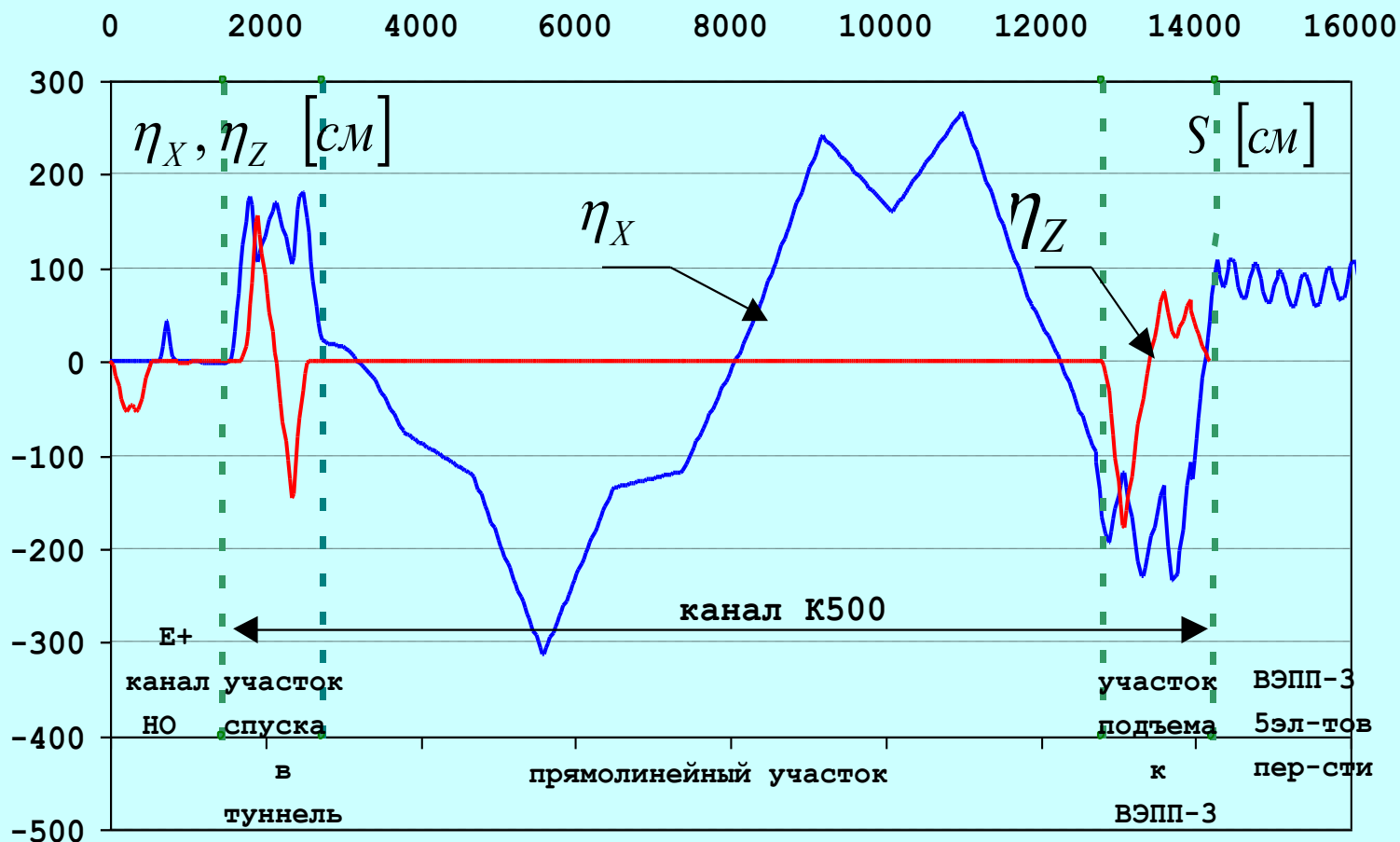


Рис.10. Дисперсионные функции

Т.к. после спуска в туннель пучок поворачивается только по вертикали, то приходится отказываться от ахроматичности участка спуска, имея на выходе его значение инварианта $H(\beta, \eta)$, необходимого для согласования с ВЭПП-3

Размер пучка

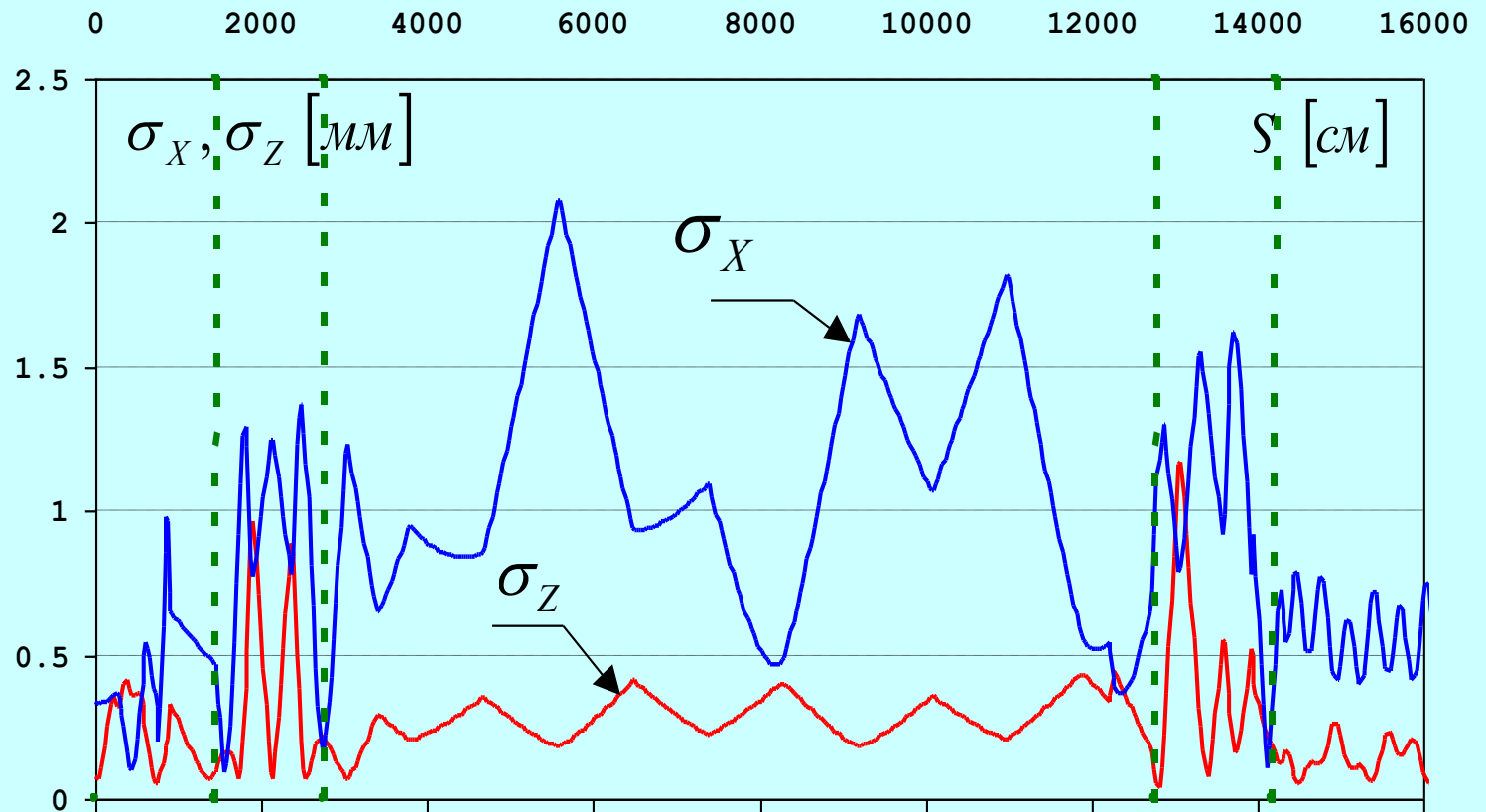


Рис.11. Размер пучка

Размер инжектируемого в ВЭПП-3 пучка выглядит весьма многообещающим

Орбита

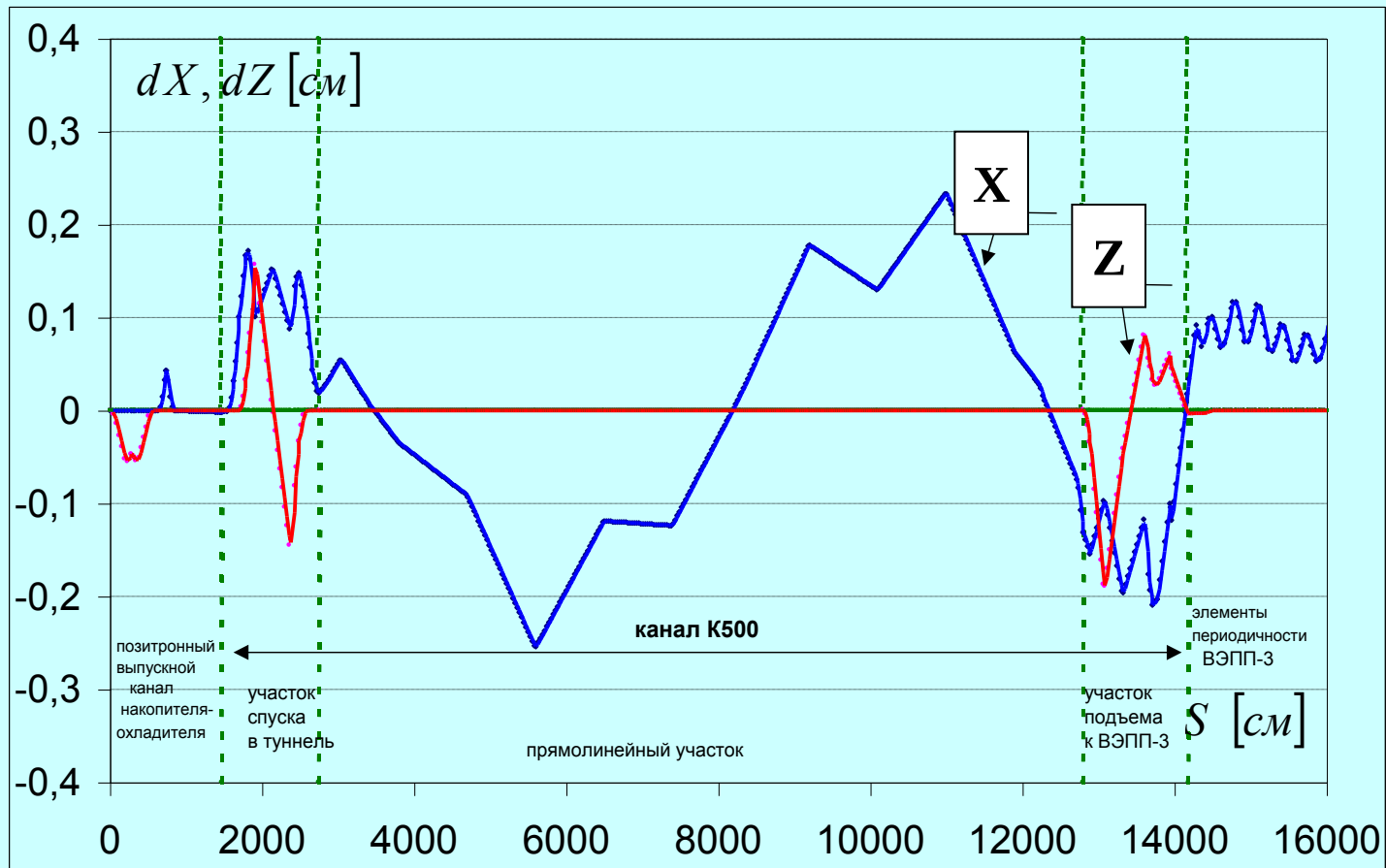


Рис.12. Орбита в канале при отклонении энергии пучка на 10^{-3} .

Если пучок проходит до конца канала, то при известном токе в магнитах можно с 1% точностью сказать, какая энергия пучка

Орбита

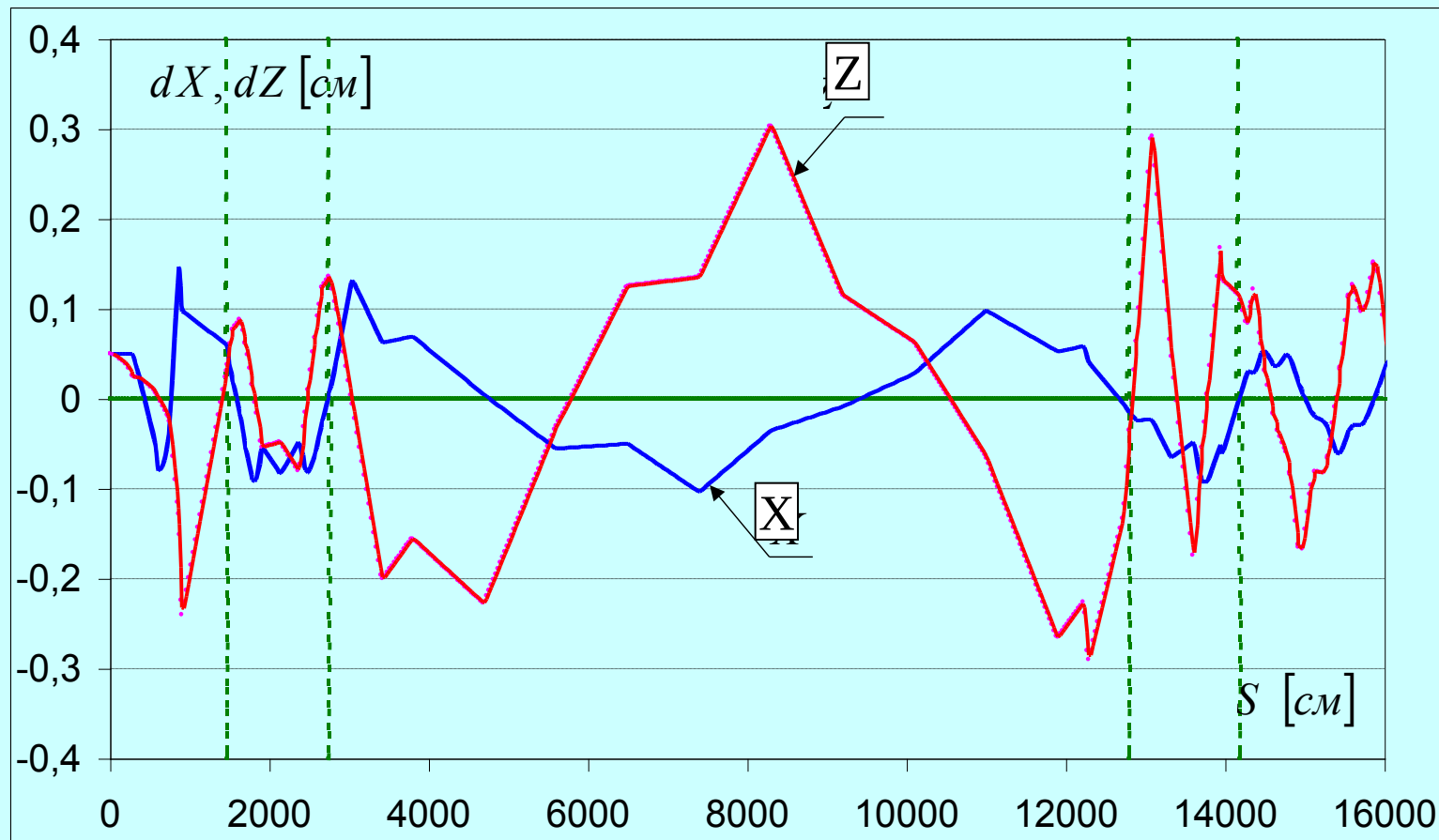


Рис.13. Орбита в канале при отклонении пучка по X и Z на 0.5 мм на выходе из НО

Орбита

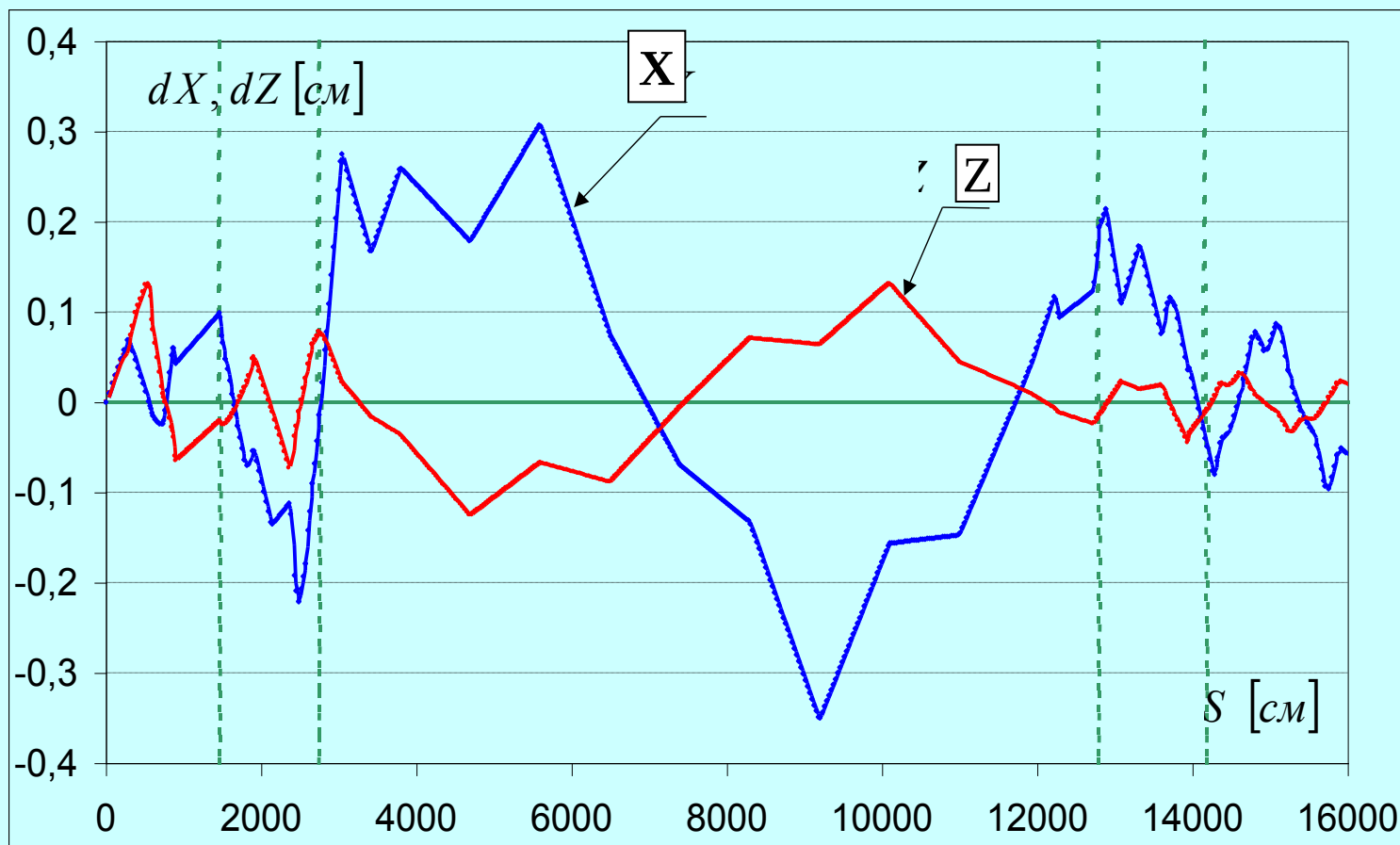


Рис.14. Орбита в канале при отклонении пучка по X' и Z' на 0.25 мрад на выходе из НО.
По X возможный источник неустойчивости – дефлектор, 0.25 мрад - это 1.5% от его амплитуды удара.

45° поворотный магнит

Параметры магнита

Эффективная длина, см	87.81
Максимальное поле, кГс	15.216
Количество обмоток	2
Число витков в обмотке	14
Ток обмотки, А	1085
Сопротивление обмоток, Ом	0.005
Напряжения на обмотках, В	5.4
Индуктивность обмоток, мГн	4.5
Суммарная мощность, выделяемая в обмотках, Вт	5900

Параметры обмотки 1% коррекции поля:

Диаметр проводника обмотки, мм	1.6
Число витков в обмотке	60
Ток обмотки, А	2.53
Сопротивление обмоток, Ом	2.4
Падение напряжения на обмотках, В	5.9
Индуктивность обмоток, мГн	83
Мощность, выделяемая в обмотках, Вт	15.6

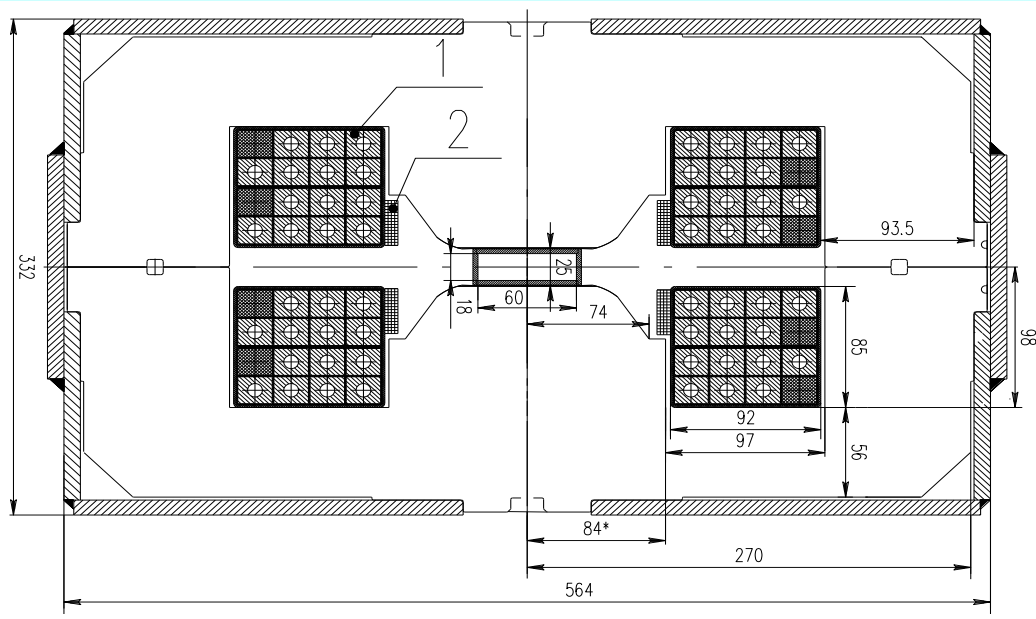


Рис.15. Поперечное сечение 45° магнита:
1 — основная обмотка; 2 — обмотка 1% коррекции поля.

Питание от реверсивного ИСТа, $I_{max} = 1100$ А

45° поворотный магнит

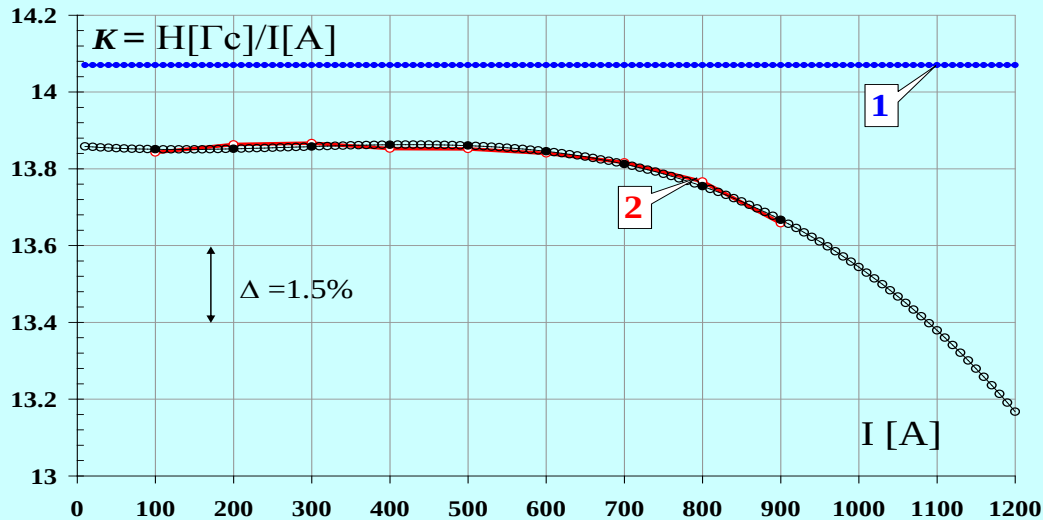


Рис.16.Эффективность 45° магнита
1- $\mu = \infty$, 2- измерения
 $H[\text{Гс}] = K \cdot I[\text{А}]$

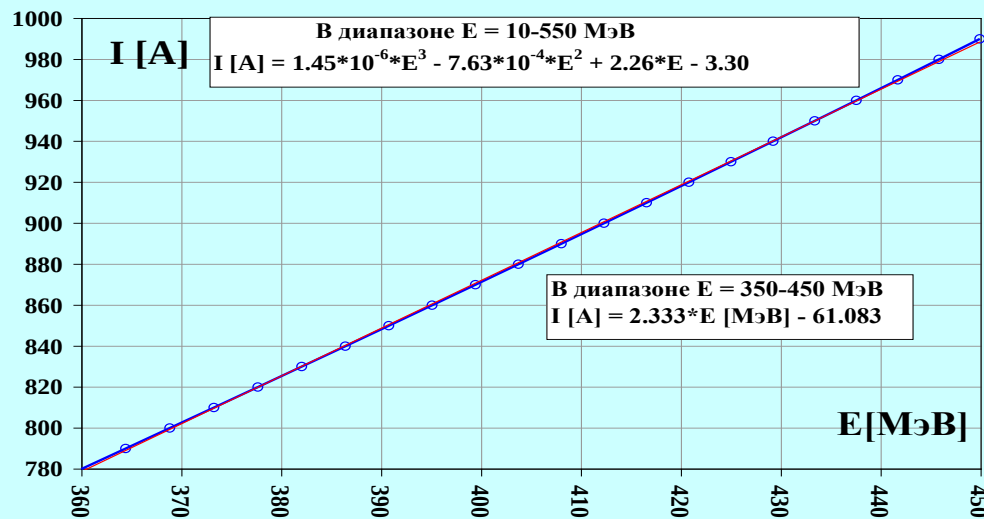


Рис. 17. Необходимая уставка тока в магните при заданной энергии пучка (по результатам магнитных измерений)

Для $\mu = \infty$, $I[\text{А}] = 2.13 \cdot E[\text{МэВ}]$.
 $I[\text{А}] = 2.333 \cdot E[\text{МэВ}] - 61.08$

Пример: $E = 398$ МэВ $\Rightarrow I = 867.5$ А

Корректор, встроенный в 45° поворотный магнит

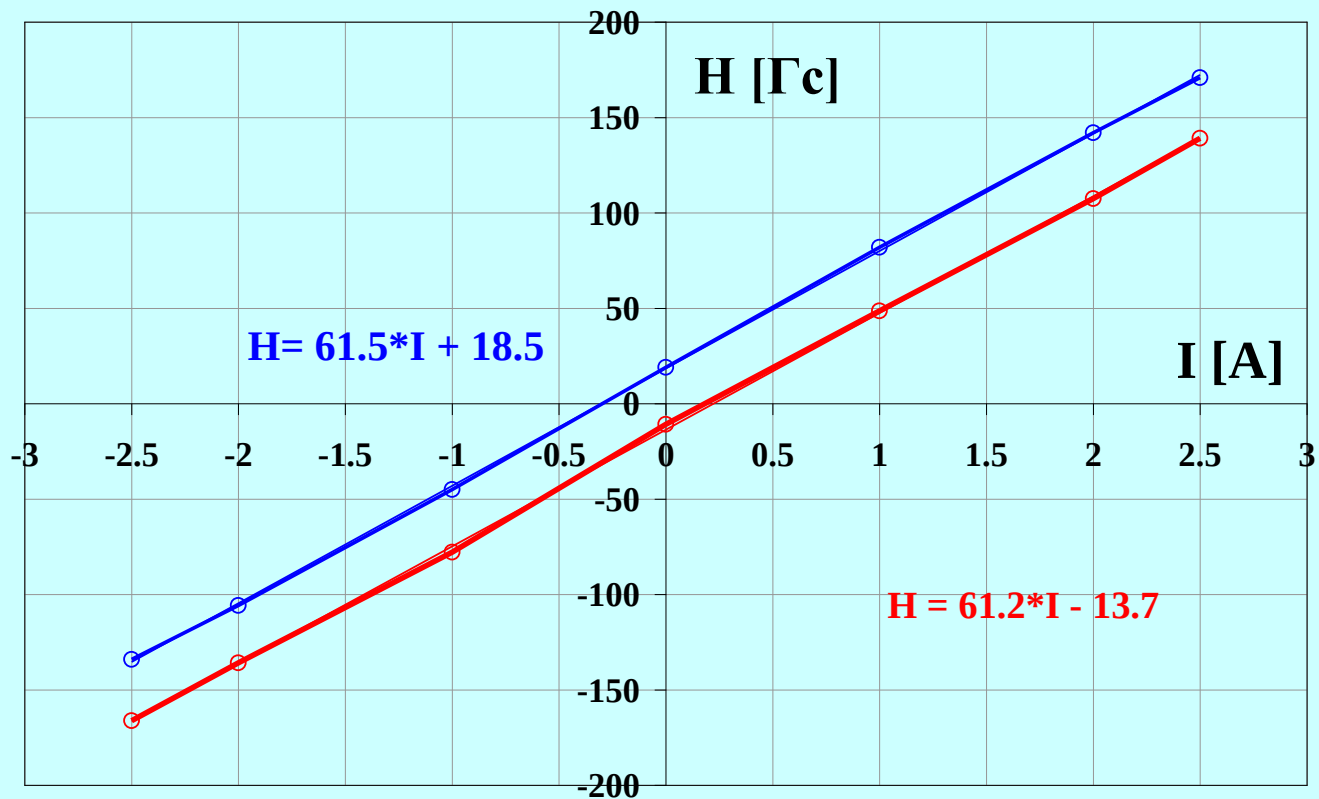


Рис.18. Эффективность встроенного в 45° магнит корректора при остаточных полях разного знака

Квадрупольная линза ДУ-60 с постоянным питанием

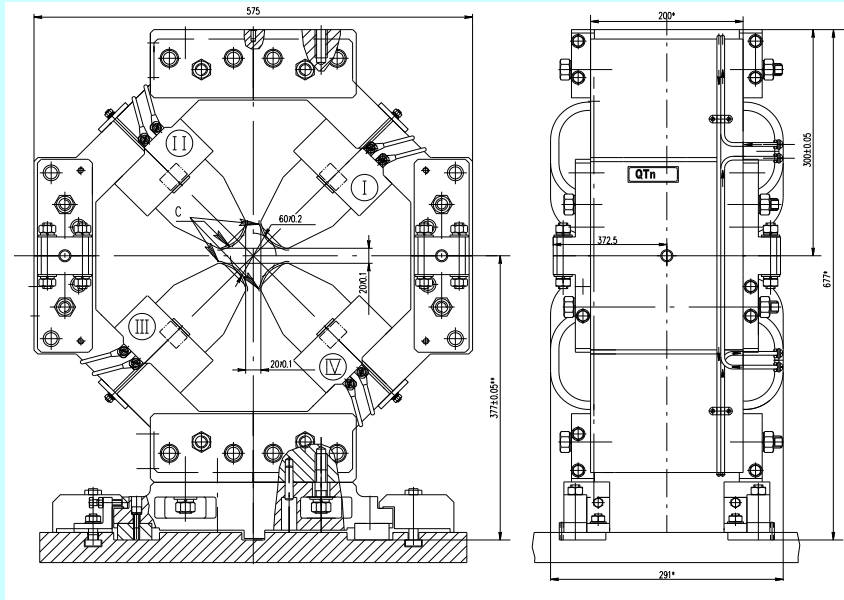


Рис.19. Общий вид квадрупольной линзы QT

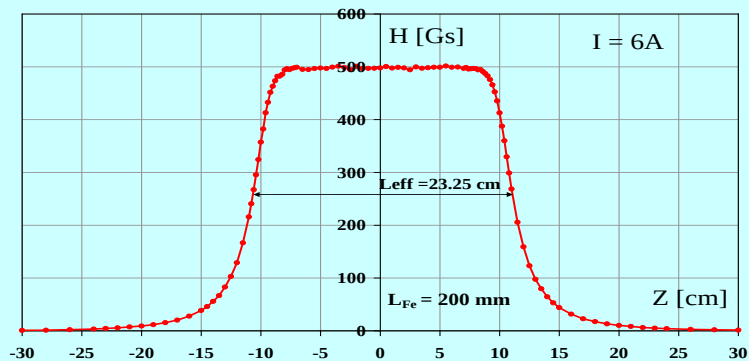
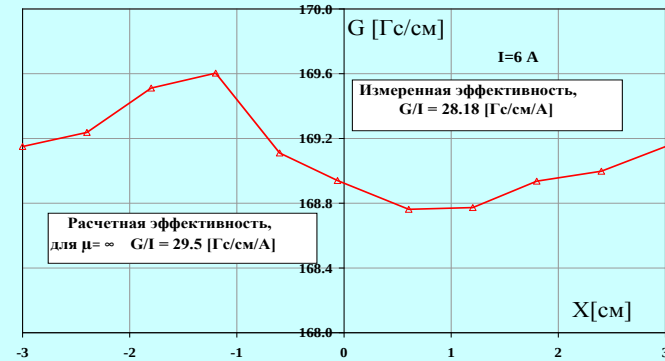


Рис. 20 Эффективная длина постоянной линзы.

Параметры квадрупольной линзы

Количество линз	10
Эффективная длина, см	23.2
Максимальный градиент, кГс/см	0.11
Параметры обмотки:	
Количество обмоток	4
Диаметр проводника обмотки, мм	2.1
Число витков в обмотке	104
Ток обмотки, А	4
Суммарное сопротивление обмоток, Ом	93
Суммарное падение напряжения на обмотках, В	7.7
Суммарная индуктивность обмоток, мГн	145
Суммарная мощность, выделяемая в обмотках, Вт	30



Для энергии пучка $E = 510$ МэВ расчетное значение градиента в линзах ДУ-60 $G = 96.33$ Гс/см. При этом ток в линзе $I = G/28.18 = 3.42$ А.

При известной энергии пучка E_0 [МэВ] нужно задать ток в линзе
 $I[A] = 3.42 * E_0 / 510$.

Корректор с постоянным питанием

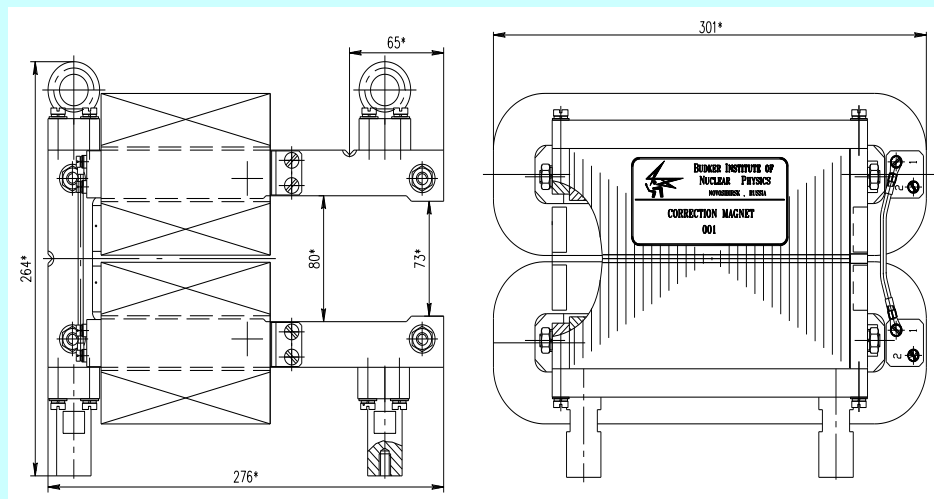


Рис. 21. Общий вид корректора КЕК

Количество магнитов 10

Эффективная длина, см 29.2

Максимальное поле, Гс 600

Параметры обмотки:

Количество обмоток 2

Диаметр проводника обмотки, мм 2

Число витков в обмотке 648

Ток обмотки, А 3.0

Суммарное сопротивление обмоток, Ом 4.6

Суммарное падение напряжения на обмотках, В 9.2

Суммарная индуктивность обмоток, Гн 1.5

Суммарная мощность, выделяемая в обмотках, Вт 40

Корректор с постоянным питанием

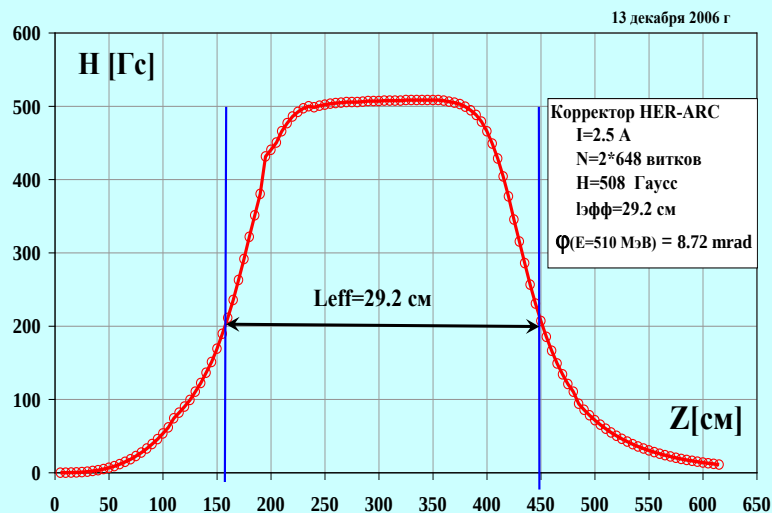


Рис. 22. Эффективная длина корректора

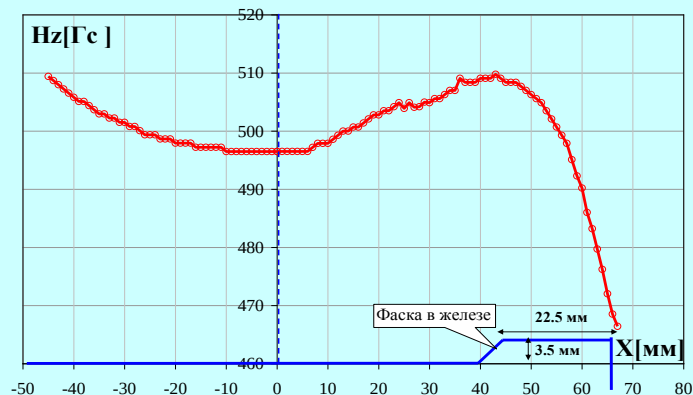


Рис. 23. Распределение поля в апертуре

Корректор HER_ARC

$I = 2.5$ А, $H = 0.508$ кГс, $U = 5$ В,
 ($E = 510$ МэВ $\varphi = 8.72$ мрад)

Эффективность корректора: $H/I = 203.2$ Гс/А.

Корректор K5X14, установленный перед участком подъема пучка в зал ВЭПП-3, выполняет функцию дополнительного магнита, выводящего пучок по радиусу на ось ВЭПП-3

Магнит поворачивает пучок на угол $20'$ (5.24 мрад)

Импульсная линза ДУ-30 с встроенным корректором

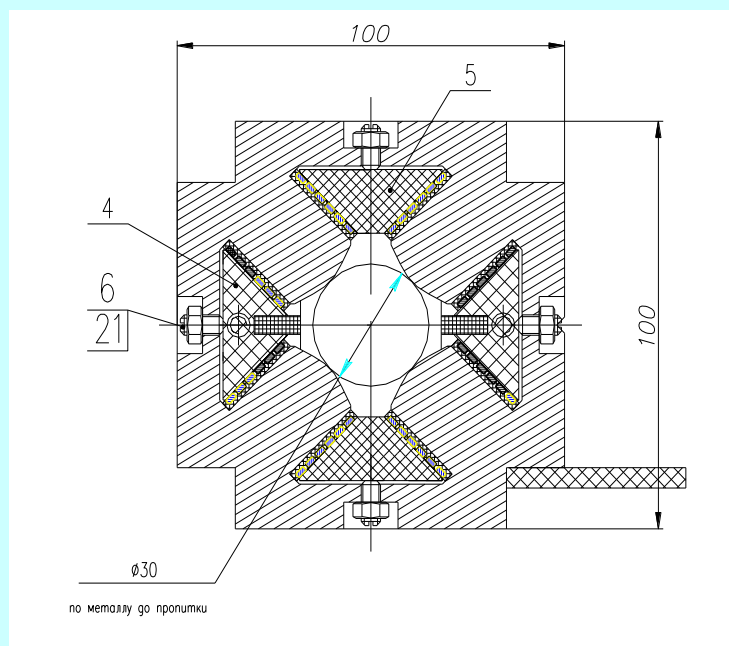


Рис. 24. Поперечное сечение

Параметры линзы и источника питания

Эффективная длина, мм	198
Количество витков	6
Индуктивность, мкГн	175
Сопротивление обмотки, Ом	0.086
Длительность импульса, мсек	0.5
Емкость, мкФ	150

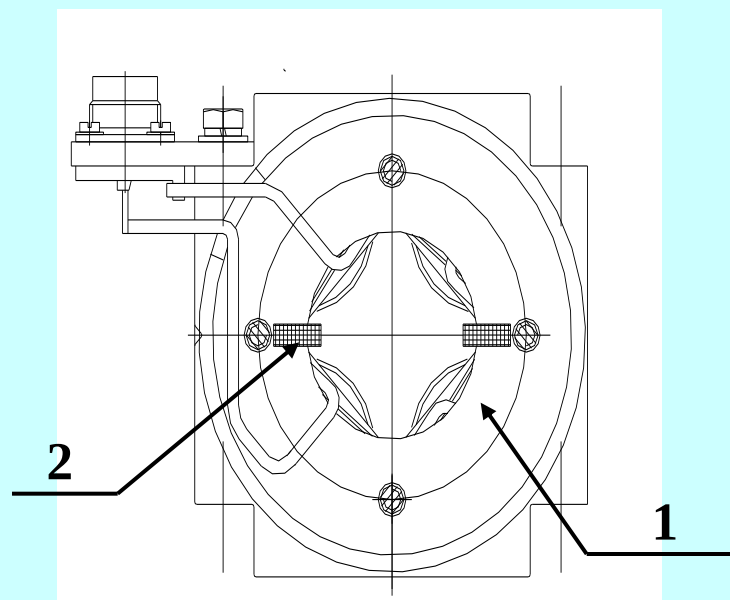


Рис. 25. Вид с торца

1- основная обмотка
2- обмотка корректора

Корректирующая обмотка

Количество витков	6
Индуктивность, мкГн	15
Дополнительная индуктивность, мкГн	300
Длительность импульса, мсек	0.5
Емкость, мкФ	150

Линза ДУ-30

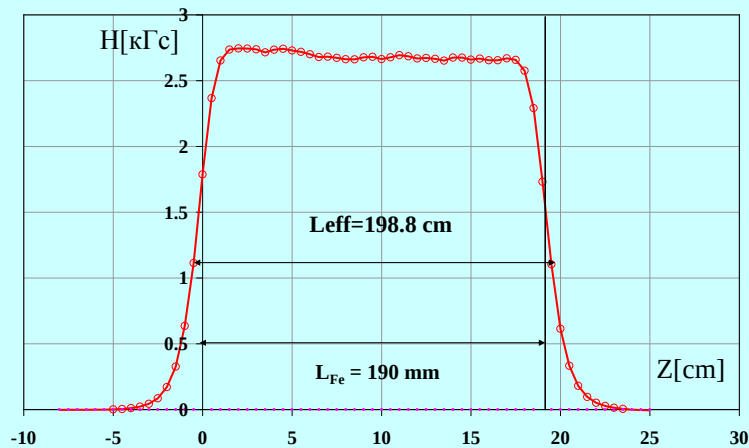


Рис. 26. Эффективная длина линзы

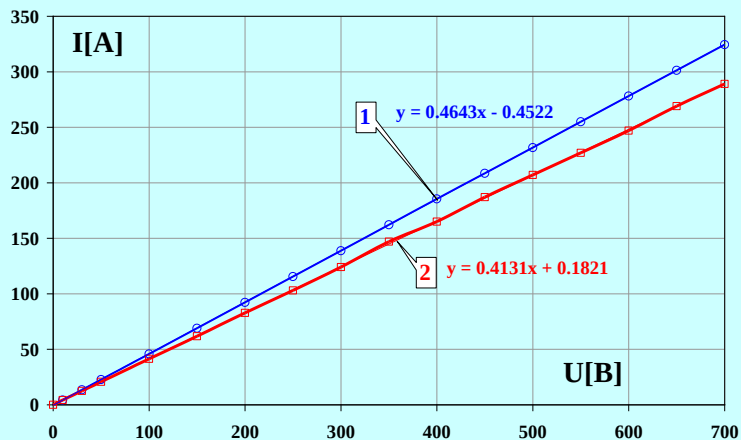


Рис 27. Зависимость тока в линзе L26 от напряжения на емкости.
1 - показания датчика VSDC, 2 – амплитуда сигнала с шунта генератора
Разница в показаниях объясняется, видимо, неправильным коэффициентом VSDC на момент измерений.

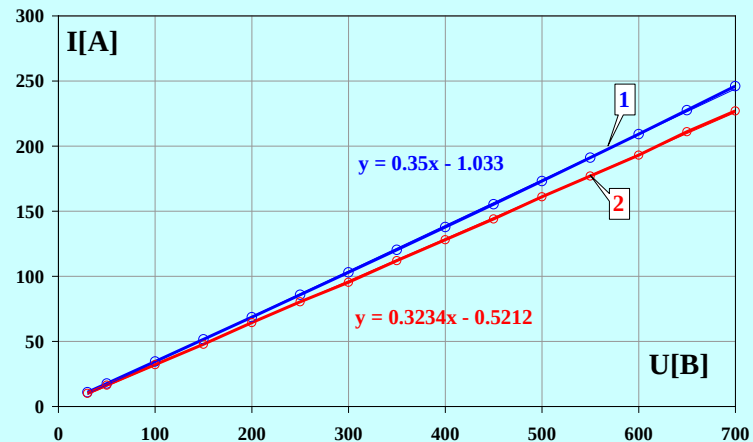


Рис.28 Зависимость тока в корректоре 5KL25X, встроенного в линзу L25, от напряжения на емкости.
1 – показания датчика VSDC, 2 – амплитуда сигнала с шунта генератора

Эффективность встроенного корректора

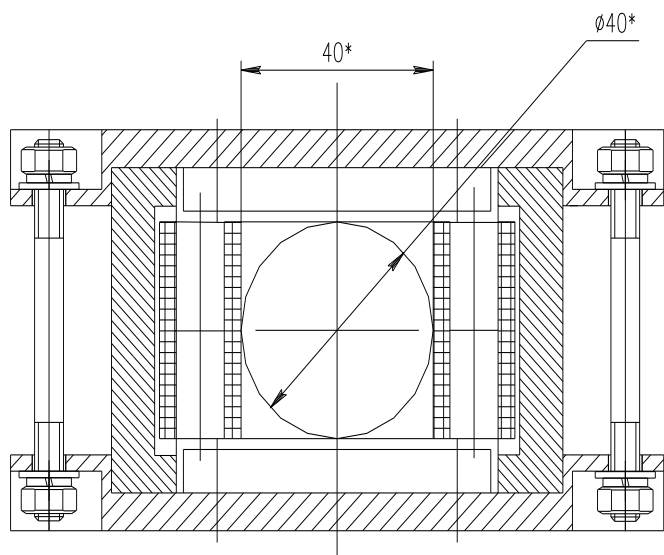
$$H[\text{Гс}/\text{см}] \approx 2.72 \cdot I[\text{A}]$$

$$I=100 \text{ A}, \varphi=1.6 \text{ мрад}, E=510 \text{ МэВ}$$

Эффективность линзы

$$G[\text{кГс}/\text{см}] = 0.0067 \cdot I[\text{A}]$$

Импульсный корректор ДУ-40



Техническая характеристика корректора

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1. Максимальное поле | 2 кГс |
| 2. Длина корректора по сердечнику | 0.1 м |
| 3. Количество витков обмотки | 12 |
| 4. Параметры источника питания: | $I=530 \text{ А}$; $U=900 \text{ В}$;
$C=100 \text{ мкф}$ |
| 5. Эффективный ток | 6.5 А |
| 6. Индуктивность корректора | $27 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ |
| 7. Дополнительная индуктивность | $280 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ |
| 8. Мощность потерь | 20 Вт |
| 9. Длительность импульса | 0.5 мсек |
| 10. Период импульсов | 1 сек |
| 11. Сопротивление одной катушки | 0.017 Ом |

Импульсный корректор

Распределение поля по Z

эффективная длина 122.6 мм
23.07.2007

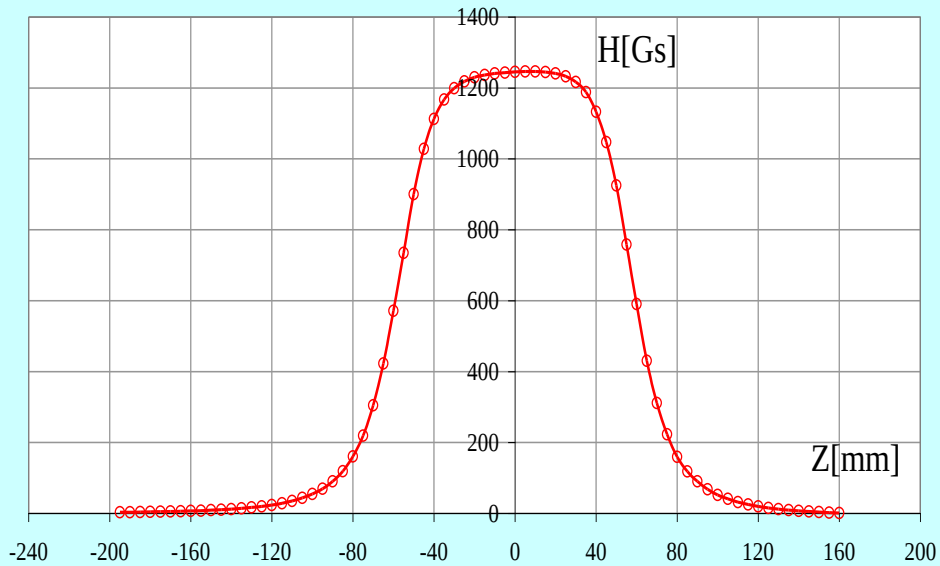
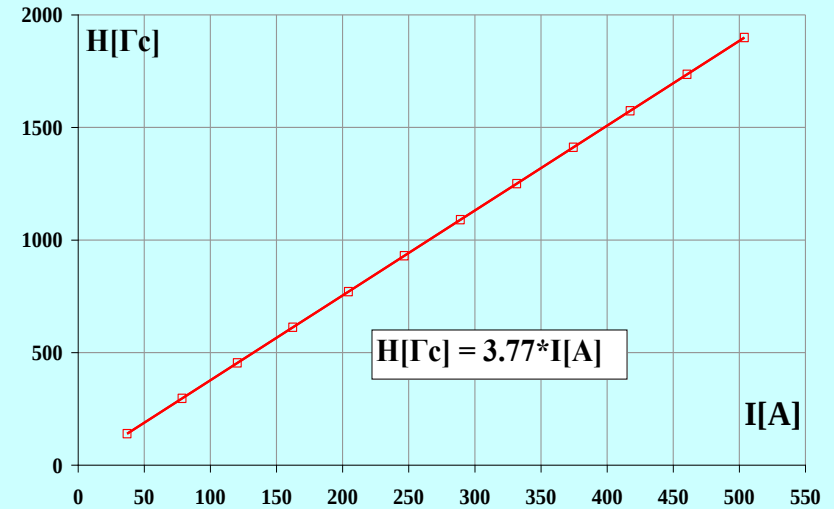


Рис. Эффективная длина корректора $L_{\text{eff}} = 12.3 \text{ cm}$

Для произвольной энергии:
Угол поворота корректора

$$\varphi [\text{mrad}] = 13.83 \cdot I [\text{A}] / E [\text{МэВ}]$$



Эффективность корректора $H [\text{Гс}] = 3.77 \cdot I [\text{A}]$

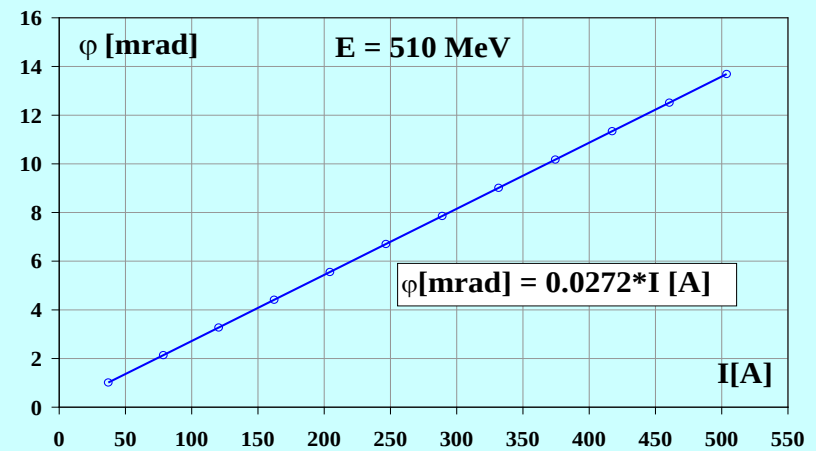
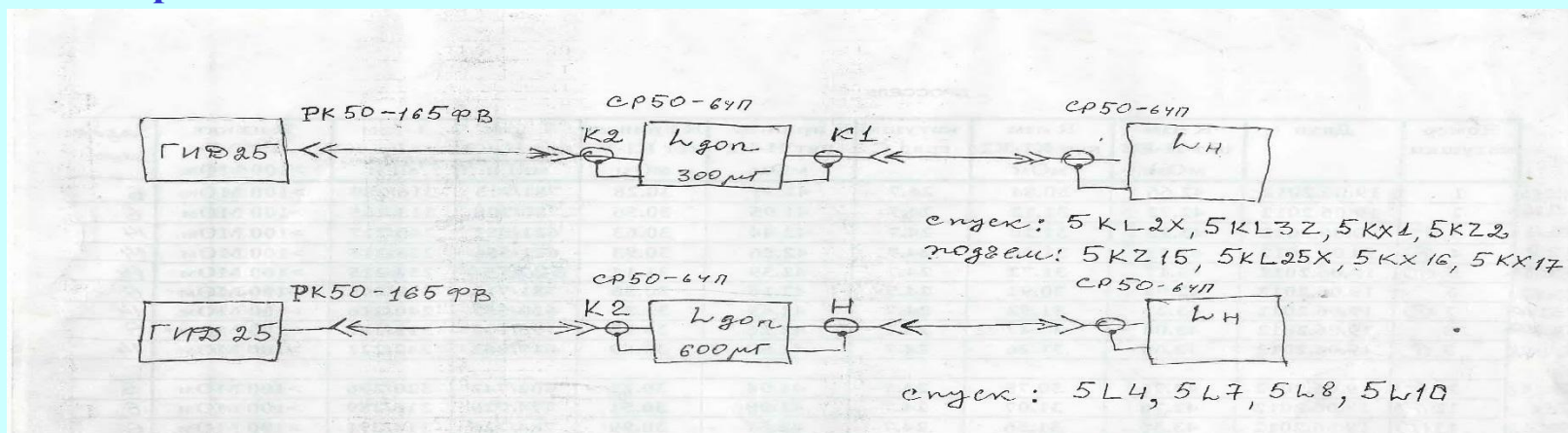


Рис. Угол поворота корректора от тока для энергии 510 МэВ.

Дополнительная индуктивность

Некоторые импульсные элементы подключены к источнику питания ГИД-25 через дополнительную индуктивность, чтобы обеспечить длительность питающего импульса $\tau \approx 500$ мксек. Это относится к отдельно стоящим корректорам: 5KX1, 5KZ2, 5KZ15, 5KX16, 5KX17 и к корректорам, встроенным в линзы: 5KL2X, 5KL3Z, 5KL25X. Эти корректора имеют малую собственную индуктивность и относительно малый диапазон варьирования напряжения.

Несколько линз, такие как 5L4, 5L7, 5L8, должны работать при относительно малом, но стабильном градиенте (токе). Эти линзы также запитаны через дополнительную индуктивность, что увеличивает напряжение на источнике питания и точность его стабилизации.



Впускной септум магнит 5M7 ($\varphi = 13^\circ$)

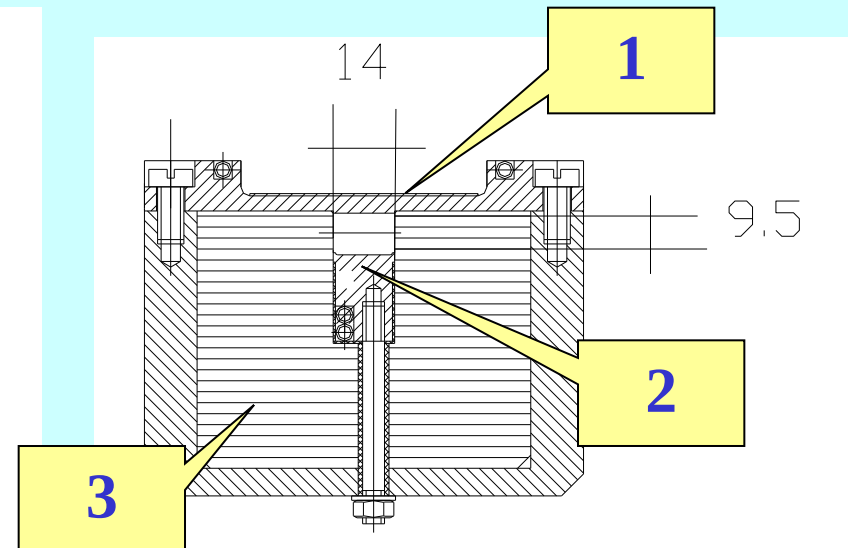
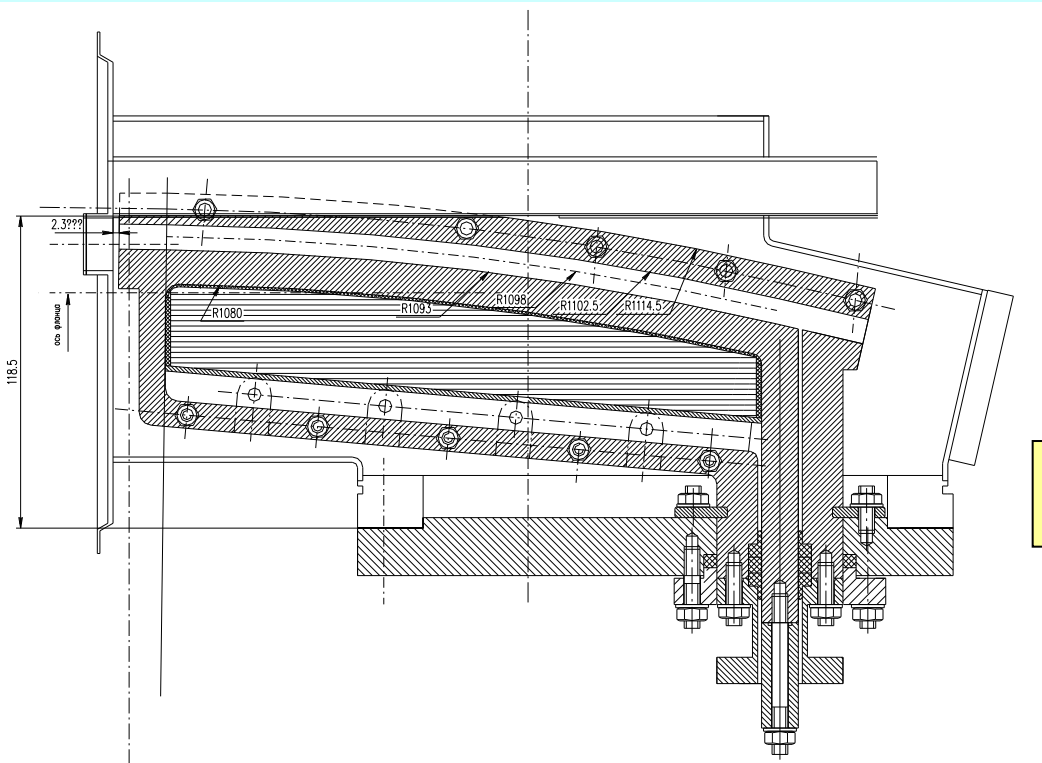


Рис. 30 . Поперечное сечение магнита.
1 – внешняя токонесущая шина (септум),
2 – внутренняя шина, 3 - магнитопровод
Апертура магнита $A_x = 14$ мм , $A_z = 9.5$ мм.
Поле направлено по оси X.

Рис. 29. Магнит 5М7 в вакуумном объеме

Впускной магнит 5М7

Параметр	Значение	Единицы измерения	Трансформатор (одноблинный)		
Основные параметры			Коэффициент трансформации	11	
Энергия пучка	510	МэВ	Индуктивность рассеяния	3.5	мкГн
Номинальное магнитное поле	1.61	Т	Параметры генератора		
Магнитный зазор	14	мм	Емкость	6	мкФ
Эффективная длина	0.24	м	Суммарная индуктивность контура	38	мкГн
Толщина септума	3	мм	Первичный ток	1.65	кА
Электрические параметры магнита			Напряжение на емкости (Q = 5)	≈ 4.8	кВ
Индуктивность	0.21	мкГн	Встроенный измерительный виток		
Сопротивление	0.0015	Ом	Площадь	11	см ²
Амплитуда тока	18	кА			
Длительность импульса	47	мксек			
Частота повторении импульсов	1	Гц			
Напряжение	256	В			
Энергия, запасенная в поле	35	Дж			
Рассеиваемая мощность	50	Вт			

Впускной магнит 5M7

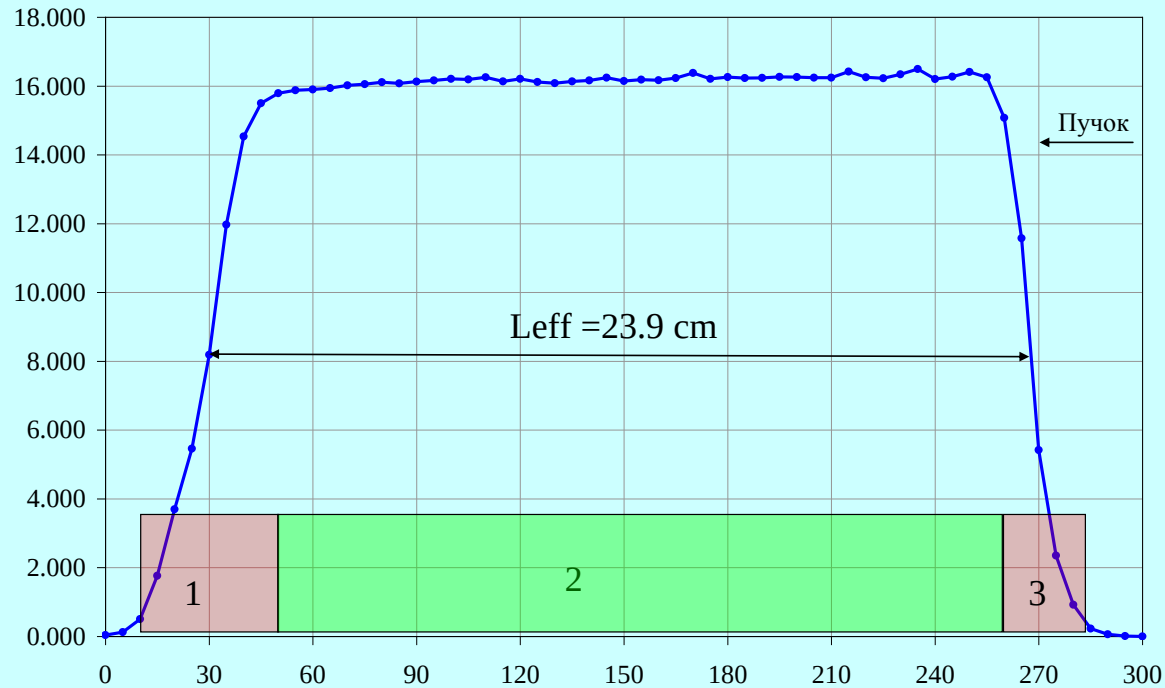


Рис. 31. Эффективная длина магнита (измерение)
1, 3 – торцевые медные экраны, 2 - магнитопровод

На выходе магнита расстояние от центра его апертуры до равновесной орбиты ВЭПП-3 18 мм

Угол впуска $\varphi \approx 18/138 = 0.013$ мрад (компенсируется инфлектором)

Участок подъема к ВЭПП-3

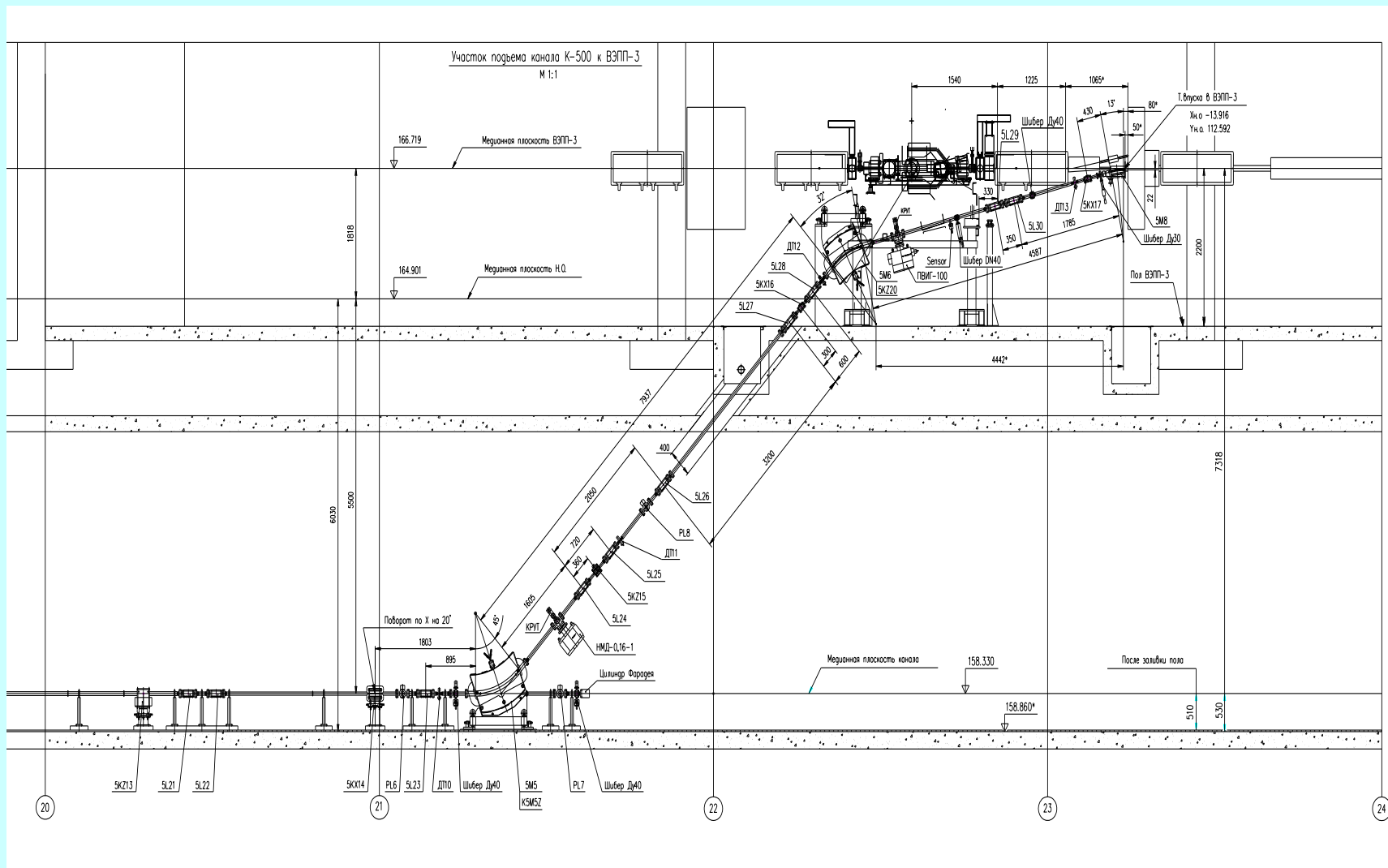


Рис. 32. Участок подъема (чертеж)

Участок подъема к ВЭПП-3 (мнемосхема Карнаева)



Рис. 33. Участок подъема (мнемосхема)

Участок подъема (амплитудные функции)

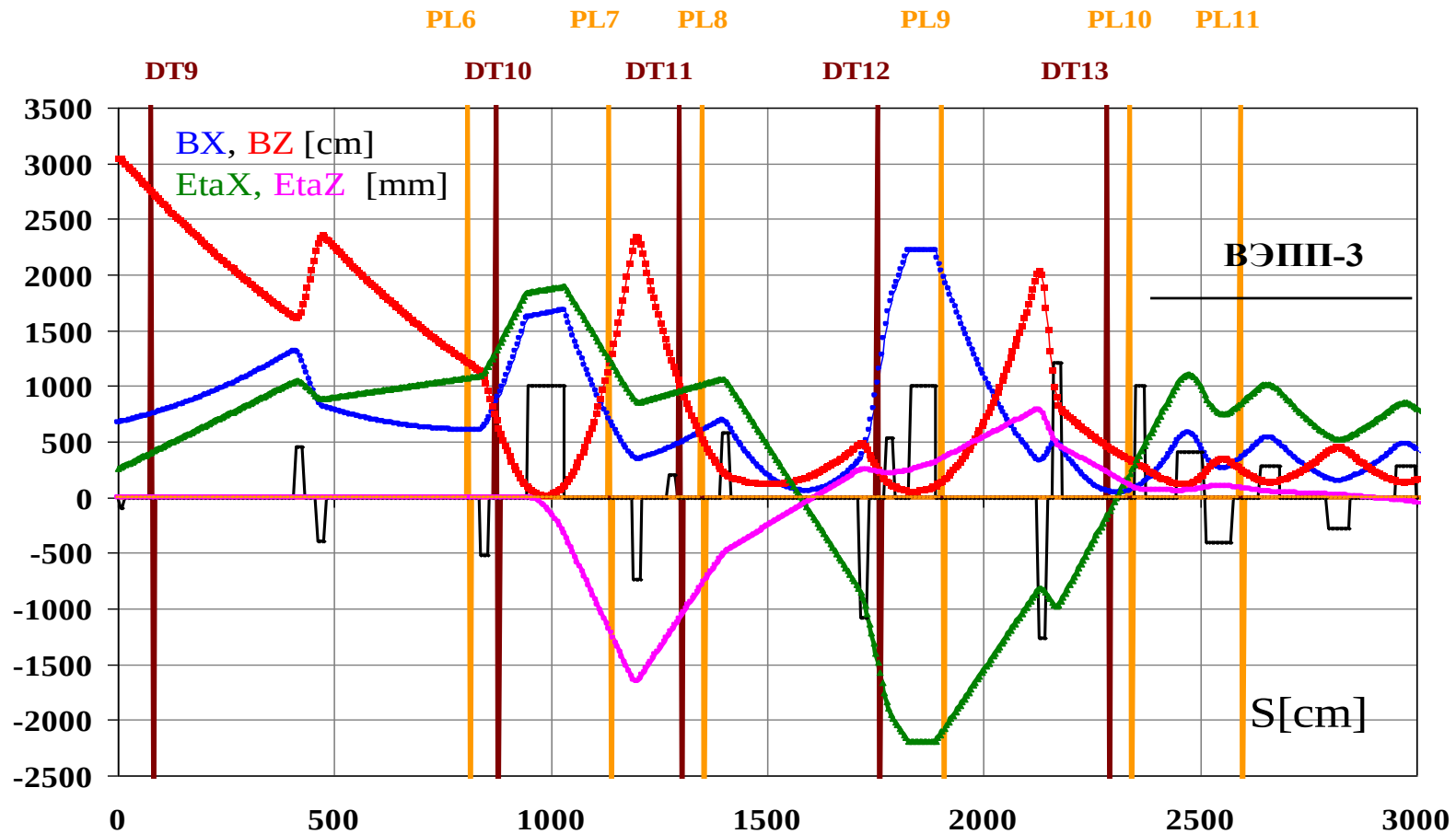


Рис. 34. Амплитудные функции

Участок подъема

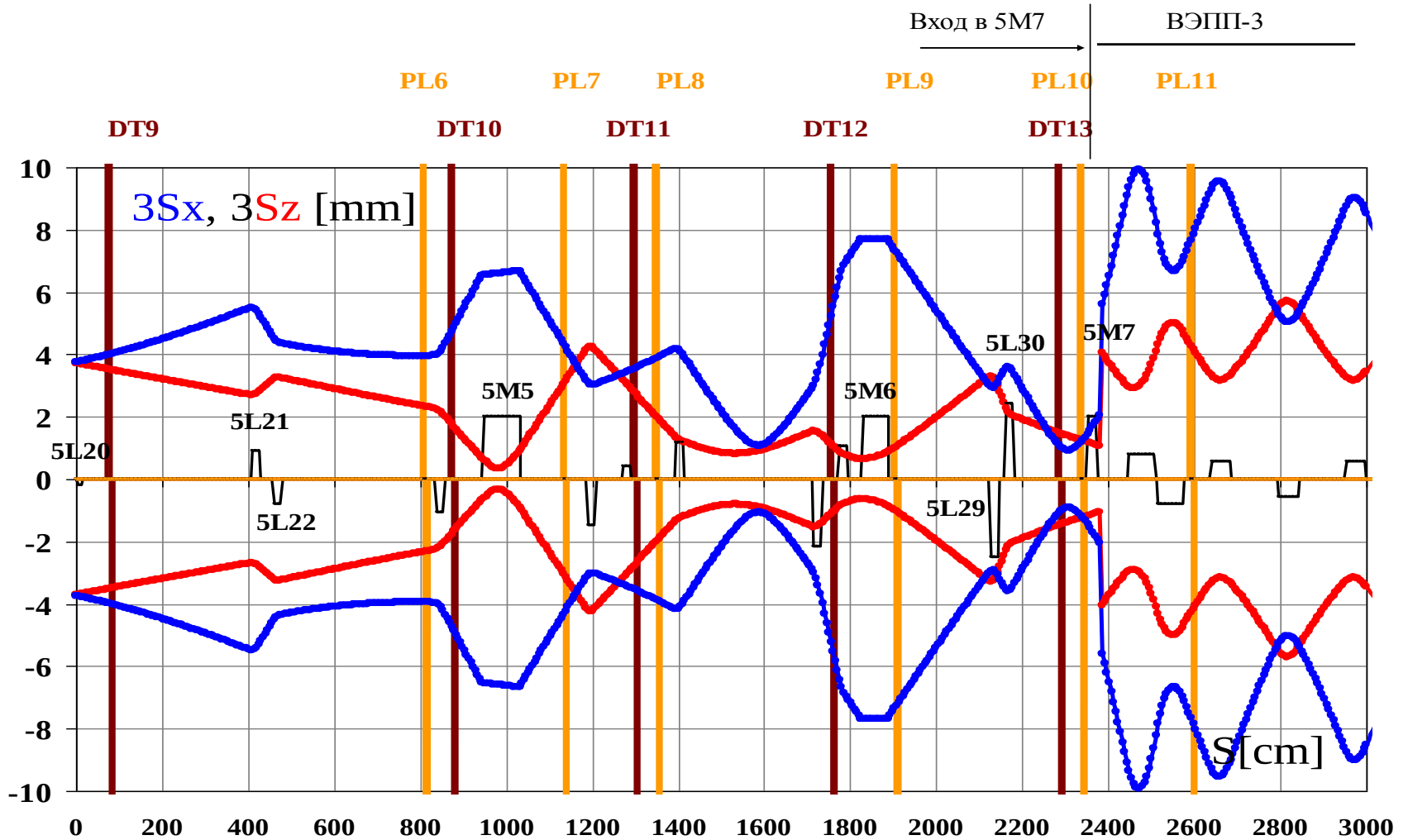


Рис. 35. Размеры пучка

После 5М7 стоит бериллиевая фольга толщиной 200 мкм. Эмиттанс пучка увеличивается по X в 8 раз, по Z в 16 раз и, соответственно, размеры в 2.8 и 4 раза.

Участок подъема

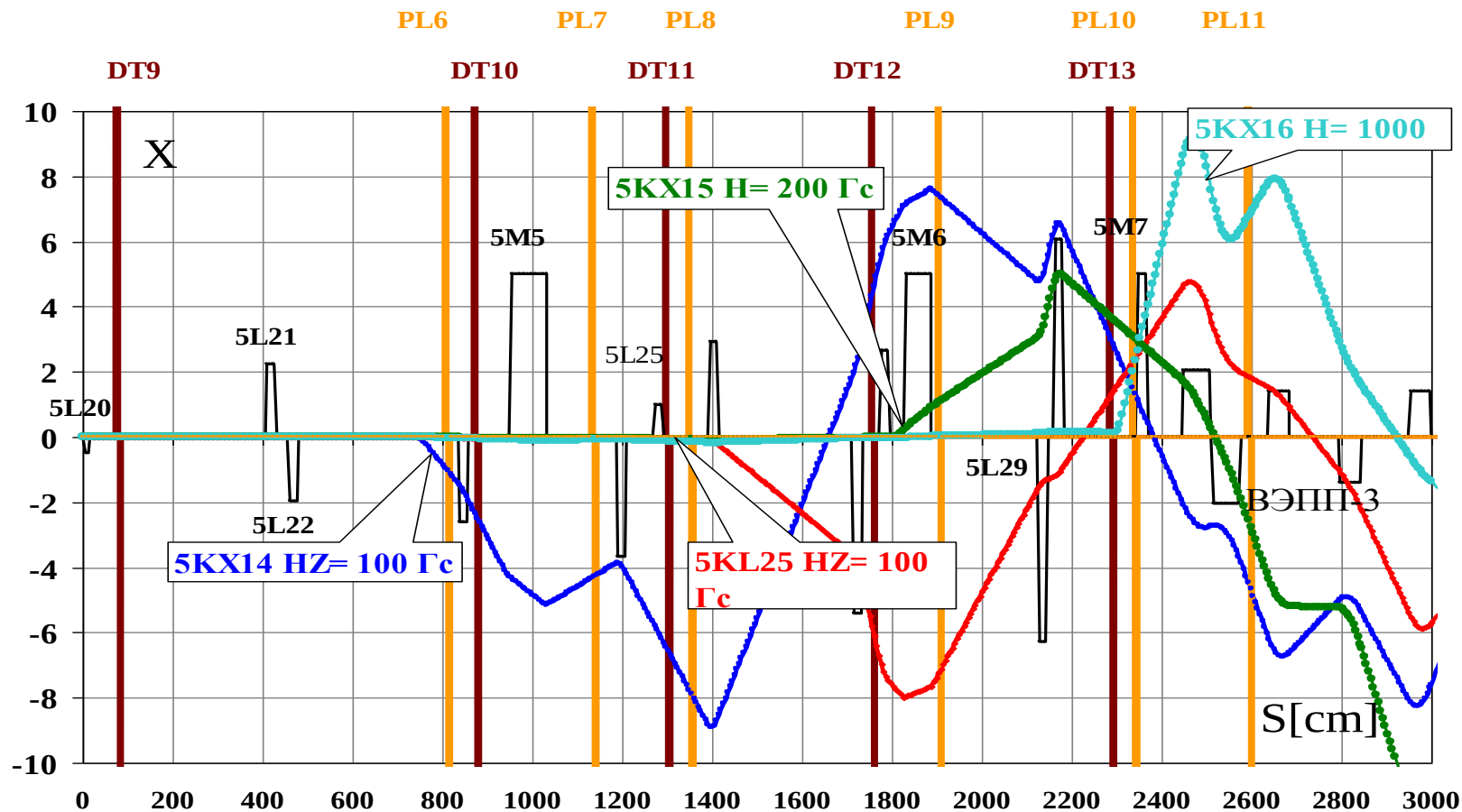


Рис. 36. Вертикальные корректоры

Нацеливание по вертикали: встроенный в магнит 5M6 корректор дает координату на входе в ВЭПП-3, а магнит M7 – угол

Участок подъема (горизонтальные корректоры)

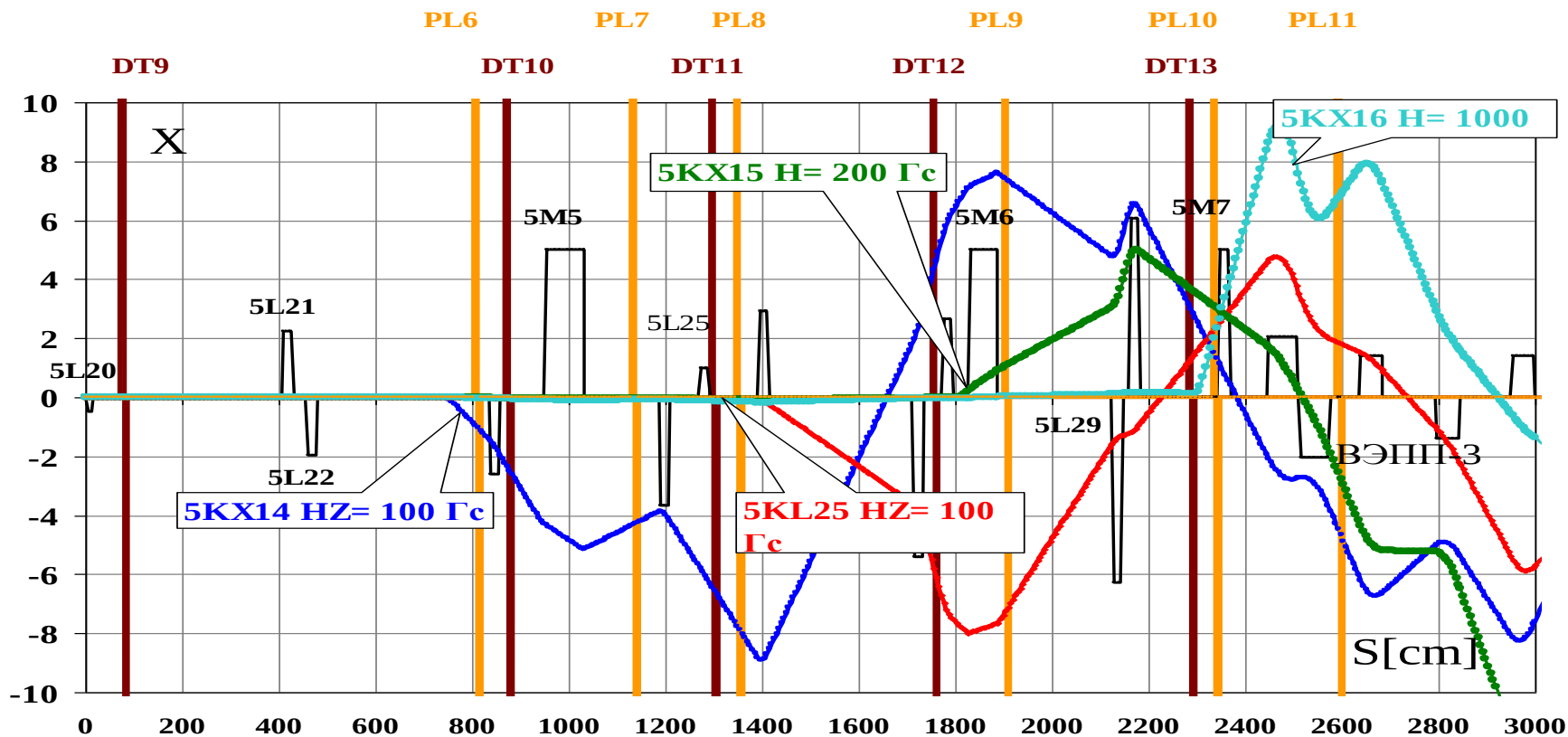


Рис. 37. Горизонтальные корректоры

Нацеливание по горизонтали: корректор 5KX15 дает координату на входе в ВЭПП-3,
а корректор 5KX16 – угол

Корректор 5KX14 выполняет функцию магнита и поворачивает пучок на угол $20'$ (5.24 мрад)

Параметры линз и их источников питания (от спуска до подъема), Электроны

E=510 МэВ				E=398 МэВ			
Элемент		G[кГс/см]	I[A]	Элемент		G[кГс/см]	I[A]
3L1	3.7100	2.8953		5L11	0.0964	0.0752	2.669
3L2	-2.3400	-1.8261		5L12	-0.0964	-0.0752	-2.669
5L1	-0.1480	-0.1155	-17.24	5L13	0.0964	0.0752	2.669
5L2	0.6280	0.4901	73.15	5L14	-0.0964	-0.0752	-2.669
5L3	-1.1160	-0.8709	-130	5L15	0.0964	0.0752	2.669
5L4	0.2190	0.1709	25.51	5L16	-0.0964	-0.0752	-2.669
5L5	-1.1090	-0.8655	-129.2	5L17	0.0964	0.0752	2.669
5L6	0.5340	0.4167	62.2	5L18	-0.0964	-0.0752	-2.669
5L7	-0.3030	-0.2365	-35.29	5L19	0.0964	0.0752	2.669
5L8	0.2100	0.1639	24.46	5L20	-0.0964	-0.0752	-2.669
5L9	0.4980	0.3886	58.01				
5L10	-0.5060	-0.3949	-58.94				

При переходе на позитроны величины полей и градиентов в канале K500 остаются теми же самыми, изменяется только их знак. Изменяются также знак и градиент поля в линзах 3L1 и 3L2.

Параметры элементов и их источников питания на участке подъема (электроны)

Ориентация всех линз относительно разъема питания одинакова.

При положительной полярности на емкости линза

фокусирует по Z и дефокусирует по X

Импульсные квадрупольные линзы

	E=510 МэВ	E=398 МэВ		
Элемент	G[кГс/см]	G[кГс/см]	I[A]	U[В]*
5L21	0.4500	0.3512	-52.41	-126.88135
5L22	-0.3950	-0.3083	46.01	111.37363
5L23	-0.5220	-0.4074	60.8	147.18237
5L24	-0.7650	-0.5970	89.1	215.6983
5L25	0.0000	0.0000	0	0
5L26	0.5660	0.4417	-65.93	-159.58854
5L27	-1.0770	-0.8405	125.4	303.66937
5L28	0.5390	0.4206	-62.78	-151.97566
5L29	-1.3360	-1.0426	155.6	376.69664
5L30	1.2360	0.9646	-144	-348.50078

*Напряжение приблизительное, пересчитано по измерениям зависимости тока от напряжения для генератора 5L26.

Магнит 5M5

при исходном положении ИСТА

полярность электронная

(стрелка на вольтметре отклонена вправо)

Для E = 398 МэВ I = 867.5 А

Требуется еще раз проверить взаимную полярность магнитов.

Корректор 5KX14

H = 238 Гс I=1.17 А

(поворот влево по ходу пучка)

Магнит 5M7

Из сравнения с режимом ПМ4

Ожидаемое напряжение

на генераторе $U \approx 3.75$ кВ

Длина канала от центра дефлектора
НО до центра инфлектора ВЭПП-3:

электронного L = 139.32 м

позитронного L = 145.35 м

Инжекция и накопление в ВЭПП-3

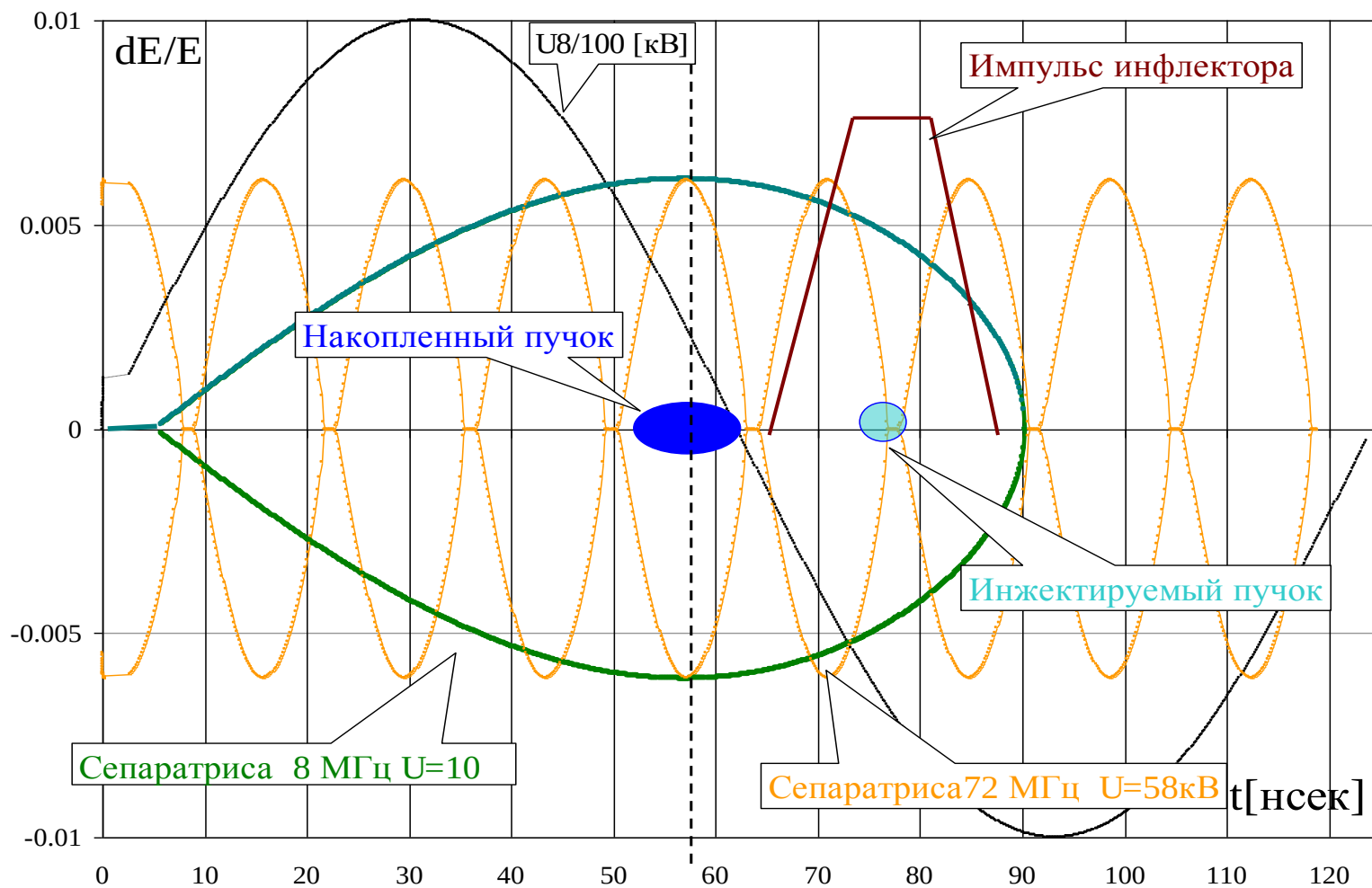


Рис. 38. Накопление в ВЭПП-3 со сдвигом по фазе, с последующим перехватом в 72 МГц

Спасибо за внимание

Сценарий работы ВЭПП-4М на высокой энергии

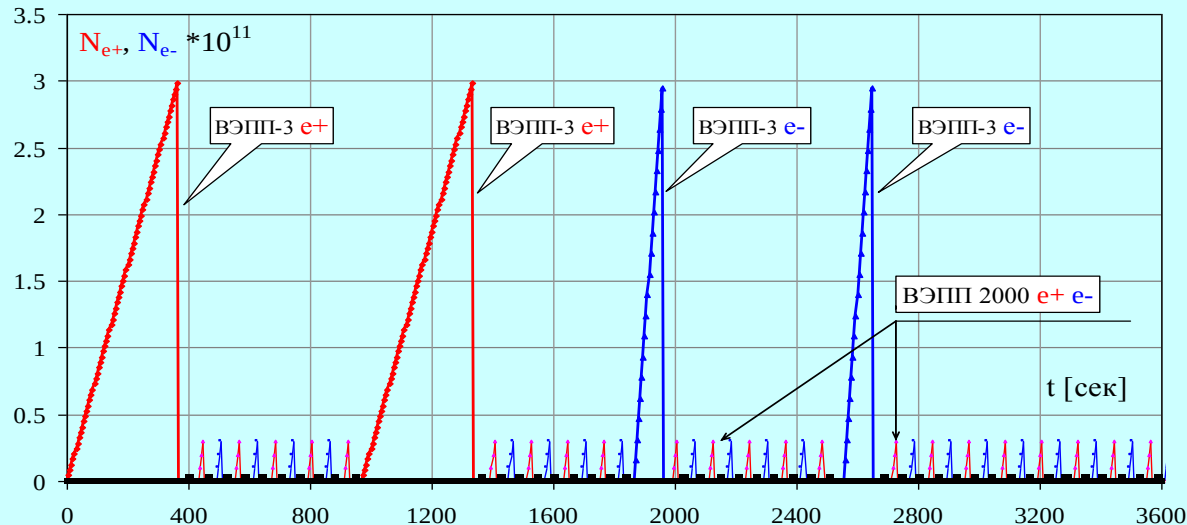


График совместной работы
ВЭПП-3 и ВЭПП 2000 от
инжекционного комплекса
Число позитронов от ИК
 $N_{e+} \approx 10^9$ 1/сек

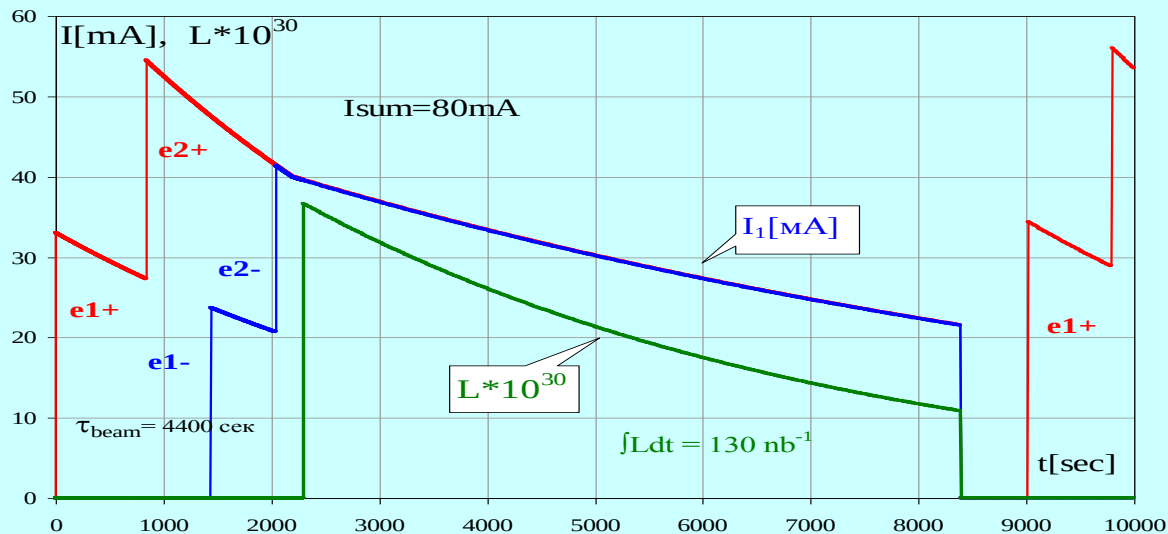


График работы ВЭПП-4М на
высокой энергии.
Средняя по заходу светимость
 $L = 2 \cdot 10^{31}$
Интеграл светимости за заход
 $\int L dt = 130$ nb⁻¹