

Сибирское отделение Российской Академии наук  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера

В.Н. Корчуганов, С.Ф. Михайлов, И.Н. Чуркин,  
А.Г. Стешов, Е.П. Семенов, А.Б. Огурцов,  
О.Б. Голубенко, Е.И. Антохин, В.В. Деменев,  
Д.А. Шведов, А.В. Бублей, Б.А. Довженко,  
Д.А. Скоробогатов

УСТАНОВКА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ  
МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
МУЛЬТИПОЛЕЙ SLS

ИЯФ 2000-72

НОВОСИБИРСК  
2000

Установка для прецизионных магнитных измерений  
мультиполей SLS

В.Н. Корчуганов, С.Ф. Михайлов, И.Н. Чуркин, А.Г. Стешов,  
Е.П. Семенов, А.Б. Огурцов, О.Б. Голубенко, Е.И. Антохин,  
В.В. Деменев, Д.А. Шведов, А.В. Бублей, Б.А. Довженко,  
Д.А. Скоробогатов

Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
630090, Новосибирск, Россия

Описана конструкция установки для прецизионного измерения параметров магнитного поля мультиполей SLS. Подробно рассматриваются методика измерений, источники погрешностей при измерениях. Приведены описания программного обеспечения и технологии измерений.

Rotating coil System for precision Magnetic measurement  
of SLS storage ring multipoles

V.N. Korchuganov, S.F. Mikhailov, I.N. Churkin, A.G. Steshov,  
E.P. Semenov, A.B. Ogurtsov, O.B. Golubenko, E.L. Antokhin,  
V.V. Demenev, D.A. Shvedov, A.V. Bublei, B.A. Dovzhenko,  
D.A. Skorobogatov

Budker Institute Of Nuclear Physics SB RAS  
630090, Novosibirsk, Russia

The magnetic measurement system (RCS) design is described. The measurement technique and the sources of measurement errors are concerning in detail. The descriptions of control programs and measurement technology are given.

©Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

## Введение

В PSI (Paul Sherer Institute, Швейцария) строится синхротронный источник SLS (Swiss Light Source) на энергию 2.4 ГэВ, периметром 280м. SLS состоит из линака на 100МэВ, бустерного кольца и накопительного кольца. Накопительное кольцо содержит 180 квадрупольных и 120 секstupольных линз и 36 диполей. В ИЯФ были изготовлены мультиполю для накопительного кольца: симметричные и несимметричные квадрупольные линзы с длинами 200, 320, 440 мм и симметричные и несимметричные секstupольные линзы с корректирующими катушками с длиной 200 мм.

Особенностью SLS являются очень жесткие требования на фокусировку электронного пучка, что приводит к повышенным требованиям на точность выставки элементов магнитной системы. Кольцо синхротрона состоит из 12 секторов, в каждом секторе по 4 гирдера, отличающиеся по длине и набору элементов. В этом синхротроне положение магнитной оси отдельных мультиполей не регулируется. Мультиполи группами по 5-8 элементов устанавливаются на рабочие гирдера по базовым поверхностям вдоль идеальной оси (377,000 мм по высоте и 15,000 мм по горизонтали) с высокой точностью (таблица 1, рис.1).

Базовыми поверхностями гирдера являются горизонтальные поверхности (3), на которые ставятся 4 опоры мультиполя (4), и вертикальная поверхность шпоночного паза (2), к которой мультиполь прижимается. Положение мультиполя на гирдере фиксируется горизонтальными толкателями (6) и вертикальными прижимами (5).

Измерительная система должна обеспечивать точность измерения гармоник магнитного поля относительно основной гармоники не хуже  $2 \cdot 10^{-4}$  для квадрупольных и  $5 \cdot 10^{-4}$  для секstupольных, точность измерения положения магнитной оси мультиполя  $\pm 5$  мкм, точность измерения угла между магнитной и геометрической плоскостью мультиполя  $\pm 0.35$  мрад.

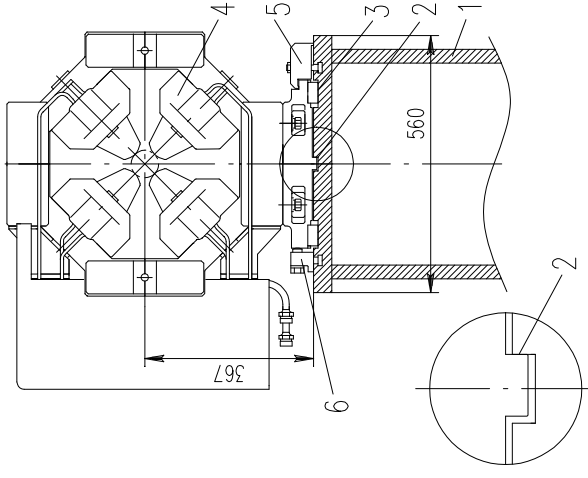


Рис. 1. Квадруполь накопительного кольца SLS на гирдере:

1 – гирдер, 2 – вертикальная базовая поверхность (шпоночный паз), 3 – горизонтальная базовая поверхность, 4 – квадруполь, 5 – вертикальный прижим, 6 – горизонтальный толкатель.

Таблица 1. Основные требования на параметры мультиполей

	Квадрупольные линзы	Секstupольные линзы
Магнитная сила	20 Т/м	640 Т/м <sup>2</sup>
$\pm \Delta X$	$\pm 30$ мкм	$\pm 30$ мкм
$\pm \Delta Y$	$\pm 30$ мкм	$\pm 30$ мкм
$\pm \Delta \Phi$	$\pm 0.35$ мрад	$\pm 0.35$ мрад
$\sigma_{(\Delta V/V)}$ при R=28mm	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$

## Установка для магнитных измерений мультиполей SLS

### 1. Основы теории

Измерения положения магнитной оси, угла и гармоник проводились с помощью хорошо известного метода радиальной вращающейся катушки. Абсолютное значение величины магнитного поля определялось специальным набором холловских датчиков.

Радиальная катушка при вращении в апертуре мультиполя вокруг оси измеряет  $\theta$ -составляющую магнитного поля.

$$B = B_{\theta} = \sum_n (-A_n \cdot \sin(n\theta) + B_n \cdot \cos(n\theta)) \cdot r^{n-1}$$

Наводимое на измерительную катушку напряжение:

$$U = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d(\int B \cdot dS)}{dt}$$

$$U = -L \cdot \frac{d}{dt} \sum_n (-A_n \cdot \sin(n\theta) + B_n \cdot \cos(n\theta)) \cdot \frac{R^n}{n}$$

В измерительной системе использовалось пошаговое вращение катушки, в этом случае наводимое напряжение:

$$U = L \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot \sum_n (A_n \cdot \cos(n\theta(t)) + B_n \cdot \sin(n\theta(t))) \cdot R^n$$

$$I = \int U \cdot dt = L \cdot \int \frac{d\theta}{dt} \cdot \sum_n (A_n \cdot \cos(n\theta(t)) + B_n \cdot \sin(n\theta(t))) \cdot R^n \cdot dt$$

Переходя к интегрированию по углу:

$$I(\theta + d\theta) = L \cdot \int_{\theta}^{\theta+d\theta} R^n \cdot (A_n \cdot \cos(n\theta) + B_n \cdot \sin(n\theta)) \cdot d\theta \quad (1)$$

$$I(\theta + d\theta) = 2L \cdot \sum_n R^n \cdot \frac{\sin(n \cdot d\theta)}{n} (A_n \cdot \cos(n(\theta + d\theta)) + B_n \cdot \sin(n(\theta + d\theta)))$$

Каждому значению интеграла (I) ставится в соответствие угол катушки ( $\theta + d\theta$ ).

Получаемые угловые зависимости раскладываются в ряд Фурье по гармоникам ( $B_n, A_n$ ), которые отражают свойства магнитного поля.

### 2. Общий вид установки и основные элементы

Для проведения измерений параметров мультиполей SLS в ИЯФ был создан специальный стенд магнитных измерений, аналогичная

установка была поставлена в SLS (PSI) для проведения окончательных магнитных измерений мультиполей перед выставкой магнитов на кольцо.

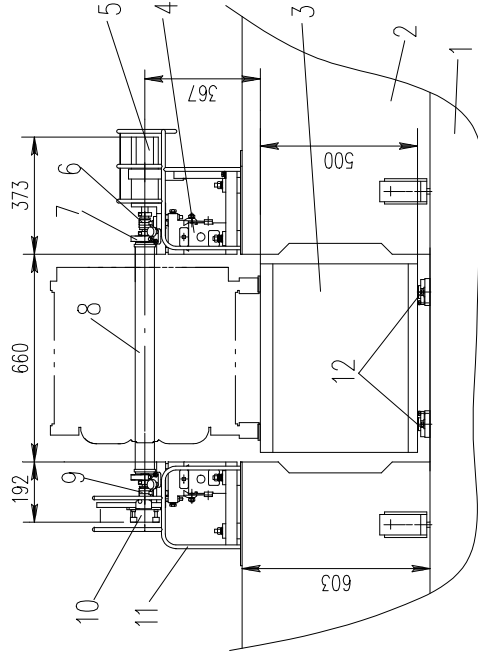


Рис. 2. Общий вид измерительного стенда:

1 – бетонное основание, 2 – бетонный блок, 3 – измерительный гирдер, 4 – опора катушки, 5 – шаговый двигатель, 6 – соединительная муфта шагового двигателя, 7 – ролик, 8 – измерительная катушка, 9 – соединительная муфта измерителя угла поворота, 10 – измеритель угла поворота, 11 – защитное ограждение, 12 – сферические опоры гирдера.

Установки абсолютно аналогичны, существуют лишь небольшие различия в условиях размещения систем (рис.2). На бетонном основании (1) жестко закреплены 2 бетонных блока (2), между которыми установлен измерительный гирдер (3) на 4-х сферических опорах (12). В ИЯФ бетонное основание установки расположено на песочной подушке, демфирующей механические колебания пола. В SLS бетонное основание стоит на 3-х специальных опорах на общем бетонном полу. Гирдер выставляется в горизонтальный уровень и закрепляется к основанию. Измерения мультиполей в ИЯФ проводились на гирдере из мягкой стали, а в PSI на двух гирдерах: мягком и с калеными вставками по базовым поверхностям. Каленные вставки препятствуют износу базовых поверхностей гирдера при многократных постановках мультиполей. Оба типа гирдеров для измерительных стенов были изготовлены в Швеции. Точность изготовления гирдера по базовым поверхностям ~5 мкм.

Опоры (4) для измерительной катушки установлены по обе стороны гирдера на бетонные блоки (2). Опоры катушки имеют возможность регулировки по высоте (4мм) и по горизонтали ( $\pm 5$  мм), что позволяет совместить ось вращения катушки с положением идеальной оси.

Измеряемый мультиполю устанавливается на гирдер по базовым поверхностям и катушка вводится в апертуру магнита (Приложение 1). Катушка с роликами устанавливается на специальные призмы, расположенные на опорах. Соединительные муфты (6,9) обеспечивают передачу кругового движения от шагового двигателя (5) к измерительной катушке (8) и далее к измерителю угла поворота (10). Муфты гасят перпендикулярные механические колебания при несоосности валов шагового двигателя, катушки и измерителя угла.

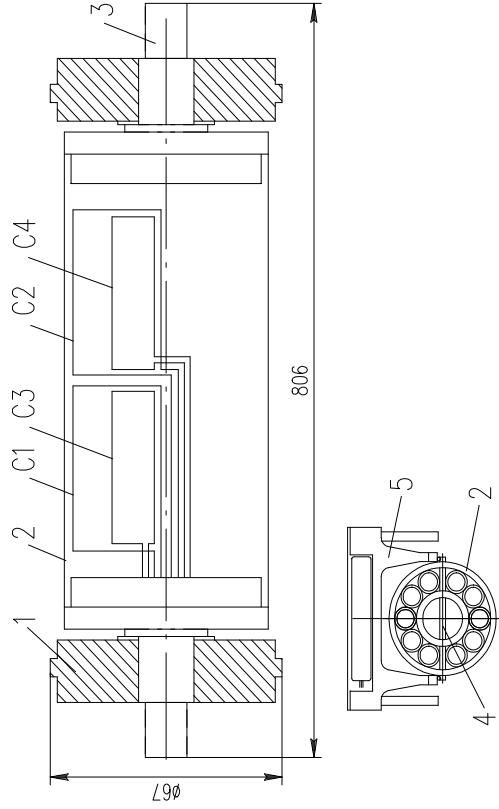


Рис. 3. Измерительная катушка.

1 – ролик, 2 – защитный текстолитовый корпус, 3 – вал, 4 – многослойная текстолитовая пластина с катушками, 5 – уровень.

Измерительная катушка состоит из четырех независимых секций содержащих по 8 витков, выполненных на многослойном фольгированном текстолите с толщиной 10 мкм (рис3). Секции C1 и C2 имеют внешний размер R и длину 1/2 L каждая, секции C3 и C4 имеют внешний размер 1/2 R и те же длины. Включая секции полного и половинного радиуса по разностной схеме можно компенсировать вклад в сигнал основной гармоники мультиполю и увеличить точность измерения остальных гармоник (подробнее это описано ниже). Наличие

в конструкции катушки двух секций одного радиуса расположенных последовательно по длине катушки позволяют проводить магнитные измерения мультиполю вдоль "по половинкам" используя секции C1–C3 и C2–C4, это позволяет получить отклонение магнитной оси мультиполю в продольном направлении.

Катушка выставляется по горизонтальному уровню гирдера с помощью специального механического уровня (5). Существует необходимость периодически проводить калибровку измерительной катушки, то есть определять угол между механической плоскостью катушки, на которую устанавливается уровень (совпадает с плоскостью гирдера) и электрической плоскостью катушки, определяемой расположением витков. Калибровку необходимо проводить для каждого типоразмера мультиполю поэтому, что этот угол может меняться вдоль катушки, подробнее калибровка катушки описана в Приложении 2.

Сигналы со всех секций катушки поступают в усилитель/коммутатор, обеспечивающий требуемую схему измерения, быстродействие и коэффициент усиления. Блок позволяет коммутировать 8 входов восемью способами для получения нужной конфигурации катушек, для суммирования или вычитания сигналов с измерительных катушек. Кроме того, позволяет выбрать коэффициенты сложения входных сигналов для обеспечения квадратной или секступольной компенсации. Усиление сигналов производится по двум каналам, для одновременного отслеживания основного и скомпенсированного сигнала. В каждом канале имеется 4 градации коэффициента усиления: 10, 100, 1000, 10000. (Схема усилителя-коммутатора в Приложении 3.)

Для вращения катушки используется шаговый двигатель SigPositex с редуктором 1:10, измеритель угла поворота ROD-250. Шаговый двигатель обеспечивает точность вращения до 0.6 миллирадиан, а измеритель угла поворота измеряет угловое положение катушки с точностью 0.3 микрорадиан. Сигналы с катушек снимаются 8-ми канальным 12 разрядным АЦП с минимальным временем измерения 10 мкс/канал.

Таким образом, катушка вращается шаговым двигателем, с помощью измерителя угла поворота контролируется ее положение, сигнал с катушки через усилитель/коммутатор поступает на АЦП, введенным в PC совместимую ЭВМ. Управляющая программа работает в среде MS-DOS и позволяет задавать ток питания обмоток мультиполю, коммутацию секций измерительной катушки, параметры вращения катушки, контролирует угловое положение катушки, снимает оцифрованное напряжение. После проведения измерений этой же

программой можно математически обработать результаты и получить гармонический состав магнитного поля, положение магнитной оси, угол наклона магнитной плоскости мультиполя. Подробнее программа описана в Приложении 4.

Точная выставка оси измерительной катушки относительно базовых поверхностей гирдера: 377,000 мм от горизонтальной и 15,000 мм от вертикальной производятся опорами катушки с помощью механического шаблона (Рис.4). Два комплекта шаблонов были изготовлены для стенов в ИЯФ и PSI.

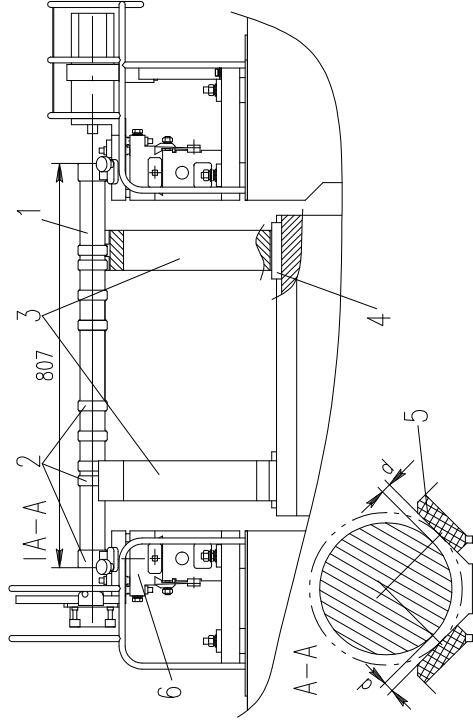


Рис. 4. Выставка опор катушки по механическому шаблону: 1 – вал, 2 – точные диаметры, 3 – шаблонные стойки, 4 – разрезная шпонка, 5 – переменные поверхности опор катушки, 6 – опоры катушки.

Шаблонный комплект состоит из двух стоек (3) и вала (1). Стойки устанавливаются на измерительный гирдер на расстоянии ~30 мм от краев гирдера по опорным поверхностям. Прижим стойки к поверхности шпоночного паза гирдера осуществляется с помощью разрезной шпонки (4), обеспечивающей вынос поверхности паза, и специальных толкателей.

На призмённые поверхности стоек опускается вал, имеющий несколько высокоточных диаметров (2). Крайние диаметры вала находятся над призмёнными поверхностями опор для измерительной катушки. Контроль за положением опор относительно вала шаблона осуществляется измерением расстояния  $d$  (см. сечение А-А) с помощью микрометрических индикаторов и концевых мер. (Приложение 5.)

### 3. Методика измерений и расчет основных характеристик магнита

При вращении катушки внутри одного шага считается напряжением, наводимое на катушку, всего ~ 4000 точек, шаг  $2d\theta \sim 5^\circ$ , количество шагов – 85. Получаемая осциллограмма напряжения интегрируется, и полученная величина соответствует углу поворота  $\theta+d\theta$ . Вводится Sin-поправка (см. выражение 1), связанная с особенностью пошагового измерения.

Кривая обрабатывается кубичным сплайном, для чего все углы поворота приводятся к среднему углу и вводится поправка, учитывающая отличие текущего угла от среднего. После этой интерполяции проводится разложение функции в ряд Фурье по гармоникам.

Для увеличения точности измерений применяется разностная схема включения катушек – внешняя (большая) катушка включается навстречу внутренней (малой) катушке, сигнал с которой усиливается так, чтобы разность для основной компоненты поля была минимальной. В этом случае точность измерения гармоник возрастает примерно в 100–1000 раз.

В разностном сигнале угловое отклонение между большой и маленькой катушками ( $\phi$ ) незначительно и особенность вычисления коэффициентов гармоник.

$$I_d = I_1 - I_s = 2L \sum_n \frac{\sin(n \cdot d\theta)}{n} (A_n \cos(n(\theta + d\theta)) + B_n \sin(n(\theta + d\theta))) R_1^n - (A_n \cos(n(\theta + d\theta + \phi)) + B_n \sin(n(\theta + d\theta + \phi))) R_s^n.$$

Для случая  $R_s = R_1/2$ :

$$A_n^* = A_n \frac{1}{1 - \alpha/2^n}, \quad B_n^* = B_n \frac{1}{1 - \alpha/2^n},$$

где  $A_n$  и  $B_n$  коэффициенты ряда Фурье при разложении разностного сигнала, а  $A_n^*$  и  $B_n^*$  – реальные коэффициенты гармоник,  $\alpha$  – коэффициент усиления сигнала с малой катушки. Для квадрупольных магнитов  $\alpha \approx 4$ , для секступольных магнитов  $\alpha \approx 8$ .

$$x_q = R_1 \frac{B_1}{B_2}, \quad y_q = R_1 \frac{A_1}{B_2}; \quad x_s = \frac{R_1 B_2}{2 B_3}, \quad y_s = \frac{R_1 A_2}{2 B_3}.$$

Координаты магнитной оси мультипола определяются из младших коэффициентов гармонического разложения ( $A_1$  и  $B_1$  – для квадруполей,  $A_2$  и  $B_2$  – для секступолей).

При определении вертикального положения магнитной оси учитывалась температурная поправка.

Для серийных магнитов положение магнитной оси пересчитывалось для температуры 24 градуса с учетом температурных полей стенда при механической выставке ( $T_{\text{pattern}}$ ,  $T_{\text{support1}}$ ,  $T_{\text{beton1}}$ ,  $T_{\text{girder1}}$ ) и магнитных измерений ( $T_{\text{magnet}}$ ,  $T_{\text{support2}}$ ,  $T_{\text{beton2}}$ ,  $T_{\text{girder2}}$ ), а также температуры  $T_{\text{pattern0}}$  (21°C для ИЯФ и 23°C для SLS), при которой производилось измерение высоты механического шаблона.

$$\Delta L = H_{\text{pattern}} \cdot \alpha_{\text{pattern}} \cdot (T_{\text{pattern}} - T_{\text{pattern0}}) +$$

$$H_{\text{support}} \cdot \alpha_{\text{support}} \cdot (T_{\text{support2}} - T_{\text{support1}}) +$$

$$H_{\text{beton}} \cdot \alpha_{\text{beton}} \cdot (T_{\text{beton2}} - T_{\text{beton1}}) -$$

$$H_{\text{girder}} \cdot \alpha_{\text{girder}} \cdot (T_{\text{girder2}} - T_{\text{girder1}}) -$$

$$H_{\text{magnet}} \cdot \alpha_{\text{magnet}} \cdot (T_{\text{magnet}} - T_{\text{normal}}).$$

Коэффициент линейного расширения был выбран одинаковым для всех элементов  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ .

Для серийных магнитов положение магнитной оси пересчитывалось для температуры 24 градуса с учетом температурных полей стенда при механической выставке и магнитных измерений, а также температуры, при которой производилось измерение высоты механического шаблона.

Угол магнитной плоскости мультипола относительно механической плоскости определялся из основного сигнала:

$$\varphi_q = \arctg A_2 / B_2, \quad \varphi_s = \arctg A_3 / B_3.$$

Для определения угла мультипола необходимо знать калибровочный угол измерительной катушки. Значение этого угла вводится в программу математической обработки измерений и периодически проверяется по специальной методике (Приложение 2).

#### 4. Точность измерений

Существует несколько источников погрешностей при измерении параметров мультиполей. На измерения оказывает сильное влияние нестабильность процессов во время измерения: нестабильность

источника, изменение температуры магнита, механические колебания и вибрации. Известно, что нестабильность источника питания и механические причины приводят к искажению коэффициентов, наличие температурного градиента, вызванного нагревом (охлаждением) полюсов магнита обмотками, сильно изменяет измеряемый угол наклона магнитной плоскости мультипола (Приложение 6). Кроме того, существуют ограничения на точность измерений, связанные с механической точностью изготовления и юстировки элементов установки.

Источники систематических ошибок помечены \*.

1) Механическая точность изготовления элементов:

a) \* точность изготовления шаблонов:  $\pm 1 - 2 \text{ }\mu\text{m}$  для положения оси (в вертикальном и горизонтальном направлениях)

b) \* точность изготовления диаметров вала:  $\pm 2 \text{ }\mu\text{m}$ , что вызывает смещение позиции оси  $\pm 1.5 \text{ }\mu\text{m}$

c) \* точность изготовления диаметров роликов и валов измерительной катушки  $\pm 2 \text{ }\mu\text{m}$  ( $\pm 2 \text{ }\mu\text{m}$  точность изготовления внешнего и внутреннего диаметра ролика). Во-первых, это дает смещение вертикального положения оси на  $\pm 2 \text{ }\mu\text{m}$  при установке измерительной катушки на призмы опор. Во-вторых, это приводит к механическим вибрациям. 10  $\mu\text{m}$  вибрации (вал в ролике, колебание катушки) дают погрешность  $0.2 \cdot 10^{-4}$  для коэффициентов гармоник и  $\pm 0.6 \text{ }\mu\text{m}$  для позиции оси.

d) \* точность механического уровня  $\sim 0.05 \text{ }\mu\text{rad}$ .

2) Точность выставки механики:

a) \* выставка опор катушки с помощью точного механического шаблона  $\pm 2.5 \text{ }\mu\text{m}$  для зазоров между призмой и точным диаметром вала и, соответственно  $\pm 1.5 \text{ }\mu\text{m}$  для позиции оси. При изменении правил выставки механики эта ошибка становится случайной.

b) \* точность установки разрезной шпонки на гирдере, точность изготовления плоскости шпонки дает  $\pm 2 \text{ }\mu\text{m}$  смещения позиции оси по горизонтали. Если условия выставки шпонки не сохраняются (например разные пользователи) эта ошибка может стать случайной.

- с) Уровень на измерительной катушке выставляется с точностью  $\sim 0.05 - 0.1 \mu\text{grad}$ . Мы можем сделать эту ошибку дважды при калибровке катушки. Суммарная ошибка может быть  $\sim 0.1 - 0.2 \mu\text{grad}$ .
- d) Точность измерения температуры различных элементов  $\sim 0.1^\circ$ , это дает  $\pm 1 \mu\text{m}$  для вертикальной позиции оси.
- 3) Точность работы оборудования:
- а) \* точность определения угла определителем угла поворота  $0.3 \mu\text{grad}$
- б) \* линейность усилителя  $10^{-4}$  и дает пренебрежимо малую погрешность.
- с) \* 12-ти разрядное АЦП дает точность измерения сигнала  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  для полной шкалы.
- d) \* Нестабильность источника питания  $\sim 10^{-4}$ , что дает для коэффициентов гармоник погрешность  $\sim 0.2 \cdot 10^{-4}$  и  $\pm 0.6 \mu\text{m}$  для позиции оси (для квадруполей и  $0.3 \mu\text{m}$  для секстиполей).
- e) нестабильность температуры (нагрев или охлаждение в течении измерительного цикла). Изменение температуры магнита на  $5-10^\circ\text{C}$  в течении измерительного цикла дает изменение угла наклона на  $0.3 - 0.5 \text{ mrad}$  (данные экспериментов). Термостабильность позволяет существенно понизить погрешность измерения угла до  $\sim 0.02 - 0.05 \text{ mrad}$ .
- 4) Математическая обработка
- а) Экстраполяция кубическим сплайном и FFT: случайная ошибка уменьшается в  $\sim 60$  раз.
- б) При использовании разностной схемы включения катушек точность определения коэффициентов гармоник возрастает в  $100 - 1000$  раз до  $(4 - 10) 10^{-7}$ .

Таблица 2. Основные требования на параметры мультиполей

	Воспроизводимость	Точность	Чувствительность
Кэф-ты гармоник	$\pm 0.5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0.5 \cdot 10^{-4}$	квадруполи $0.3 \cdot 10^{-4}$ секстиполи $0.5 \cdot 10^{-4}$
Положение оси	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm (8 - 10) \mu\text{m}$	$1 \mu\text{m}$
Угол наклона	$0.05 \text{ mrad}$	$\pm 0.35 \text{ mrad}$	$0.03 \text{ mrad}$

## 5. Статистические данные по измерениям параметров мультиполей в ИЯФ и в PSI

Данные измерений, проведенные как в ИЯФе, в процессе их производства для контроля, так и перед непосредственным установкой мультиполей на гирдера в SLS, показывают, что параметры мультиполей удовлетворяют заданным требованиям и имеется хорошее совпадение между измерениями, выполненными в ИЯФе и SLS.

В таблице представлено сравнение средних значений и стандартных отклонений положений магнитных осей и углов наклона магнитной плоскости каждой группы мультиполей, измеренных в ИЯФ и SLS.

Тип секстиполя	$\langle x \rangle \pm \sigma_x$ , BINP (SLS), $\mu\text{m}$	$\langle y \rangle \pm \sigma_y$ , BINP (SLS), $\mu\text{m}$	$\langle \varphi \rangle \pm \sigma_\varphi$ , BINP (SLS), mrad
SR	$1 \pm 11$ ( $3 \pm 12$ )	$8 \pm 9$ ( $18 \pm 11$ )	$-0.02 \pm 0.19$ ( $-0.07 \pm 0.26$ )
SRW	$0 \pm 9$ ( $-1 \pm 15$ )	$4 \pm 11$ ( $8 \pm 11$ )	$0.08 \pm 0.18$ ( $-0.02 \pm 0.28$ )
QA	$-1 \pm 16$ ( $0 \pm 17$ )	$8 \pm 13$ ( $19 \pm 14$ )	$0.126 \pm 0.16$ ( $-0.01 \pm 0.16$ )
QAW	$-4 \pm 8$ ( $-7 \pm 11$ )	$6 \pm 12$ ( $14 \pm 14$ )	$-0.02 \pm 0.20$ ( $0.02 \pm 0.17$ )
QB	$2 \pm 14$ ( $2 \pm 14$ )	$8 \pm 11$ ( $13 \pm 12$ )	$-0.02 \pm 0.17$ ( $0.00 \pm 0.17$ )
QBW	$-3 \pm 11$ ( $-4 \pm 17$ )	$5 \pm 15$ ( $5 \pm 18$ )	$-0.02 \pm 0.21$ ( $0.01 \pm 0.16$ )
QC	$-2 \pm 11$ ( $1 \pm 12$ )	$7 \pm 11$ ( $14 \pm 12$ )	$0.03 \pm 0.17$ ( $0.08 \pm 0.15$ )
QCW	$-2 \pm 14$ ( $0 \pm 12$ )	$-2 \pm 14$ ( $2 \pm 12$ )	$-0.09 \pm 0.16$ ( $0.03 \pm 0.13$ )

В таблице приведены по типам мультиполей параметры магнитных полей (основные симметричные коэффициенты гармоник и коэффициенты гармоник, определяемые геометрическими точностями сборки).

Тип сексту-поля	$\langle B_1 \rangle$ $\pm \sigma_{B_1}$	$\langle A_1 \rangle$ $\pm \sigma_{A_1}$	$\langle B_4 \rangle$ $\pm \sigma_{B_4}$	$\langle A_4 \rangle$ $\pm \sigma_{A_4}$	$\langle B_5 \rangle$ $\pm \sigma_{B_5}$	$\langle B_9 \rangle$ $\pm \sigma_{B_9}$	$\langle B_{15} \rangle$ $\pm \sigma_{B_{15}}$	$\langle B_{21} \rangle$ $\pm \sigma_{B_{21}}$
SR	-1,05 $\pm 0,76$	0,08 $\pm 0,63$	0,03 $\pm 0,52$	-0,38 $\pm 0,49$	0,17 $\pm 0,35$	-0,41 $\pm 0,08$	2,68 $\pm 0,05$	-2,37 $\pm 0,03$
SRW	-1,12 $\pm 0,83$	0,07 $\pm 1,18$	0,03 $\pm 0,44$	-0,46 $\pm 0,48$	-0,52 $\pm 0,36$	-0,29 $\pm 0,08$	2,63 $\pm 0,05$	-2,32 $\pm 0,04$

Тип квадр-поля	$\langle B_3 \rangle$ $\pm \sigma_{B_3}$	$\langle A_3 \rangle$ $\pm \sigma_{A_3}$	$\langle B_4 \rangle$ $\pm \sigma_{B_4}$	$\langle A_4 \rangle$ $\pm \sigma_{A_4}$	$\langle B_6 \rangle$ $\pm \sigma_{B_6}$	$\langle B_{10} \rangle$ $\pm \sigma_{B_{10}}$
QA	-0,02 $\pm 0,28$	-0,07 $\pm 0,29$	0,01 $\pm 0,19$	0,04 $\pm 0,14$	0,18 $\pm 0,13$	-0,62 $\pm 0,03$
QAW	0,07 $\pm 0,27$	-0,22 $\pm 0,34$	-0,09 $\pm 0,17$	-0,06 $\pm 0,12$	0,20 $\pm 0,11$	-0,59 $\pm 0,02$
QB	0,01 $\pm 0,22$	-0,24 $\pm 0,31$	0,00 $\pm 0,19$	-0,01 $\pm 0,08$	0,25 $\pm 0,07$	-0,42 $\pm 0,01$
QBW	-0,15 $\pm 0,25$	-0,13 $\pm 0,26$	0,00 $\pm 0,22$	-0,03 $\pm 0,06$	0,18 $\pm 0,04$	-0,38 $\pm 0,01$
QC	-0,06 $\pm 0,15$	-0,13 $\pm 0,32$	-0,03 $\pm 0,14$	0,00 $\pm 0,06$	0,21 $\pm 0,05$	-0,32 $\pm 0,02$
QCW	-0,04 $\pm 0,12$	-0,12 $\pm 0,13$	0,35 $\pm 0,16$	0,00 $\pm 0,06$	0,19 $\pm 0,04$	-0,29 $\pm 0,03$

## 6. Заключение

Магнитные измерения мультиполей накопительного кольца SLS проводились дважды в ИЯФ и PSI на описанной установке. Часть рабочих гирдеров накопительного кольца с установленными на них мультиполями проверялись на специальной измерительной системе (MJG), на которой определялось положение магнитной оси мультиполей. Все изготовленные мультиполю были приняты заказчиком и установлены в кольцо.

Установки для магнитных измерений, изготовленные в ИЯФ, позволят проводить прецизионные измерения параметров магнитного поля мультиполей, аналогичных мультиполям накопительного кольца SLS. В случае необходимости возможна небольшая доработка установок под другие размеры магнитов.

## Приложение 1

### Магнитные измерения

#### 1) Подготовка гирдера к установке мультиполя.

1. Промыть рабочие поверхности (шпоночный паз, основания).
2. Установить толкатели на заданные места (в зависимости от типа мультиполя). Толкатели с беспружинными головками установить со стороны забора (коммутации магнитов), толкатели с укороченными пружинными головками установить с противоположной стороны.

#### 2) Установка магнита на гирдер.

1. Застропить магнит на кран через таль.
2. Поднять магнит и переместить к стенду.
3. Промыть рабочие поверхности магнита (основания, шпоночный “ключ”), протереть пыльные и грязные поверхности магнита.
4. Выставить магнит над гирдером.
5. Начисто протереть рабочие поверхности магнита и гирдера.
6. Смазать поверхности оснований магнита маслом для обеспечения легкого перемещения по гирдеру.
7. Выставить магнит над гирдером между толкателями.
8. Установить под магнит домкраты (количество зависит от типа магнита).

#### 3) Юстировка магнита на гирдере и коммутация.

1. Опустить магнит на гирдер, прижимая его к толкателями у забора, используя домкраты (можно и без домкратов).
2. Отпустить толкатели на свободной стороне магнита.
3. Дотолкать магнит до касания шпоночного “ключа” шпоночного паза гирдера с помощью толкателей с беспружинными головками магнита.
4. Ослабить толкатели и сменить головки на укороченные пружинные головки.



5. Выставить магнит по шпоночному пазу гирдера с помощью толкателей с укороченными пружинными головками. Необходимо использовать специнструмент (калибр).
6. Проконтролировать зазоры между “кювами” и шпоночным пазом гирдера, между основаниями магнита и рабочей поверхностью гирдера.
7. Произвести коммутацию водяного охлаждения магнита.
8. Произвести коммутацию электрического питания с включением в цепь шунта.

#### 4) *Магнитные измерения.*

- 1 Измерения вращающейся катушкой:
  - a) установить катушку на призмы, предварительно подняв кодер на стойке;
  - b) закрепить сильфонные муфты на валах катушки и кодера. Муфту на вале мотора слегка зафиксировать;
  - c) повернуть катушку так, чтобы места под уровень оказались сверху;
  - d) установить фиксаторы для ограничения поворота катушки;
  - e) установить уровень на специальные посадочные места на катушке;
  - f) с помощью специнструмента выставить катушку в уровень с рабочей поверхностью гирдера;
  - g) запустить измерительную программу (запись нулевого угла для кодера);
  - h) снять уровень, убрать фиксаторы, закрепить муфту на валу мотора;
  - i) провести цикл нормализации магнита по току;
  - j) установить 120 А и запустить программу на измерение;
  - k) получить положение оси магнита  $\Delta x$ ,  $\Delta u$  и угол между магнитной и механической плоскостями  $\varphi$ . В случае, если параметры неудовлетворительные, магнит снимается со стенда (см. п.5) для выполнения необходимых доработок. Если параметры удовлетворяют требованиям, то см. ниже;
  - l) провести магнитные измерения и получить гармонические коэф. фиденты при следующих токах: 40, 80, 100, 120, 130, 140 А. Для секстиполей необходимо провести дополнительные измерения при подключенных корректирующих обмотках;
  - m) отключить ток;

- p) вынуть измерительную катушку из магнита.
2. Холловские измерения (программа Hall):
    - a) установить каретку с холловскими датчиками в центр магнита;
    - b) выполнить измерения G(S)/S(S) с шагом 10 Ампер от 20 до 150 А – 5 полуциклов;
    - c) записать полученные данные в файл QAnn\_hys.fld, SRnn\_hys.fld;
    - d) отключить ток и убрать каретку с датчиками.
  - 5) *Снятие магнита со стенда.*

1. Убрать измерительную катушку, предварительно сняв сильфонные муфты, освободив и убрав измеритель угла (кодер).
2. Раскоммутировать магнит от электропитания и охлаждаемой воды.
3. Ослабить толкатели на стороне коммутации магнита. Отталкать магнит толкателями, установленными на противоположной стороне, так, чтобы “кюв” отошел от поверхности шпоночного паза гирдера.
4. Снять магнит с гирдера с помощью домкратов и крана, прижимая магнит к толкателям, установленным у забора во время подъема магнита.
5. Переместить магнит на свободное место на территории СМИ.
- 6) *Обработка магнитных измерений.*

1. Трансформировать fld-файл измерений Холловскими датчиками в dat-файл, убрав „шапку“.
2. Запустить MSAD программу обработки магнитных измерений, предварительно записанных в каждую директорию магнита, и в соответствующих полях ввести необходимые значения измеренных температур.
3. Изменить в файле имена (номера магнитов) и получить оформленные страницы готового паспорта. Данные паспорта также записываются в файл.
4. Распечатать паспорт.

## Приложение 2

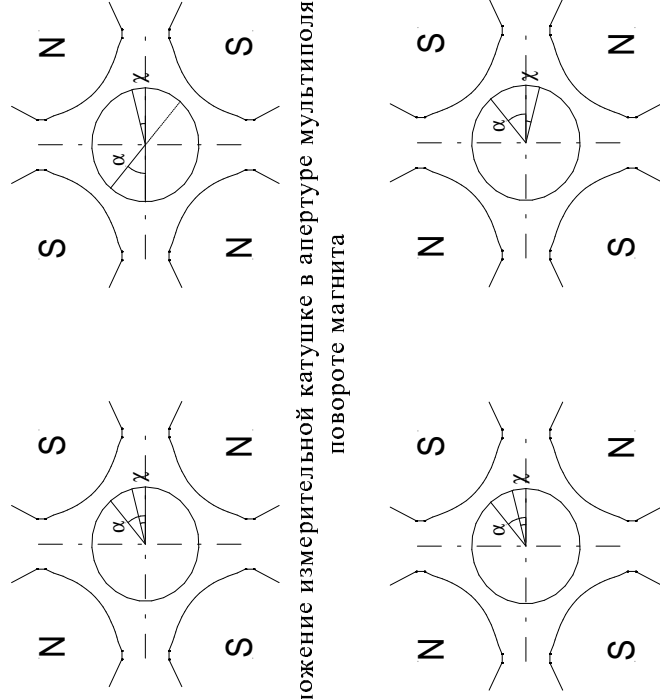
### Калибровка измерительной катушки

Существуют два способа калибровки:

- 1) поворот магнита вокруг вертикальной оси на 180 градусов;
- 2) двойной поворот катушки (вокруг вертикальной оси на 180 градусов и поворот вокруг продольной оси на 180 градусов).

Принцип калибровки заключается в двойном измерении при исключении влияния угла магнита.

Поворот магнита вокруг вертикальной оси не изменяет измерительную систему и позволяет использовать измерительную программу в полном объеме, но увеличивает время на данную процедуру и меняет боковую поверхность шпоночного паза, к которой прижимается мультиполю. Для измерения угла это несущественно.



Положение измерительной катушки в апертуре мультиполю при повороте магнита

Положение измерительной катушки в апертуре мультиполю при двойном повороте катушки.

При повороте измерительной катушки невозможно проводить математическую обработку результатов измерений самой измерительной программой. Для окончательного результата требуется использовать программу обработки специально написанную в MCADe.  
 $\alpha$  – угол между магнитной и механической плоскостями мультиполю (roll angle).

$\chi$  – угол между механической и электрической плоскостями измерительной катушки.

$\Phi$  – угол между электрической плоскостью измерительной катушки и магнитной плоскостью мультиполю.

Для обоих способов калибровки:

$$\chi = 1/2 \cdot (\Phi 2 - \Phi 1) ,$$

$$\alpha = 1/2 \cdot (\Phi 1 + \Phi 2) .$$

Полученный угол катушки, необходимо вписать в измерительную программу и использовать для соответствующего типоразмера мультиполюей.

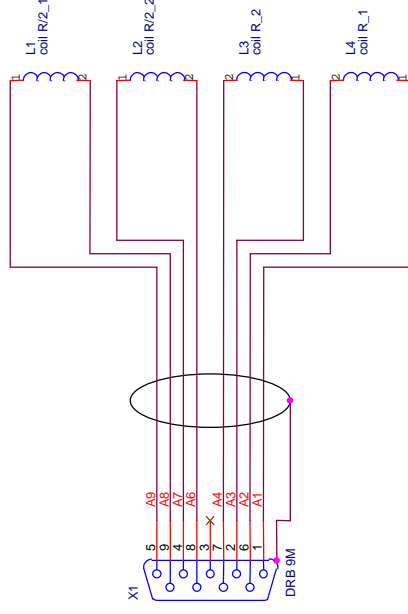
### Приложение 3

#### Усилитель-коммутатор

На 8 входов усилителя- коммутатора поступают сигналы со всех секций катушки. Секции катушек коммутируются 8 способами: левые секции; правые секции; левые+правые секции; левые-правые секции; большие или малые секции. При измерениях мультиполюей различных типов (секступоль, квадруполь) включается соответствующая компенсация (коэффициент усиления сигналов с малых секций для квадруполюей в 2 раза меньше, чем для секступолюей).

В каждом канале имеется 4 градации коэффициента усиления: 10, 100, 1000, 10000.

Схема усилителя-коммутатора:

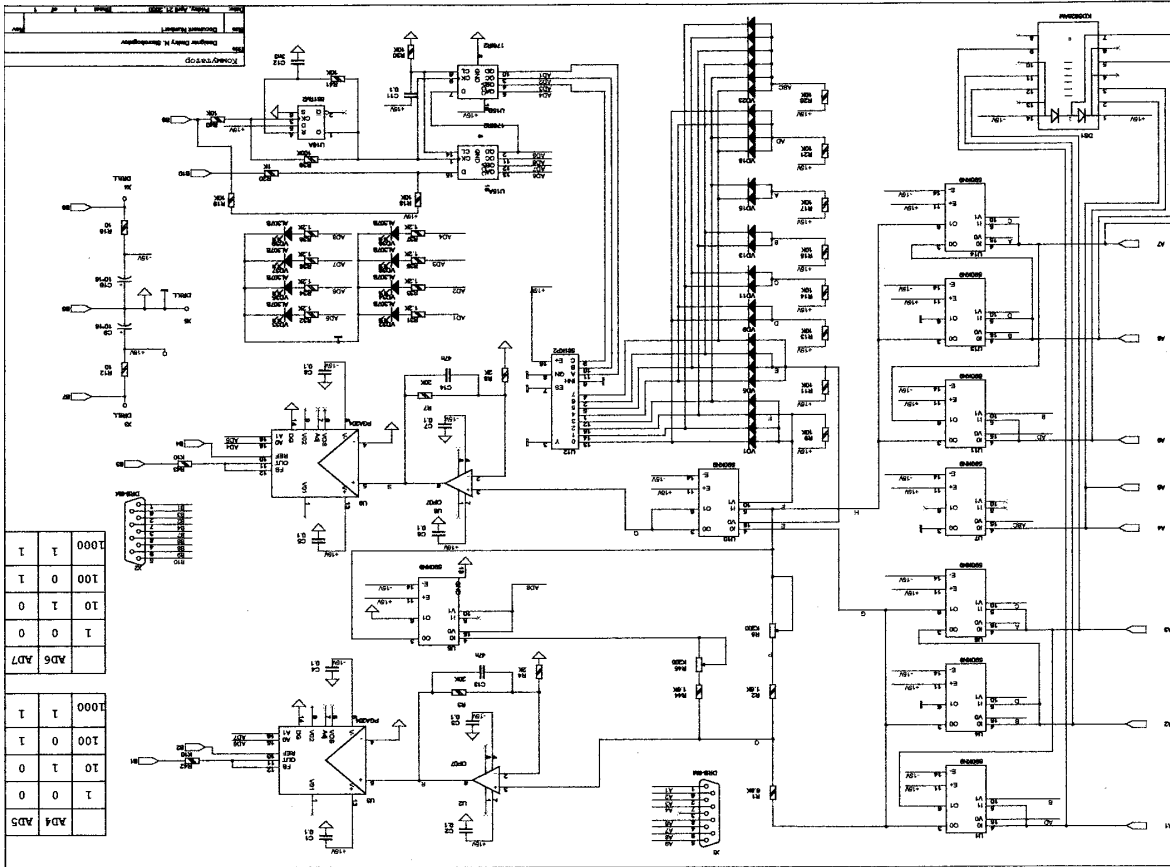


Описание программы

Данная программа предназначена для управления системой измерения магнитных элементов вращающимися катушками. Она устанавливает ток в магните, управляет вращением катушки (ее скоростью, ускорением и т.д.), контролирует угловое положение катушки, снимает оцифрованное напряжение с катушки и записывает результаты измерений в файл. Также она может произвести математическую обработку результатов и рассчитывать коэффициенты разложения поля элемента в ряд по пространным гармоникам. Существует возможность загружать результаты предыдущих измерений из файлов и обрабатывать их.

Перед началом измерений необходимо установить ряд параметров, влияющих на ход измерений, и отконфигурировать оборудование:

1. В пункте меню Device→Coils надо установить геометрические параметры катушки.
  - 1.1 Поле ввода Radius outside big содержит размер катушки полного радиуса по внешнему краю.
  - 1.2 Поле ввода Radius outside small содержит толщину катушки полного радиуса.
  - 1.3 Поле ввода Radius inside big содержит размер катушки половинного радиуса по внешнему краю.
  - 1.4 Поле ввода Radius inside small содержит толщину катушки половинного радиуса.
  - 1.5 Поле ввода Radius for normalize содержит радиус нормализации гармоник.
  - 1.6 Поле ввода Angle offset содержит угол между плоскостью витков катушки и плоскостью основания, на которое устанавливается уровень.
  - 1.7 Поле ввода Coefficient содержит коэффициент для расчета абсолютного значения основной гармоники поля.
2. В пункте меню Device→ACR установить параметры АЦП: время оцифровывания и пределы измерения для двух каналов (время одинаково для обоих каналов и вводится одним параметром).
  - 2.1 Поле ввода Diff signal содержит предел измерения первого канала АЦП.
  - 2.2 Поле ввода Main signal содержит предел измерения первого канала АЦП.
  - 2.3 Поле ввода Input time содержит время измерения обоих каналов АЦП.



3. В пункте меню Device→USD установить параметры работы шагового двигателя.

3.1 Поле ввода Acceleration содержит ускорение шагового двигателя (в количестве шагов в секунду за миллисекунду).

3.2 Поле ввода Frequency содержит частоту шагового двигателя (в количестве шагов в секунду).

3.3 Поле ввода Motor's steps содержит количество шагов двигателя в одном кванте движения катушки.

3.4 Поле ввода Number of turns содержит количество квантов движения катушки. Произведение этого параметра на предыдущий не должно быть меньше 10000, иначе катушка не совершит полного оборота.

4. В пункте меню Device→Connect установить схему коммутации катушек.

4.1 Основной флаг 1th включает катушки первой (у кодера) секции.

4.2 Основной флаг 2th включает катушки второй (у двигателя) секции.

4.3 Основной флаг 1th-2th включает катушки первой и второй секции на разность.

4.4 Основной флаг 1th+2th включает катушки первой и второй секции на сумму.

4.5 Дополнительный флаг Main from full radius подключает к каналу основного сигнала катушку полного радиуса. Иначе используется катушка половинного радиуса.

4.6 Дополнительный флаг Quadrature's compensation подключает в схеме компенсации резистор для квадратного поля. Иначе используется резистор для секторного поля.

После окончания конфигурирования оборудования необходимо установить начальные параметры катушки и измеряемого элемента:

1. В пункте меню Manual→Set potmization задаются параметры цикла нормализации измеряемого элемента, который необходимо произвести перед началом измерений. В цикле нормализации ток в магнитном элементе поднимается от минимального до максимального за заданное количество шагов и затем таким же образом опускается до минимального.

1.1 Поле ввода Minutim current содержит минимальный ток цикла нормализации.

1.2 Поле ввода Time of step содержит время одного шага цикла нормализации.

1.3 Поле ввода Number of step содержит количество шагов цикла нормализации.

1.4 Поле ввода Number of cycles содержит количество циклов нормализации.

1.5 Поле ввода Maxitum current содержит максимальный ток цикла нормализации.

1.6 Поле ввода Set current содержит ток в элементе после цикла нормализации.

2. В пункте меню Manual→Set current задается ток в измеряемом элементе после нормализации, данный пункт меню содержит единственное поле ввода, в котором задается ток в элементе в амперах.

3. В пункте меню Manual→Set position возможно задать начальное положение катушки перед началом измерения. Пункт меню содержит четыре поля ввода расположенных в виде таблицы, которые позволяют задавать новое положение катушки относительно старого либо в квантах движения катушки, либо в шагах двигателя. Так же можно задать абсолютное положение катушки относительно нулевого положения.

4. В пункте меню Manual→Set zero устанавливается нулевое положение катушки, которое должно совпадать с медианной плоскостью измеряемого элемента и устанавливается с помощью механического уровня. Первоначально нулевым является положение катушки, в котором она находилась при запуске данной программы, выбор этого пункта меню позволяет изменить это положение не выходя из программы.

5. В пункте меню Manual→Step over дается возможность исполнять отдельно каждый квант движения катушки, эта возможность используется для отладочных целей и в процессе измерения обычно не используется.

После выше изложенных действий можно начинать процесс измерения инициализировав его выбором пункта меню Run→Run. В ходе измерения в зависимости от установленных флагов пункта меню Window→Window на дисплее будут отображаться напряжения основного и дифференциального сигналов, текущие показания измерителя угла поворота и относительное отклонение угла от среднего для каждого кванта движения катушки. По окончании процесса измерения на дисплее отображается график интегралов напряжений основного и дифференциального сигналов в зависимости от угла поворота катушки.

Теперь для математической обработки сигнала необходимо выбрать пункт меню Math→Splain (при этом на дисплее рядом с оригинальными

сигналами красного цвета появляется их сплайн аппроксимация зеленого цвета) и затем выбрать пункт меню Math→Harmonic, который производит Фурье преобразование полученной выше аппроксимации. Результатом этих действий будет появление окна с коэффициентами пространственных гармоник магнитного поля. В этом окне В[2] есть амплитуда основной гармоники умноженная на коэффициент катушки из меню Device→Coils-Coefficient, Roll angle есть смещение магнитной медианной плоскости относительно механической, значения Axis shift X и Axis shift Y смещение магнитной оси симметрии поля относительно механической оси симметрии элемента по координатам X и Y соответственно. Далее, слева расположена таблица гармоник поля вычисленных из основного сигнала, а справа из дифференциального. Данные полученные при измерении можно сохранить в файл. Для этого надо выбрать пункт меню File→Save и сохранить файл под нужным именем.

Сохраненные ранее файлы можно открывать с помощью пункта меню File→Open. Открыв файл, надо заново произвести математическую обработку данных (как описывалось выше), чтобы получить коэффициенты гармоник. В программе так же существует возможность распечатки отдельных окон на стандартном матричном принтере. Для этого надо встать на требуемое окно и выбрать пункт меню Print→Window print. Выход из программы осуществляется с помощью пункта меню File→Exit

## Приложение 5

### Выставка механики и его проверка

- 1) Установить индикаторы на стойках и выставить на глубину 4,500 мм для середины шкалы (1 мм) с помощью концевых мер\*.
- 2) Промыть рабочие поверхности гирдера (шпоночный паз, установочные поверхности).
- 3) Установить толкатели с удлиненными пружинными головками со стороны стэнда.
- 4) Открыть ящики и достать шаблоны. Промыть поверхности шаблонов (основания, шпоночные вставки).
- 5) Установить шаблоны на гирдер (вдвоем) на расстоянии 30 мм от края гирдера.
- 6) Вставить разрезную шпонку в шпоночный паз гирдера под шаблоны, предварительно ее промыв.

7) Прижать шаблоны к поверхности разрезной шпонки толкателями (порядка 5-6 оборотов ключа, затем отпустить полностью, затем 1 оборот от свободного касания).

- 8) Открыть ящик и достать вал. Промыть рабочие поверхности вала.
  - 9) Установить вал на призмы шаблонов.
  - 10) Проконтролировать показатели индикаторов.
  - 11) Проверить размеры между валом и призмами стоек с помощью концевых мер.
  - 12) Провести коррекцию выставки, если понадобится (должно быть по 4,500 мм для всех зазоров на стенде в ИЯФе).  
Необходимо помнить, что из-за особенностей геометрических размеров шаблонов и вала, ось по шаблону смещена относительно оси (15,000 мм; 377,000 мм) на 7,0 мкм вверх и на 7,0 мкм в сторону забора.  
В PSI призмы стоек выставлены под положение оси (15,000 мм; 377,000 мм), и зазоры между валом и призмами стоек следующие:  
#1 (+1), #2 (-4), #3 (+9), #4 (-9) относительно 4,500 мм.
  - 13) Снять вал с призм и поставить в ящик.
  - 14) Отодвинуть шаблоны от разрезной шпонки, ослабив толкатели.
  - 15) Вынуть разрезные шпонки.
  - 16) Снять шаблоны с гирдера (вдвоем) и положить их в ящики.
- Особая аккуратность при установке и снятии шаблонов и вала. Берегите рабочие поверхности гирдера, шаблонов, шаблонов и вала

## Приложение 6 Проблема стационарности магнитных измерений

Напряжение, индуцируемое в катушке:

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\left(\int B \cdot dS\right)}{dt}$$

В общем случае существуют временные зависимости:

$$U = -L \sum_n \left( -A_n(t) \cdot \sin(n\theta(t)) + B_n(t) \cdot \cos(n\theta(t)) \right) \frac{R_0(t)^n - R_1(t)^n}{n},$$

где  $R_0(t)$ ,  $R_1(t)$  – внешний и внутренний размеры измерительной катушки, которые могут меняться из-за механических вибраций.

$R = R_0(t) - R_1(t)$  — радиальный размер катушки

В общем случае  $R_1(t) = \rho \cdot \sin(\xi \cdot t + \alpha)$ .

Гармонические коэффициенты ( $A_n(t)$ ,  $B_n(t)$ ) могут изменяться по времени из-за нестабильности магнитного поля и изменения размеров мультитопа за время измерения.

Угловая зависимость от времени связана с методом измерения: пошаговый или с постоянной скоростью  $\theta(t) = \omega t$ .

При постоянной скорости вращения:

$$U_c = -L \cdot \sum_n (A_n^*(t) \cdot \cos(n\omega t) + B_n^*(t) \cdot \sin(n\omega t)) \cdot R_0^n(t), \quad (1)$$

$$A_n^*(t) = \frac{B_n(t)}{R_0(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \cdot \left( 1 - \frac{R_i^{n-1}(t)}{R_0^{n-1}(t)} \right) + \frac{1}{n} \cdot \frac{dB_n(t)}{dt} \cdot \left( 1 - \frac{R_i^n(t)}{R_0^n(t)} \right) - A_n(t) \cdot \omega \cdot \left( 1 - \frac{R_i^n(t)}{R_0^n(t)} \right),$$

$$B_n^*(t) = \frac{A_n(t)}{R_0(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \cdot \left( 1 - \frac{R_i^{n-1}(t)}{R_0^{n-1}(t)} \right) + \frac{1}{n} \cdot \frac{dA_n(t)}{dt} \cdot \left( 1 - \frac{R_i^n(t)}{R_0^n(t)} \right) - B_n(t) \cdot \omega \cdot \left( 1 - \frac{R_i^n(t)}{R_0^n(t)} \right).$$

При пошаговом вращении навводимое на катушку напряжение измеряется внутри шага и затем суммируется (~ 4000 точек):

$$I(\theta + d\theta) = \sum_k U_s = -L \cdot \sum_k \left( A_n^*(t) \cdot \cos(n\theta(t)) + B_n^*(t) \cdot \sin(n\theta(t)) \right) \cdot R_0^n(t).$$

В тоже время при интегрировании по времени получаем:

$$I = \int_{dt} U_s \cdot dt = -L \cdot \int \left( A_n^*(t) \cdot \cos(n\theta(t)) + B_n^*(t) \cdot \sin(n\theta(t)) \right) \cdot R_0^n(t) \cdot dt,$$

$$I(\theta + d\theta) = -L \cdot \sum_n \left( A_n^{**}(\theta + d\theta) \cdot \cos(n(\theta + d\theta)) + \right.$$

$$\left. + B_n^{**}(\theta + d\theta) \cdot \sin(n(\theta + d\theta)) \right) \cdot R_0^n(\theta + d\theta),$$

$$A_n^{**}(\theta + d\theta) = \frac{B_n(\theta + d\theta)}{R_0(\theta + d\theta)} \cdot \left( R_0(\theta + 2d\theta) - R_0(\theta) \right) \cdot \left( 1 - \frac{R_i^{n-1}(\theta + d\theta)}{R_0^{n-1}(\theta + d\theta)} \right) +$$

$$+ \frac{1}{n} \left( B_n(\theta + 2d\theta) - B_n(\theta) \right) \cdot \left( 1 - \frac{R_i^n(\theta + d\theta)}{R_0^n(\theta + d\theta)} \right) - A_n(\theta + d\theta) \cdot \frac{\sin(n \cdot d\theta)}{n} \cdot \left( 1 - \frac{R_i^n(\theta + d\theta)}{R_0^n(\theta + d\theta)} \right),$$

$$B_n^{**}(\theta + d\theta) = \frac{A_n(\theta + d\theta)}{R_0(\theta + d\theta)} \cdot \left( R_0(\theta + 2d\theta) - R_0(\theta) \right) \cdot \left( 1 - \frac{R_i^{n-1}(\theta + d\theta)}{R_0^{n-1}(\theta + d\theta)} \right) -$$

$$- \frac{1}{n} \cdot \left( A_n(\theta + 2d\theta) - A_n(\theta) \right) \cdot \left( 1 - \frac{R_i^n(\theta + d\theta)}{R_0^n(\theta + d\theta)} \right) + B_n(\theta + d\theta) \cdot \frac{\sin(n \cdot d\theta)}{n} \cdot \left( 1 - \frac{R_i^n(\theta + d\theta)}{R_0^n(\theta + d\theta)} \right).$$

Рассмотрим подробнее влияние различных факторов на точность измерения.

Основной вклад в искажения в гармоники вносит основная компонента магнитного поля ( $B_2$  – в квадруполях и  $B_3$  – в секступолях). Оценим значение гармоник без влияния нижеперечисленных причин.

При равномерном вращении:

$$A_n^*(t) = -A_n(t) \cdot \omega \cdot \left( 1 - \frac{R_i^n(t)}{R_0^n(t)} \right) \approx -A_n(t) \cdot \omega,$$

$$B_n^*(t) = -B_n(t) \cdot \omega \cdot \left( 1 - \frac{R_i^n(t)}{R_0^n(t)} \right) \approx B_n(t) \cdot \omega.$$

При пошаговом вращении:

$$A_n^{**}(\theta + d\theta) = -A_n(\theta + d\theta) \cdot \frac{\sin(n \cdot d\theta)}{n} \cdot \left( 1 - \frac{R_i^n(\theta + d\theta)}{R_0^n(\theta + d\theta)} \right) \approx -A_n(\theta + d\theta) \cdot \frac{\sin(n \cdot d\theta)}{n},$$

$$B_n^{**}(\theta + d\theta) = B_n(\theta + d\theta) \cdot \frac{\sin(n \cdot d\theta)}{n} \cdot \left( 1 - \frac{R_i^n(\theta + d\theta)}{R_0^n(\theta + d\theta)} \right) \approx B_n(\theta + d\theta) \cdot \frac{\sin(n \cdot d\theta)}{n}.$$

1) Механические причины (вибрации, колебания)

$$R_i(t) = \rho \cdot \sin(\xi \cdot t + \alpha),$$

$$\frac{dR_i(t)}{dt} = \rho \cdot \xi \cdot \cos(\xi \cdot t + \alpha),$$

где  $\alpha$  – начальный угол.

2) Нестабильность источника питания.

$$B_m(t) = B_m(1 + f(t)), \text{ где } m - \text{ номер основной гармоники,}$$

$$f(t) = \beta \cdot \sin(vt + \chi), \quad \frac{dB_m(t)}{dt} = \beta \cdot v \cdot B_m \cdot \cos(vt + \chi),$$

где  $\chi$  – начальный угол.

Сделаем оценки для равномерного вращения:

$$\begin{aligned}
A_n^*(t) &= \frac{B_n(t)}{R_0(t)} \cdot \rho \xi \cdot \cos(\xi t + \alpha) \cdot \left( 1 - \frac{R_i^{n-1}(t)}{R_0^{n-1}(t)} \right) + \frac{1}{n} \cdot \beta \nu B_m \cdot \cos(\beta t + \chi) \cdot \left( 1 - \frac{R_i^n(t)}{R_0^n(t)} \right) - \\
&- A_n(t) \cdot \omega \left( 1 - \frac{R_i^n(t)}{R_0^n(t)} \right) \approx \frac{B_n(t)}{R_0(t)} \cdot \rho \xi \cdot \cos(\xi t + \alpha) + \frac{1}{n} \cdot \beta \nu B_m \cdot \cos(\beta t + \chi) - A_n(t) \cdot \omega, \\
B_n^*(t) &= \frac{A_n(t)}{R_0(t)} \cdot \rho \xi \cdot \cos(\xi t + \alpha) \cdot \left( 1 - \frac{R_i^{n-1}(t)}{R_0^{n-1}(t)} \right) - \frac{1}{n} \cdot \beta \nu A_m \cdot \cos(\beta t + \chi) \cdot \left( 1 - \frac{R_i^n(t)}{R_0^n(t)} \right) + \\
&+ B_n(t) \cdot \omega \left( 1 - \frac{R_i^n(t)}{R_0^n(t)} \right) \approx \frac{A_n(t)}{R_0(t)} \cdot \rho \xi \cdot \cos(\xi t + \alpha) - \frac{1}{n} \cdot \beta \nu A_m \cdot \cos(\beta t + \chi) + B_n(t) \cdot \omega. \\
A_n^*(t) &\approx \frac{B_n(t)}{R_0(t)} \cdot \rho \xi \cdot \cos(\xi t + \alpha) \cdot \cos(n\omega t) + \\
&+ \frac{1}{n} \cdot \beta \nu B_m \cdot \cos(\beta t + \chi) \cdot \cos(n\omega t) - A_n(t) \cdot \omega \cos(n\omega t), \\
B_n^*(t) &\approx \frac{A_n(t)}{R_0(t)} \cdot \rho \xi \cdot \cos(\xi t + \alpha) \cdot \sin(n\omega t) - \\
&- \frac{1}{n} \cdot \beta \nu A_m \cdot \cos(\beta t + \chi) \cdot \sin(n\omega t) + B_n(t) \cdot \omega \sin(n\omega t).
\end{aligned}$$

В итоге:

$$\begin{aligned}
A_n^*(t) \cdot \cos(n\omega t) &\approx \frac{1}{2} \frac{B_n(t)}{R_0(t)} \cdot \rho \xi \cdot (\cos((\xi + n\omega)t) \cdot \cos \alpha - \sin((\xi + n\omega)t) \cdot \sin \alpha) + \\
&+ \cos((\xi - n\omega)t) \cdot \cos \alpha - \sin((\xi - n\omega)t) \cdot \sin \alpha) + \\
&+ \frac{1}{2} \frac{1}{n} \cdot \beta \nu B_m \cdot (\cos((\beta + n\omega)t) \cdot \cos \chi + \sin((\beta + n\omega)t) \cdot \sin \chi + \\
&+ \cos((\beta - n\omega)t) \cdot \cos \chi + \sin((\beta - n\omega)t) \cdot \sin \chi) - A_n(t) \cdot \omega \cos(n\omega t), \\
B_n^*(t) \cdot \cos(n\omega t) &\approx \frac{1}{2} \frac{A_n(t)}{R_0(t)} \cdot \rho \xi \cdot (\sin((n\omega + \xi)t) \cdot \cos \alpha - \cos((n\omega + \xi)t) \cdot \sin \alpha + \\
&+ \sin((n\omega - \xi)t) \cdot \cos \alpha - \cos((n\omega - \xi)t) \cdot \sin \alpha) - \\
&- \frac{1}{2} \frac{1}{n} \cdot \beta \nu A_m \cdot (\sin((n\omega + \beta)t) \cdot \cos \chi + \cos((n\omega + \beta)t) \cdot \sin \chi + \\
&+ \sin((n\omega - \beta)t) \cdot \cos \chi + \cos((n\omega - \beta)t) \cdot \sin \chi) + B_n(t) \cdot \omega \sin(n\omega t).
\end{aligned}$$

В итоге появляются от механических причин дополнительные гармоники с частотами, близкими к  $\xi + m\omega$  и  $\xi - m\omega$  и амплитудами:

$$\begin{aligned}
B_{ac}^*(t) &\approx \frac{1}{2} \frac{A_n(t)}{R(t)} \cdot \rho \xi (\sin((n\omega + \xi)t) \cdot \cos \alpha + \sin((n\omega - \xi)t) \cdot \cos \alpha) - \\
&- \frac{1}{2} \frac{1}{n} \cdot \beta \nu A_m (\sin((n\omega + \beta)t) \cdot \cos \chi + \sin((n\omega - \beta)t) \cdot \cos \chi) + B_n(t) \cdot \omega \sin(n\omega t) + \\
&+ \frac{1}{2} \frac{B_n(t)}{R_0(t)} \cdot \rho \xi (-\sin((\xi + n\omega)t) \cdot \sin \alpha - \sin((\xi - n\omega)t) \cdot \sin \alpha) + \\
&+ \frac{1}{2} \frac{1}{n} \cdot \beta \nu B_m (\sin((\beta + n\omega)t) \cdot \sin \chi + \sin((\beta - n\omega)t) \cdot \sin \chi) \approx \\
&\approx B_n(t) \cdot \omega \sin(n\omega t) + \frac{1}{2} \frac{B_n(t)}{R(t)} \cdot \rho \xi (-\sin((\xi + n\omega)t) \cdot \sin \alpha - \sin((\xi - n\omega)t) \cdot \sin \alpha) + \\
&+ \frac{1}{2} \frac{1}{n} \cdot \beta \nu B_m (\sin((\beta + n\omega)t) \cdot \sin \chi + \sin((\beta - n\omega)t) \cdot \sin \chi), \\
A_{mc}^* &= \frac{1}{2} \frac{B_m}{R} \cdot \rho \xi, \quad B_{mc}^* = \frac{1}{2} \frac{B_m}{R} \cdot \rho \xi.
\end{aligned}$$

В итоге появляются от электрических причин дополнительные гармоники с частотами, близкими к  $\nu + m\omega$  и  $\nu - m\omega$  и амплитудами:

$$A_e^*(t) = \frac{1}{2} \frac{1}{m} \cdot \beta \nu B_m, \quad B_e^*(t) = -\frac{1}{2} \frac{1}{m} \cdot \beta \nu B_m.$$

Оценим влияние на точности восстановления гармоник для характерных величин:

1) Механика

А) малые колебания (вал катушки внутри ролика, колебание катушки при вращении) – частота порядка 10ω для квадруполя и ~20ω для секступолей и ~5 мкм (зазор между валом и роликом ~1 – 2 мкм) Амплитуда колебания гармоник ~1.6·10<sup>-4</sup> для квадруполей и ~3.2·10<sup>-4</sup> – для секступолей. При усреднении имеем максимальную погрешность ~1.6·10<sup>-5</sup>, учитывая отношения длительности основного и паразитного сигналов (1/10 и 1/20 соответственно). Способ борьбы: точные размеры и подбор параметров вращения катушки для уменьшения колебаний и вибраций.

Б) одиночный дерг ~100 мкм (3·10<sup>-5</sup>) и амплитуда колебания ~1.5·10<sup>-3</sup> и погрешность в зависимости от длительности помехи может достигать величины ~2·10<sup>-4</sup> при 5 градусном дерге. Способ борьбы:

соосность вращающихся частей посредством муфт, прижим ролика к опорной поверхности стойки.

То есть величина погрешности от механических причин не превышает  $(0.2 \div 0.4) \cdot 10^{-4}$ .

## 2) Магнитное поле

А) нестабильность при высоких частотах (менее 10 и 20 кратных)  
 Нестабильность  $\sim 10^{-4}$  и амплитуда колебания  $\sim 2.5 \cdot 10^{-4}$  для квадруполой и  $3.3 \cdot 10^{-4}$  для секступолой. Погрешность  $\sim 2.5 \cdot 10^{-5}$  для квадруполой и  $1.6 \cdot 10^{-5}$  для секступолой.

Б) нестабильность на низких частотах  $\sim 10^{-4}$  и при  $\nu \sim \omega$  амплитуда колебаний гармоник низкого порядка  $\sim \omega$  и погрешность  $\sim 2.5 \cdot 10^{-5}$  для квадруполой и  $1.6 \cdot 10^{-5}$  для секступолой.

Редкие значительные изменения величины  $(2 \div 5) \cdot 10^{-4}$  гармоник низкого порядка (3, 4) при повторных измерениях могут объясняться всплесками тока питания источника из-за проблем в сети (нестабильность  $\sim 10^{-3}$  на частотах порядка  $0.05 \div 0.1$  Гц).

Пошаговое вращение отличается от равномерного тем, что усреднение происходит внутри каждого шага путем интегрирования (суммирования). Оценка погрешностей аналогична предыдущей.

Временная зависимость магнитного поля, связанная с изменением параметров мультиполя, в первую очередь размеров. Одной из причин может быть нагрев (охлаждение) магнита катушками и вследствие этого возникновения градиента температур внутри магнита.

$$B_m(t) = B_m(1 + f(t)).$$

Известно, что связь между апертурой мультиполя и силой магнитного поля

$$G = B_2 = 2\mu \frac{IW}{R^2} \text{ — для квадруполой, } S = B_3 = 3\mu \frac{IW}{R^3} \text{ — для секступолой.}$$

$R = R_0(1 - \chi \cdot dT)$  — изменение апертуры (расстояние от оси мультиполя до полюса) от температуры  $R_0 = L - L_1$ ,  $\chi = \frac{\alpha L_1}{R_0}$ , где  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения мультиполя,  $L_1$  — длина полюса,  $R_0$  — начальная апертура.

Изменение магнитного поля:

$$B_q = B_2 / (1 - \chi \cdot dT)^2 = 2B_2 \cdot \chi \cdot dT \text{ — для квадруполой,}$$

$$\frac{dB}{dt} = 2B_2 \cdot \chi \frac{dT}{dt};$$

$$B_s = B_3 / (1 - \chi \cdot dT)^3 = 3B_3 \cdot \chi \cdot dT \text{ — для секступолой,}$$

$$\frac{dB}{dt} = 3B_3 \cdot \chi \frac{dT}{dt}.$$

Это приводит к изменению скью компоненты магнитного

$$dA_n^* = -\frac{1}{2} \frac{dB_n(t)}{dt},$$

$$dA_q^* = -\frac{1}{2} \frac{dB_2(t)}{dt} = -\frac{1}{2} 2B_2 \cdot \chi \frac{dT}{dt} = -B_2 \cdot \chi \frac{dT}{dt} \text{ — для квадруполой и}$$

изменение угла:

$$d\phi_q = \frac{dA_q^*}{B_2} = -\frac{\chi}{\omega} \frac{dT}{dt},$$

$$dA_s^* = -\frac{1}{3} \frac{dB_3(t)}{dt} = -\frac{1}{3} 3B_3 \cdot \chi \frac{dT}{dt} = -B_3 \cdot \chi \frac{dT}{dt} \text{ — для секступолой и}$$

изменение угла:

$$d\phi_s = \frac{dA_s^*}{B_3} = -\frac{\chi}{\omega} \frac{dT}{dt}.$$

Оценим изменение угла для следующих параметрах магнитных измерений ( $dT \sim 10^\circ$ ,  $t \sim 100$  sec):

$$d\phi = -\frac{\chi}{\omega} \frac{dT}{dt} = -\frac{75 \cdot 10^{-6}}{2\pi/100} \frac{10}{100},$$

$d\phi \sim 0.12$  mrad.

Мощность питания катушек мультиполя каждого типа:

QA — 2.5 kWt, QB — 3.2 kWt, QC — 4.0 kWt, SR — 1.4 kWt.

И относительная мощность с учетом размеров и количества полюсов: SR — 0.23 kWt, QA — 0.44 kWt, QB — 0.36 kWt, QC — 0.32 kWt. Следовательно, действительно уход угла должен быть максимальным для QA и минимальным для SR, что и видно из сравнения измерений.

Были проведены эксперименты по изучению влияния температуры магнита на положение магнитной оси и угла магнитной плоскости.

1. Стационарная температура.

При стационарном распределении температур по объему магнита угол не изменится, а вертикальное положение оси связано с



температурой согласно вышеприведенной поправкой. Сравнительная таблица приводится ниже (QA39).

T, C\	$\Delta X$ , mm	$\Delta Y$ exp, mm	$\phi$ , mrad	$\Delta Y$ calc, mm
20.4	13	22	-0.08	23
24.6	12	22	-0.09	23
25.3	14	25	-0.12	24

## 2. Градиент температур (QA41).

При наличии температурного градиента в объеме магнита, вызываемого в первую очередь нагревом основными обмотками при недостаточном охлаждении водой, наблюдается изменение измеряемого угла магнитной плоскости мультитиполя. В этом случае эффект обусловлен особенностями измерений мультитиполя «вращающейся» катушкой.

Во время вращения измерительной катушки происходит линейное расширение полюсов магнита, они вдвигаются внутрь и апертура уменьшается.  $T_t$ ,  $T_b$  – температуры полюса и основного тела мультитиполя.

No	$T_t$ , C\	$\langle T \rangle$ , C\	$T_b$ , C\	$\Delta X$ , mm	$\Delta Y$ , mm	$\phi$ , mrad
0	20.9	20.9	20.9	24	30	-0.35
1	22.3	21.3	20.9	20	28	-1.06
2	23.0	21.3	21.3	21	26	-0.91
3	23.4	21.5	21.4	21	27	-0.87
4	22.6	21.8	21.4	23	29	-0.62
5	22.0	21.7	21.4	22	30	-0.59
6	22.0	21.7	21.5	23	29	-0.51

Полученные выше оценки даны заниженные результаты на изменение угла, что может объясняться тем, что коэффициент линейного расширения в первую очередь определяется клеом между пластинами.