

Разработка конструкторской документации и изготовление экспериментальных образцов элементов магнитной системы накопительного кольца источника синхротронного излучения

В результате выполнения работы должна быть разработана конструкторская документация и изготовлены:

- Экспериментальный образец диполя на основе постоянных магнитов (длинный)
- Экспериментальный образец диполя на основе постоянных магнитов (короткий)
- Экспериментальный образец квадрупольного среднего градиента
- Экспериментальный образец квадрупольного большого градиента
- Экспериментальный образец диполь-квадрупольного
- Экспериментальный образец секступольного
- Экспериментальный образец корректора
- Экспериментальный образец октупольного
- Прототипы источников питания магнитов

1. Диполь на основе постоянных магнитов (длинный)

Диполь состоит из 5 секций с различным полем. Диполь изготавливается на основе постоянных магнитов $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ с использованием ярма и полюсов из технического чистого железа (содержание углерода - менее 0,02%)

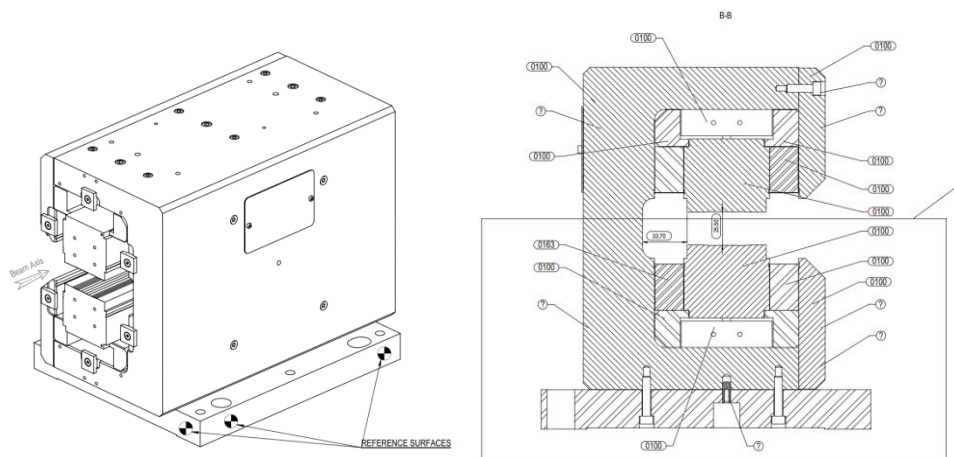


Рисунок 1. Внешний вид дипольного магнита. Поперечное сечение дипольного магнита, с обозначением ярма, полюсов и блоков постоянных магнитов.

Таблица 1. Технические характеристики дипольного магнита (длинный)

| Параметр | Требование / значение | | Ед. изм. |
|--|--|--------------------------------------|----------|
| магнитное поле в секции | | 0,4536; | Тл |
| материал магнитного полюса | технически чистое железо (содержание углерода [менее 0,02%]) коэрцитивная сила не более 66 А/м, магнитная проницаемость не менее 7500 | | |
| блоки постоянных магнитов | сплав Sm_2Co_{17} | | |
| Материал постоянных магнитов, остаточная индукция B_r | не менее | 1,12 | Тл |
| Материал постоянных магнитов, коэрцитивная сила | не менее | 800 | кА/м |
| Рабочая температура | не менее | 300 | °С |
| Температура Кюри | не менее | 800 | °С |
| Величина отклонения рабочего поля в пределах рабочей области шириной [± 13 мм] | не более | $\Delta B/B \approx 2 \cdot 10^{-4}$ | |
| шунтовая компенсация температурной зависимости величины индукции в диапазоне плюс-минус 5 градусов Цельсия | наличие | | |
| длина полюса магнита | | 417 плюс-минус 0,05 | мм |
| Радиационная стойкость компонент | не менее | 10^7 | Грей |

2. Диполь на основе постоянных магнитов (короткий)

Короткий поворотный магнит (диполь) изготавливается на основе постоянных магнитов Sm_2Co_{17} с использованием ярма и полюсов из технически чистого железа (содержание углерода - менее 0,02%)

Таблица 2. Технические характеристики дипольного магнита (короткий)

| Параметр | Требование / значение | | Ед. изм. |
|---|--|--------------------------------------|----------|
| магнитное поле в зазоре | | 0,8602; | Тл |
| материал магнитного полюса и ярма | технически чистое железо (содержание углерода [менее 0,02%]), коэрцитивная сила не более 66 А/м, магнитная проницаемость не менее 7500 | | |
| Блоки постоянных магнитов | сплав Sm_2Co_{17} | | |
| Величина отклонения рабочего поля в пределах рабочей области шириной [± 13 мм] | Не более | $\Delta B/B \approx 2 \cdot 10^{-4}$ | |
| длина полюса магнита | | 49 | мм |

3. Квадруполь среднего градиента

В разрабатываемой магнитной структуре источника синхротронного излучения присутствуют два семейства квадрупольных магнитов - магниты со средним градиентом, порядка 50 Тл/м и сильным порядка 90 Тл/м.

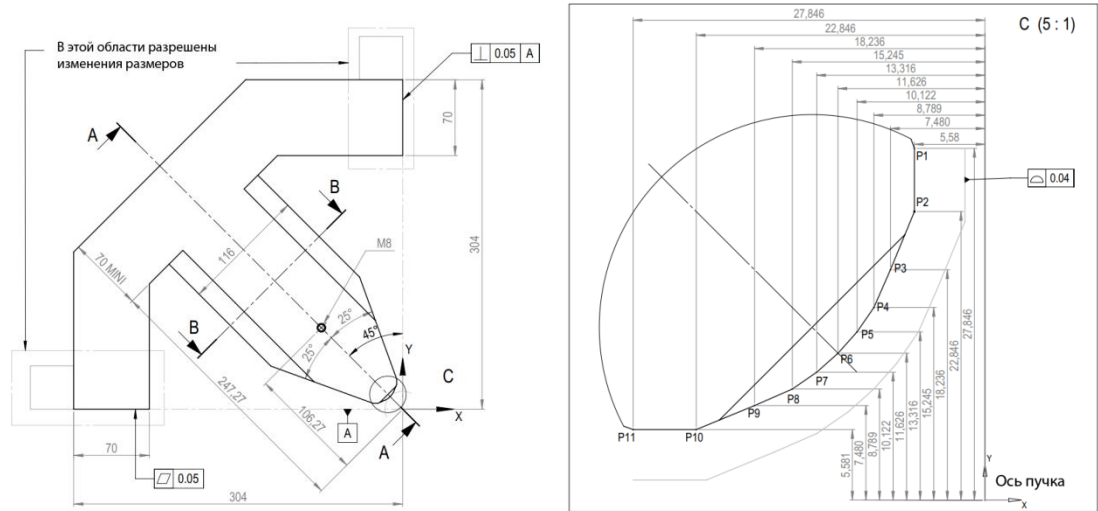


Рисунок 2. Сечение четвертой части ярма и предварительный профиль наконечника квадрупольа QF2.

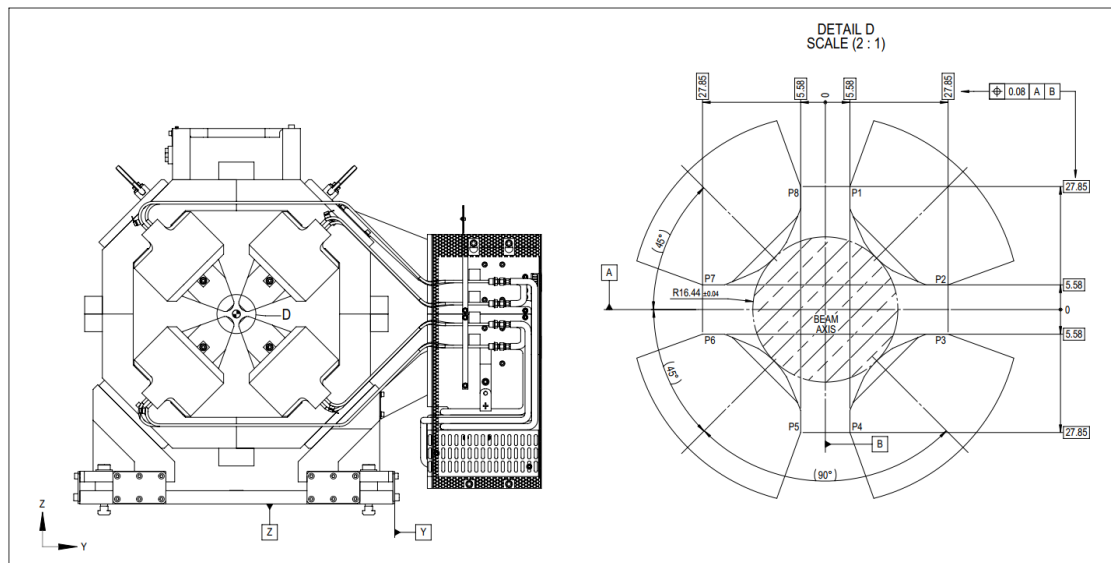


Рисунок 2. Расположение полюсов квадрупольа среднего поля QF2.

Таблица 3. Технические характеристики дипольного магнита

| Параметр | Требование / значение | | Ед. изм. |
|--|--|---------------------------|-----------------|
| градиент поля | при токе 95 А | 53 | Тл/м |
| длина полюса | | 212 плюс-минус 0,05 | мм |
| материал магнитного полюса | низкоуглеродистая сталь, коэрцитивная сила не более | 80 | А/м |
| Предельная габаритная длина магнита вдоль пучка | не более | 280 | мм |
| Однородность магнитного поля (состав гармоник поля при номинальном токе) | Гармоника | Величина | Ст. откл |
| | Дипольная гармоника | 0 | |
| | Квадрупольная | 10 000 | |
| | Секступольная | 0 | 3,1 |
| | Октупольная | 0 | 2,5 |
| | Декапольная | 0 | 2,2 |
| | 12-польная | 1,06 | 1,8 |
| | 14-польная | 0 | 1,5 |
| | 16-польная | 0 | 1,2 |
| | 18-польная | 0 | 1,0 |
| | 20-польная | минус 5,0 | 0,9 |
| | 22-польная | 0 | 0,7 |
| | 24-польная | 0 | 0,5 |
| | 26-польная | 0 | 0,5 |
| | 28-польная | 4,3 | 0,5 |
| | 30-польная | 0 | <0,1 |
| 32-польная | 0 | <0,1 | |
| 34-польная | 0 | <0,1 | |
| 36-польная | минус 0,9 | <0,1 | |
| Параметры медного отожжённого проводника: | | | |
| Сечение проводника | | 6×6 | мм ² |
| Диаметр канала охлаждения | | 3 | мм |
| Материал проводника | Бескислородная медь М06 по ГОСТ 859-2014 | | |
| Сопротивление удельное | | $1,78 \times 10^{-8}$ | Ом × м |
| Толщина изоляции между витками | Не менее | 0,5 | мм |
| Пробивное напряжение изоляции катушки | Не менее | 2,0 | кВ |
| Испытательное давление воды катушки | Не менее | 40 | бар |
| Радиационная стойкость компонент (изоляция, шланги и т.д.) | не менее | 10^7 | Грей |

4. Квадруполь среднего градиента

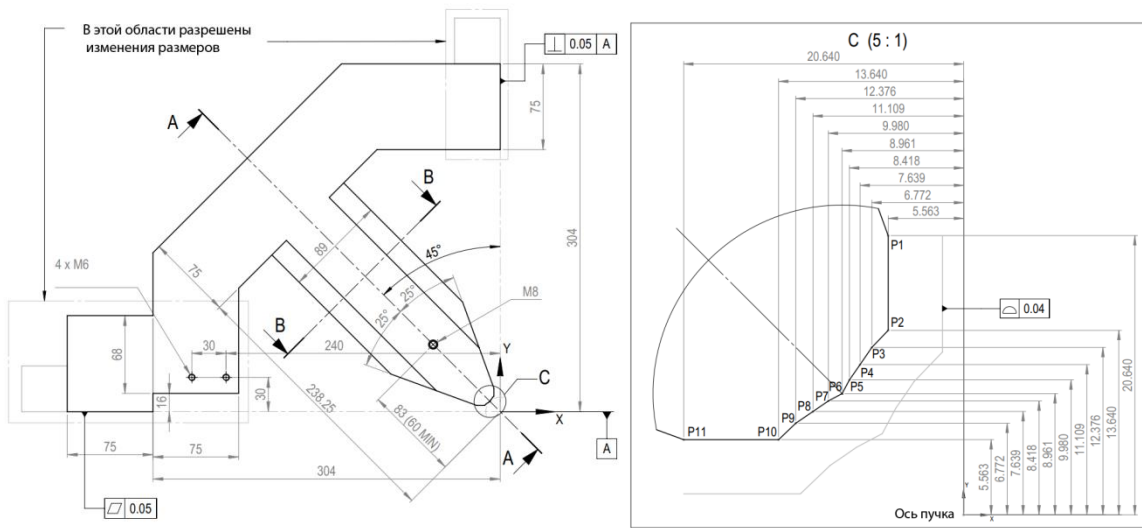


Рисунок 4. Сечение четвертой части ярма и предварительный профиль наконечника квадруполя QF6

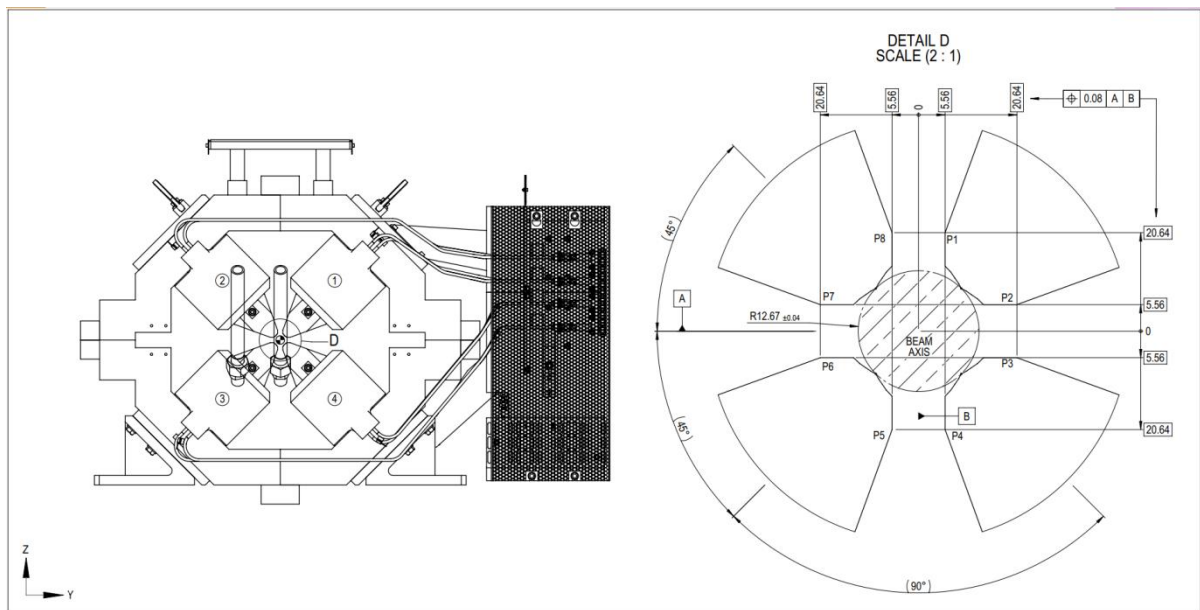


Рисунок 5. Расположение полюсов квадруполя среднего поля QF6.
Расстояние между полюсами

Таблица 4. Технические характеристики квадрупольного среднего градиента

| Параметр | Требование / значение | | Ед. изм. |
|--|---|-----------------------|-----------------|
| градиент поля | При токе 100 А | 90; | Тл/м |
| Длина полюса магнита | | 374,5 | Мм |
| материал магнитного полюса | Низкоуглеродистая сталь, коэрцитивная сила не более | 80 | А/м |
| Предельная габаритная длина магнита вдоль пучка | не более | 442 | мм |
| Однородность магнитного поля (состав гармоник поля при номинальном токе) | Гармоника | Величина | Ст. откл |
| | Дипольная гармоника | 0 | |
| | Квадрупольная | 10 000 | |
| | Секступольная | 0 | 3,1 |
| | Октупольная | 0 | 2,5 |
| | Декапольная | 0 | 2,2 |
| | 12-польная | 1,06 | 1,8 |
| | 14-польная | 0 | 1,5 |
| | 16-польная | 0 | 1,2 |
| | 18-польная | 0 | 1,0 |
| | 20-польная | минус 5,0 | 0,9 |
| | 22-польная | 0 | 0,7 |
| | 24-польная | 0 | 0,5 |
| | 26-польная | 0 | 0,5 |
| | 28-польная | 4,3 | 0,5 |
| | 30-польная | 0 | <0,1 |
| | 32-польная | 0 | <0,1 |
| 34-польная | 0 | <0,1 | |
| 36-польная | Минус 0,9 | <0,1 | |
| Параметры медного проводника: | | | |
| Сечение проводника | | 6×6 | мм ² |
| Диаметр канала охлаждения | | 3 | мм |
| Материал проводника | Бескислородная медь М06 по ГОСТ 859-2014 | | |
| Сопротивление удельное | | $1,78 \times 10^{-8}$ | Ом × м |
| Толщина изоляции между витками | Не менее | 0,5 | мм |
| Пробивное напряжение изоляции катушки | Не менее | 2,0 | кВ |
| Испытательное давление воды катушки | Не менее | 40 | бар |
| Радиационная стойкость компонент (изоляция, шланги и т.д.) | не менее | 10^7 | Грей |

5. Диполь-квадруполь

Использование магнитов с совмещёнными функциями или диполь-квадруполей. позволяет одновременно реализовать поворот и фокусировка пучка. Постоянный режим работы магнитов позволяет изготавливать конструкцию не из шихтованного железа, а монолитной.

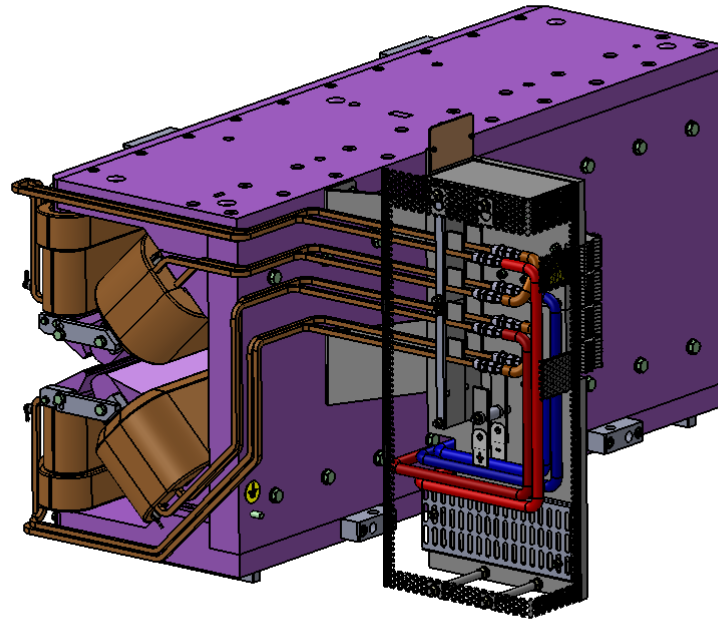


Рисунок 6. Эскизный вид диполь-квадрупольного магнита

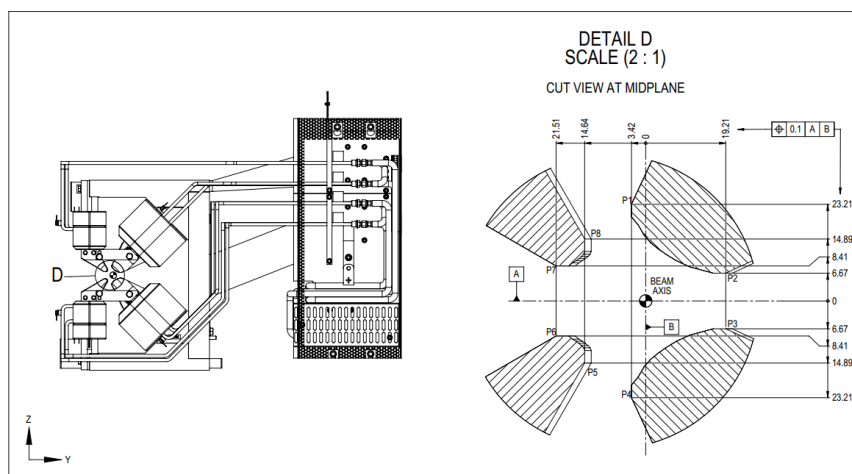


Рисунок 7. Расположение полюсов диполь-квадруполя DQ-2. Зазор между полюсами.

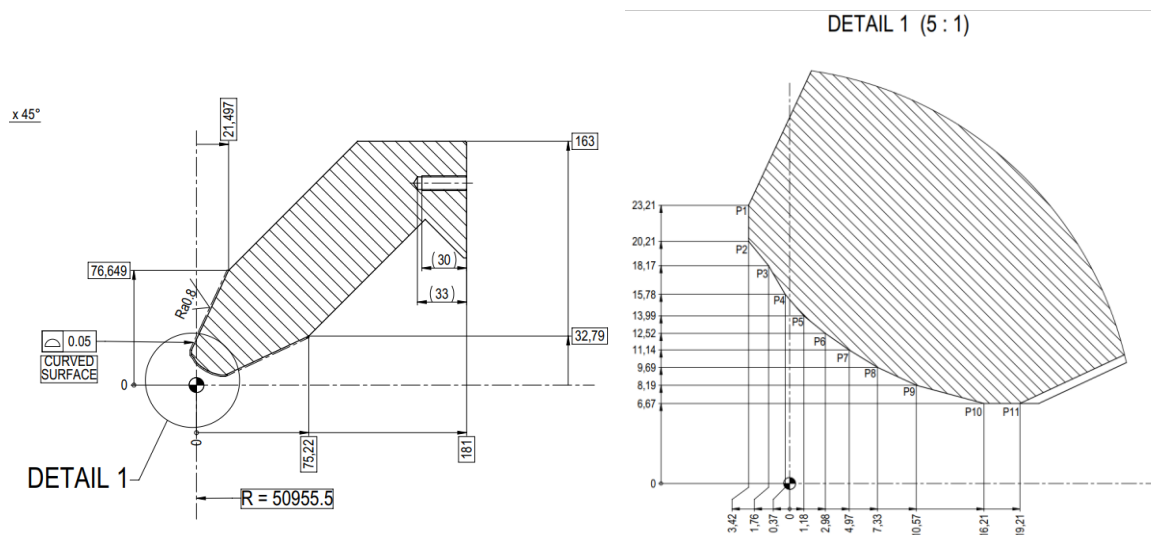


Рисунок 8. Основной полюс диполь-квадруполя (предварительные размеры)

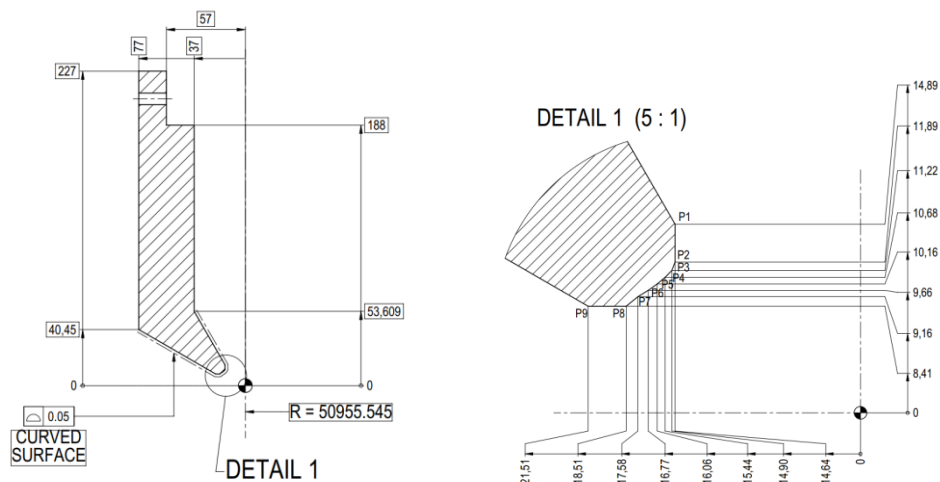


Рисунок 10. Дополнительный полюс диполь-квадруполя. Предварительный профиль наконечника.

Таблица 5. Технические характеристики диполь-квадруполя

| Параметр | Требование / значение | | Ед. изм. |
|--------------------------------|---|-----------------------|-----------------|
| магнитное поле | При токе 100 А, не менее | 0,2617; | Тл |
| Градиент поля макс | При токе 100 А, не менее | 31,09 | Тл/м |
| материал магнитного полюса | Низкоуглеродистая сталь, коэрцитивная сила не более | 80 | А/м |
| длина магнитного полюса | | 400 | мм |
| Предельная габаритная длина | Не более | 470 | мм |
| Параметры проводника | | | |
| Сечение проводника | | 6.5×6.5 | мм ² |
| Диаметр канала охлаждения | | 4 | мм |
| Материал проводника | Бескислородная медь М0б по ГОСТ 859-2014 | | |
| Сопротивление удельное | | 1,78×10 ⁻⁸ | Ом × м |
| Толщина изоляции между витками | Не менее | 0,5 | мм |

| | | | |
|--|-------------------------|-----------------------|-----------------|
| Пробивное напряжение изоляции катушки | Не менее | 2,0 | кВ |
| Испытательное давление воды катушки | Не менее | 40 | бар |
| Витков основного полюса | точно | 53 | витка |
| дополнительного полюса | точно | 13 | ВИТКОВ |
| Корректирующая катушка | | | |
| Сечение проводника | | 2x0.9 | мм ² |
| Материал проводника | Электротехническая медь | | |
| Сопротивление удельное | | 1,78x10 ⁻⁸ | Ом ×м |
| Толщина изоляции между витками | Не менее | 0,5 | мм |
| Пробивное напряжение изоляции катушки | Не менее | 2,0 | кВ |
| Число витков дополнительного полюса | | 88 | ВИТКОВ |
| Радиационная стойкость компонент магнита (изоляция, шланги и т.д.) | не менее | 10 ⁷ | Грей |

6. Секступоль

Каждый из секступолей имеет на полюсах две катушки - основную и корректирующую. Корректирующие катушки могут управляться индивидуально, компенсируя искажения орбиты и служат корректором.

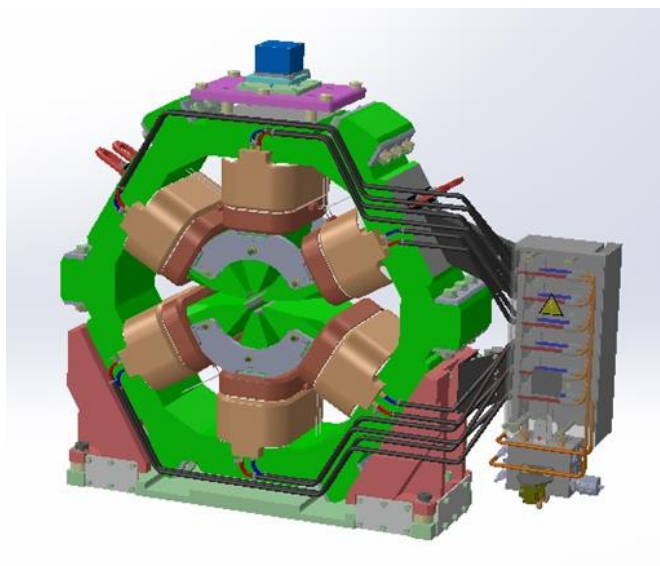


Рисунок 10. Эскизный вид секступоля с основными и корректирующими катушками

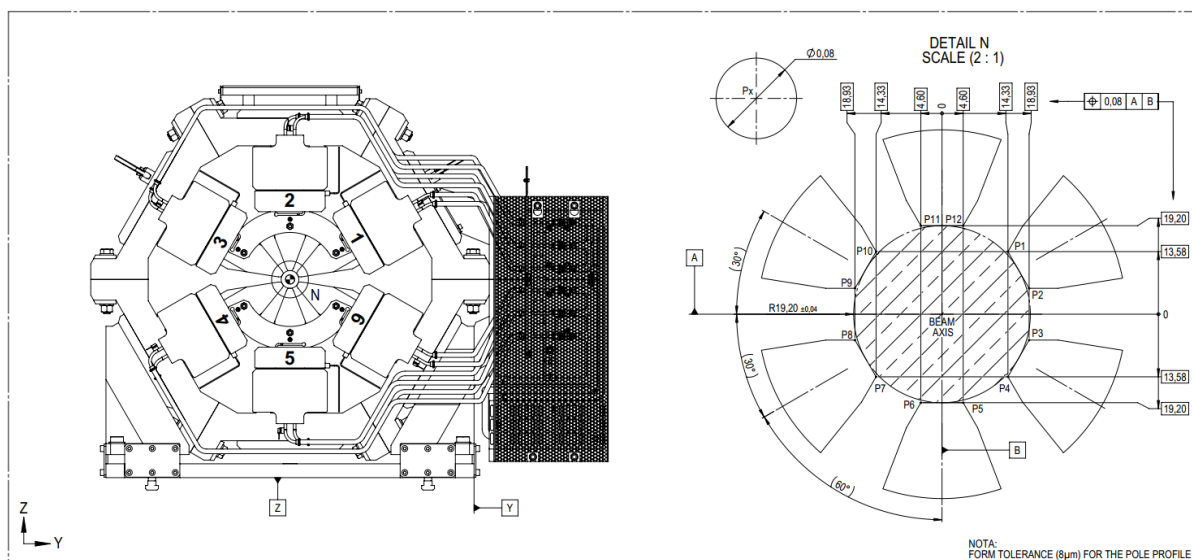


Рисунок 11. Расположение полюсов секступоля.
Зазор между полюсами

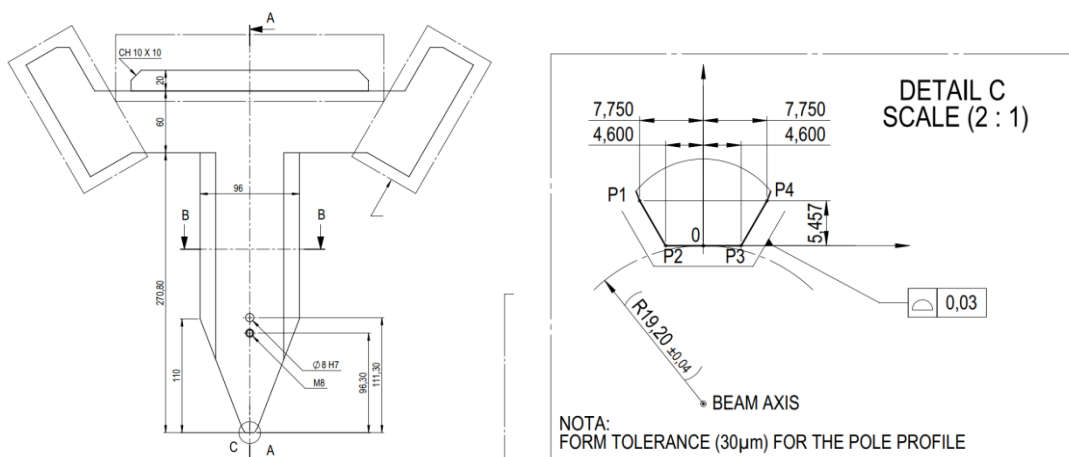


Рисунок 12. Сечение полюса секступоля

Таблица 6. Технические характеристики секступоля

| Параметр | Требование / значение | | Ед. изм. |
|--------------------------------------|--|----------|-------------------|
| градиент магнитного поля | при токе 50 А | 1700 | Тл/м ² |
| длина полюса | | 166 | мм |
| материал магнитного полюса | Низкоуглеродистая сталь, коэрцитивная сила не более | 80 | А/м |
| Предельная габаритная длина по пучку | не более | 232 | мм |
| | Гармоника | Величина | Ст. откл |
| | b ₁ | 0 | 4.9 |
| | b ₂ | 0 | 4.2 |
| | b ₃ | 10000 | 3.1 |
| | b ₄ | 0 | 2.5 |
| | b ₅ | 0 | 2.2 |
| | b ₆ | 0 | 1.8 |
| | b ₇ | 0 | 1.5 |
| | b ₈ | 0 | 1.2 |

| | | | |
|--|--|-----------------------|-----------------|
| | b_9 | 42 | 1.0 |
| | b_{10} | 0 | 0.86 |
| | b_{11} | 0 | 0.,72 |
| | b_{12} | 0 | 0,54 |
| | b_{13} | 0 | 0,47 |
| | b_{14} | 0 | 0,37 |
| | b_{15} | минус 16 | <0,3 |
| | b_{22} | 0,3 | <0,1 |
| Параметры медного отожжённого проводника: | | | |
| Основная катушка | | | |
| Сечение проводника | | 6×6 | мм ² |
| Диаметр канала охлаждения | | 3 | мм |
| Материал проводника | Бескислородная медь М0б по ГОСТ 859-2014 | | |
| Сопротивление удельное | | $1,78 \times 10^{-8}$ | Ом ×м |
| Толщина изоляции между витками | Не менее | 0,5 | мм |
| Пробивное напряжение изоляции катушки | Не менее | 2,0 | кВ |
| Испытательное давление воды катушки | Не менее | 40 | бар |
| Число витков | | 51 | виток |
| Корректирующая катушка | | | |
| Сечение проводника | | 2x0.9 | мм ² |
| Материал проводника | Электротехническая медь | | |
| Сопротивление удельное | | $1,78 \times 10^{-8}$ | Ом ×м |
| Толщина изоляции между витками | Не менее | 0,1 | мм |
| Пробивное напряжение изоляции катушки | Не менее | 2,0 | кВ |
| Число витков | | 390 | витков |
| Радиационная стойкость компонент (изоляция, шланги и т.д.) | не менее | 10^7 | Грей |

7. Корректор

Корректор обеспечивает дополнительную настройку пространственного положения пучка электронов и угла. Для обеспечения этих функций в корректоре возможно формирование дипольных и квадрупольных компонент.

В связи с необходимостью работы на частотах до 1 кГц ярмо изготавливается из шихтованного железа, конструктивная схема – «горизонтальный секступоль»

| | | | |
|--|-------------------------|-----------------------|-----------------|
| Количество катушек | | 2 | шт. |
| Сечение проводника | | 2x0.9 | мм ² |
| Материал проводника | Электротехническая медь | | |
| Сопротивление удельное | | 1,78x10 ⁻⁸ | Ом ×м |
| Толщина изоляции между витками | Не менее | 0,1 | мм |
| Пробивное напряжение изоляции катушки | Не менее | 2,0 | кВ |
| Число витков | | 627 | ВИТКОВ |
| Электрическое сопротивление | | 2,0 | Ом |
| Квадрупольные катушки | | | |
| Количество катушек | | 4 | шт. |
| Сечение проводника | | 2x0.9 | мм ² |
| Материал проводника | Электротехническая медь | | |
| Сопротивление удельное | | 1,78x10 ⁻⁸ | Ом ×м |
| Толщина изоляции между витками | Не менее | 0,1 | мм |
| Пробивное напряжение изоляции катушки | Не менее | 2,0 | кВ |
| Число витков | | 880 | ВИТКОВ |
| Сопротивление обмотки | | 2,5 | Ом |
| Сопротивление изоляции | не менее | 10 | МОм |
| Радиационная стойкость компонент (изоляция, шланги и т.д.) | не менее | 10 ⁷ | Грей |

8. Октуполь

Таблица 8. Технические характеристики октуполя

| Параметр | Требование / значение | Ед. изм. |
|---------------------------------------|---|-----------------------------|
| градиент магнитного поля | - | 44000 Гл/м ² |
| длина полюсов | | 90 мм |
| Предельная габаритная длина по пучку | не более | 114 мм |
| материал магнитного полюса | Низкоуглеродистая сталь, коэрцитивная сила не более | 80 А/м |
| Сечение проводника | | 6×6 мм ² |
| Диаметр канала охлаждения | | 3 мм |
| Материал проводника | Бескислородная медь М0б по ГОСТ 859-2014 | |
| Сопротивление удельное | | 1,78x10 ⁻⁸ Ом ×м |
| Толщина изоляции между витками | Не менее | 0,5 мм |
| Пробивное напряжение изоляции катушки | Не менее | 2,0 кВ |
| Испытательное давление воды катушки | Не менее | 40 бар |
| Число витков | | 36 ВИТКОВ |
| Радиационная стойкость компонент | не менее | 10 ⁷ Грей |

9. Источники питания магнитов

В конструкции источников питания должно быть не менее 2-х датчиков тока, один из которых должен обеспечивать передачу текущего значения тока в систему автоматизированного управления источника синхротронного излучения с частотой не менее 100 Гц.

Таблица 9. Требования к источникам питания магнитов

| Тип питаемого магнита | Диапазон напряжений | Диапазон токов | Разрядность установки тока, не менее | Предельное отклонение от заданного значения тока (в течении 10 часов) |
|--------------------------------|---------------------|----------------|--------------------------------------|---|
| Квадрупольи средние | 0-15 В | 0-110 А | 14 бит | Плюс-минус 10 мА |
| Квадрупольи большого градиента | 0-30 В | 0-110 А | 14 бит | Плюс-минус 20 мА |
| Октуполи | 0-5 В | 0-110 А | 14 бит | Плюс-минус 20 мА |

9.1 Источник питания секступоля

Таблица 10. Требования к источникам питания секступоля

| Параметр | Требование / значение | | Ед. изм. |
|---------------------------------------|--|----------------------------------|----------|
| Диапазон регулировки выдаваемого тока | | от 0 до 110 | А |
| Отклонение от заданного значения тока | не более | плюс минус 10 в течение 10 часов | мА |
| Разрядность установки тока | не менее | 14 | бит |
| Диапазон рабочих напряжений | не менее | от 0 до 15 | В |
| Интерфейс управления | по согласованному с Заказчиком протоколу | | |

9.2 Источник питания корректора

Источник питания корректора обеспечивает быстрое изменение тока в корректирующих катушках по команде системы автоматизированного управления источника синхротронного излучения.

Таблица 11. Требования к источникам питания корректора

| Параметр | Требование / значение | | Ед. изм. |
|---------------------------------------|-----------------------|------------|----------|
| Диапазон регулировки выдаваемого тока | | от -3 до 3 | А |
| Отклонение от заданного значения тока | не более | 1 | мА |
| Разрядность регулировки тока | не менее | 12 | бит |
| Диапазон рабочих напряжений | | от -5 до 5 | В |
| Частота установки тока | не менее | 10 | кГц |

9.3 Коммутатор источников питания

Коммутатор источников питания магнитов обеспечивает коммутацию источников питания и обмоток магнитов. Коммутатор предназначен для горячей замены источников питания магнитов в случае их отказов и неисправностей. Каждый коммутатор обслуживает один период накопительного кольца. В состав коммутатора входят датчики тока для каждого подключаемого магнитного элемента.

Таблица 12. Требования к коммутатору источников питания корректора

| Параметр | Требование / значение | | Ед. изм. |
|-------------------------------|--|-----|----------|
| Число каналов коммутации | не менее | 32 | шт |
| Предельный ток в одном канале | не менее | 120 | А |
| Время переключения канала | не более | 10 | мс |
| Интерфейс управления | по согласованному с Заказчиком протоколу | | |