

Харьтозов Н.В., Урадацкий С.П.

С 3458

6221/86

Б1-9-86-627



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-9-86-627

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1986

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория нейтронной физики

---

Р.В.Харьюзов, С.П.Градацкий

51 - 9 - 86 - 627

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ В ЛИНЕЙНЫХ  
ИНДУКЦИОННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

Рукопись поступила  
в издательский отдел

.. 17. 09. 86.

---

Дубна, 1986 г.

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

## Введение

Достоинства линейных индукционных ускорителей (ЛИУ) многократно и подробно обсуждались /1/. Однако в ходе их наладки возникают отклонения параметров ускоряемого пучка от расчетных. Так, в ускорителе АТА (США) лишь половинный от проектного значения ток удаётся ускорить до расчетной энергии без потери длительности пучкового импульса /2/. Отличия экспериментальных характеристик от расчетных имеют место и в ЛИУ-30. Представить эти отличия как результат действия неучтенных электромагнитных полей в ускорительном тракте кажется естественным. Здесь приведены краткие результаты еще не законченных исследований магнитных полей, возникающих в ЛИУ попутно основным процессам. Такие поля могут быть отнесены к разряду магнитных помех.

### I. Магнитные помехи на начальной стадии ускорения в ЛИУ-30

В ЛИУ-30 принята традиционная схема формирования пучка на начальной стадии ускорения с использованием непрерывного продольного осесимметричного ведущего (фокусирующего) магнитного поля. В каждой из двенадцати ускорительных секций так называемого инжекторного участка имеется по двенадцать соединённых последовательно встроенных в индукторы катушек с постоянным током разделённых между собой двадцатимиллиметровыми ускоряющими зазорами. Кроме того, каждая секция снабжена двумя навесными катушками для создания поля в промежутках между секциями. Реальные поля таким образом организованного составного соленоида могли лишь условно считаться непрерывными и осесимметричными. И если вариации продольной составляющей не только предсказывались и обмерялись, но и использовались при расчетах проводки пучка, то нарушения осевой симметрии в расчет не принимались, хотя уже в 1982 г. они были подробно изучены.

Наша методика была основана на использовании индукционного дифференциального датчика и синхроскопа при питании составного соленоида переменным током. Датчик состоял из двух последовательно и согласно включенных катушек по три тысячи витков, помещённых на общую ось и равноудалённых на 10 мм от немагнитной проволоки, натянутой вдоль геометрической оси секции. Ось катушек всегда находилась в плоскости, перпендикулярной проволоке. Диаметр катушек - 10 мм, длина - 20 мм. Питание составного соленоида и развёртка луча синхроскопа осуществлялась от трансформатора напряжением 36 вольт 50 гц.

При размещении такого датчика на оси симметрии, когда векторы радиальной составляющей равны по величине и направлены в противоположные стороны, эдс в катушках равны и противофазны, результирующий сигнал равен нулю, а на экране синхроскопа наблюдается отрезок прямой линии. При отсутствии же симметрии на экране наблюдается наклонный отрезок прямой линии, проекция которого на вертикальную ось пропорциональна разностному сигналу, т.е. величине вектора поперечной составляющей. Фаза наблюдаемой фигуры Лиссажу однозначно определяет направление проекции этого вектора.

Здесь оказалось возможным попутное наблюдение геометрического положения корпусов-экранов соленоидов за счет регистрации магнитного поля наведённых в экранах токов. Это поле сдвинуто по фазе на 90 электрических градусов относительно фазы поля соленоида, и его асимметрия проявляется в наблюдаемой фигуре Лиссажу превращением отрезка прямой в эллипс. Теперь проекция большой оси эллипса характеризует дефекты поля, а проекция малой оси - дефекты геометрического исполнения конструкции.



Центрирующие проволоку наконечники, укрепляемые на фланцах секции имели вариаторы, с помощью которых проволока могла перемещаться или наклоняться в двух ортогональных плоскостях с точностью 0,1 мм. Это позволяло калибровать датчик в заданном режиме, а также исследовать асимметрию поля при смещении оси. Контроль значения продольного поля велся датчиком с аналогичной катушкой, ось которой была совмещена с осью проволоки.

Измерения велись через каждый сантиметр в двух ортогональных плоскостях как вдоль геометрической оси, так и вдоль четырёх смещенных на 2 мм осей (1200 замеров в каждой секции).

Рассмотрение результатов показало, что наибольшая наглядность достигается при нанесении точек, соответствующих координатам конца вектора (годографа) поперечной составляющей ( $H_{\perp}$ ) на плоскость XOY. Соединив эти точки последовательно, получаем плоскую картину поведения поперечного поля вдоль оси ускорителя. В соответствующем масштабе эта картина даёт представление об угловых отклонениях вектора продольного поля от оси в каждой данной её точке  $Z$ . Так, окружности на рис. 1,2,3 соответствуют отклонениям  $H$  на один, полтора и два градуса. На рис. 4,5,6 приведены аналогичные кривые, смоделированные на ЭВМ для составного соленоида, составленного из идеального качества катушек наклоненных, а также сдвинутых одновременно наклоненных и сдвинутых по отношению к оси произвольным образом. Здесь окружность соответствует отклонениям  $H$  на 0,5 градуса. Из сравнения незамысловатых расчетных и более витиеватых практических кривых возникает представление о том, что некоторые катушки как бы составлены из нескольких сдвинутых и наклоненных катушечек, т.е. их магнитная ось искривлена при изготовлении, и геометрическая корректировка катушки как целого в этих случаях бесполезна.

Помимо этого, в глаза бросается смещение "центра тяжести" практических кривых, отражающее систематическое уклонение  $H$ .

Последнее легко объяснить конструктивным промахом, который состоит в том, что многослойные обмотки толстыми проводами имеют заметный наклон витков, для компенсации которого требуется чётное число слоёв в обмотке, а это-то требование и оказалось не выполненным.

Полученные таким образом представления о существовании поперечных неучтённых магнитных полей (помех) величиной до примерно 5% от величины ведущего продольного поля, случайным образом распределённых вдоль оси ускорителя, требовали оценки возможных практических действий. Для этого модель составного соленоида с варьируемыми дефектами ведущего поля была включена в комплект программ для расчета ускорения т.е. осевого электрона, т.е. получена возможность изучения поведения оси пучка в условиях заданного уровня помех. Как и предполагалось, в простейшем случае статистического распределения амплитуд и азимутов помех (использовалась стандартная программа) для благополучной проводки осевого электрона требуется примерно стократное уменьшение поперечных полей вдоль всего инжекторного участка. Это могло означать, что предстоит замена всех 169 катушек новыми с расходом 1-2 т меди и соответствующими трудовыми затратами. В то же время лишь при нулевом уровне помех траектория движения осевого электрона прямолинейна. Во всех остальных случаях она имеет форму спирали, и ускоритель перестаёт быть линейным, поскольку становится спиральным. Характер поведения спирали определяется не только характером помех, но и энергией инжекции, углом входа в первую секцию, темпом ускорения и величиной ведущего поля. Следовательно, цель может быть достигнута не только путём снижения уровня помех до

0,05% при замене катушек или увеличении величины ведущего поля, но и , например, за счет повышения энергии инжекции с одновременным частичным улучшением качества ведущего поля в начальной части ускорителя путём отбора годных катушек. Поскольку в пушках ЛИУ-30 используются детали серийных приборов, повышение энергии инжекции в прямом смысле невозможно. Если же условно включить в понятие форинжектора (пушки) и первые четыре секции с набором энергии по 250 кэВ в каждой, то энергия инжекции достигнет 1,3МэВ, и в остальных восьми секциях инжекторного участка по данным расчета потребуется не стократное, а примерно десятикратное снижение помех. При этом поле в первых секциях должно приближаться к иде-<sup>ускорителя</sup>альному, что и по опыту АТА, и по результатам расчетов можно ограничить рамками 0,05%. В этом случае потребуется изготовить лишь 56 катушек, с учетом того, что новая конструкция их должна быть согласована и с электротехническими, и с технологическими возможностями. При сортировке же имеющихся катушек, к сожалению, потребуется полная переборка инжекторного участка. Индивидуальный контроль поля каждой катушки потребует учета влияния на характеристики поля пермаллоя индукторов, поскольку экспериментально показано, что смещение тороидального сердечника индуктора относительно оси ускорителя вызывает сдвиг магнитной оси отдельной катушки примерно на пятую часть величины смещения. Во время перемагничивания сердечника за счет существенного изменения магнитной проницаемости это влияние может проявляться и иначе.

Описанная выше реконструкция ведущего поля неизбежна и в случае т.н. неламинарного варианта проводки пучка при увеличенном поле, поскольку пропорциональное же увеличение помех усложняет любой вариант. Кроме того, конструктивные

ограничения объёма меди в катушках и предельных тепловых режимов изоляции потребуют применения импульсных режимов питания составного соленоида, т.е. еще и дополнительной реконструкции системы питания, а также аппаратуры для магнитных измерений.

## 2. Магнитные помехи в виде рассеянных полей

Известные несоответствия между замыслами и фактическими результатами проводки пучков в ЛИУ различных классов указывают на существование общего для всех машин фактора, "путающего карты" теоретиков. Суть явления состоит в том, что всегда лучшие результаты получаются, если пользуются лишь приосевой частью апертуры, коллимируя или сжимая пучок. В то же время все ЛИУ объединены одним общим процессом. Напряженность вихревого ускоряющего поля

$E$  пропорциональна скорости нарастания магнитного потока, возбуждаемого в тороидальных магнитных сердечниках индукторов токами через перематнивающие обмотки. Таки эти всегда протекают в непосредственной близости от ускоряемого пучка и одновременно с ним. Чем более сильноточен ускоритель, тем большими перематнивающими токами достигается это преимущество. Так, в ЛИУ/30 перематнивающий ток в каждом индукторе достигает 800А, в АТА-20кА, причем в первом случае он растекается параллельно по трём, а во втором - по двум проводникам, симметрично разнесенным по периметрам тором.

Из электротехники же известно, что тороидальные трансформаторы обладают минимальным рассеиваемым в окружающее пространство магнитным потоком лишь при условии, что возбуждающие обмотки равномерно распределены по всему периметру тора. Как мы видели, это условие в ЛИУ не выполняется.



Таким образом, возникла задача о магнитных полях рассеяния (МПР) в приосевой области ЛИУ и о взаимодействии с ними ускоряемого пучка.

На первом этапе изучения МПР был использован режим размагничивания, при котором сердечник перематывали по предельной петле гистерезиса неизменным во всех опытах переменным током 30 А, 50 Гц. Обмотки состояли из одного, двух, трех или четырех параллельно включенных проводников с соблюдением симметрии размещения. Дополнительное условие состояло в том, что каждый проводник представлял собой плоскую петлю, и плоскости петель обязательно пересекались на оси ускорителя. При составлении секций из таких индукторов существенными для рассмотрения оказывались только параллельные оси ускорителя отрезки проводников, поскольку МПР прочих частей компенсировались за счёт бифилярности обмоток соседних индукторов. Отрезки же эти образовывали как бы непрерывные проводники с током вдоль всех секций (рис. 7). В этом случае для простоты нами исключались и азимутальная вариация, и продольная составляющая МПР. Так конструктивно исполнен, например, АТА. Все индукторы ЛИУ-30, наоборот, для сокращения длины ускорителя выполнены с азимутальной вариацией. Причём в 92 основных секциях при трехпроводниковых обмотках входные и выходные части проводников разнесены по периметру тора на 60 градусов, за счет чего и возникает азимутальная вариация, поскольку вдоль прямой, параллельной оси, отрезки с токами образуют прерывистую линию, с периодом, равным осевой протяженности индуктора (рис. 8).

Устранив вариацию и продольную составляющую МПР, мы измеряли радиальную  $H_r$  и азимутальную  $H_\varphi$  составляющие с помощью многовитковой катушки и синхроскопа. Оказалось, что в пределах рабочих значений радиусов  $R$  ускорительного тракта ( $\varphi_0 R = 4$  см при  $R_{\text{макс.}} = 9$  см) МПР образуют характерные для т.н. токовых

квадруполей, секступолей и октуполей распределения при двух, трех и четырех проводниках в обмотке соответственно. Влияние окружающего ускорительный тракт пермаллоя проявляется так,

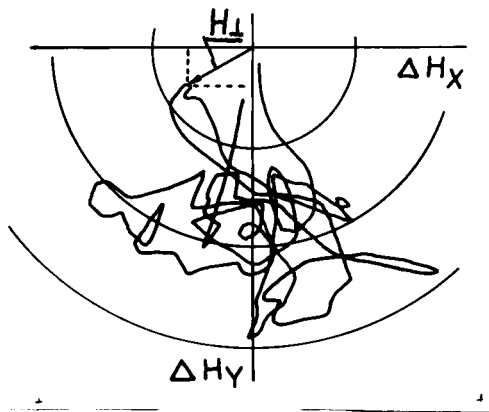
что в промежутках между реальными проводниками с током, при движении датчика по азимуту, составляющая  $H_{\varphi}$  меняет свое направление на противоположное, будто там расположены проводники со встречным током меньшей величины. Иными словами, азимутальное распределение  $H_{\varphi}$  носит примерно косинусоидальный, а  $H_R$  - синусоидальный характер с числом периодов, равным числу проводников при начале отсчета на азимут проводника.

(рис.9). Спад составляющих МПР при удалении от проводника в сторону оси ускорителя вдоль радиуса (рис.10) связан с расстоянием примерно линейной, квадратичной или кубической зависимостью для двух, трех или четырех проводников. В случае однопроводниковой обмотки радиальные распределения асимметричны относительно оси ускорителя. Это обстоятельство может быть причиной возникновения поперечных помех со случайным распределением их амплитуд и азимутов, если токи через проводники обмоток данного индуктора с многопроводниковой обмоткой по какой-либо причине различаются. Проведённые на ЛМУ-30 в режиме размагничивания измерения (рис.11) показали, что как входные, так и выходные токи проводников отдельных индукторов могут отличаться даже на 30%, что соответствует амплитуде импульсной МПР помехи на оси порядка 10 Эрстед. Устранение разброса переходных сопротивлений, например, путём использования на макете цельковых проводников, приводило к выравниванию токов и восстановлению симметрии МПР.

Все результаты, полученные в удобном для измерений режиме размагничивания, требовали подтверждения в рабочем режиме, когда сердечники индукторов перемагничиваются за время  $5 \cdot 10^{-7}$  сек. импульсными токами до 800 А при напряжении 22 кВ. Для этого был изготовлен индукционный датчик, позволявший безопасно и одновременно вести измерения трех ортогональных составляющих импульсного МПР с требуемыми чувствительностью, временным и пространственным разрешением. Три согласованных с кабелями катушки датчика по 200 витков со средним диаметром 5 мм и соответствующими электростатическими экранами помещались в один из каналов, просверленных в монолитном цилиндрическом защитном блоке из оргстекла. Блок, вставленный в секцию ЛЛЮ, мог дистанционно перемещаться в осевом и азимутальном направлениях. Амплитуды и фазы всех трех составляющих МПР регистрировались с помощью синхроскопа. Полученные результаты в основном совпали с приведенными выше, т.е. ими можно пользоваться для оценок МПР помех в основных секциях ЛЛЮ-30 с учетом того, что поле вблизи проводников достигает 100 Эрстед (в АТЭ - 3 кЭ). Пример распределения импульсных МПР вдоль части одной из основных секций ЛЛЮ-30 приведен на рис. 12 и рис. 13 (кривая 2).

Однако, в импульсном режиме обнаружен ряд особенностей. Первая из них проявилась в нарушении характера распределения поперечных составляющих МПР в случае несимметричного подключения резисторов параллельно одному из проводников обмоток индукторов. Такие подключения, употребляемые для стабилизации модуляторов, ведут к изменению не только величины, но и направления МПР в области подгруженного проводника. Равномерное распределение подгрузки между всеми проводниками ведёт к восстановлению симметрии (рис. 13).

Вторая особенность касается 12 инжекторных секций, где во внутреннюю полость введён составной соленоид, каждая из катушек которого имеет проводящий электростатический экран. Магнитные поля наведённых в экране импульсных противотоков, будучи сдвинутыми по фазам гармоник спектра импульса, искажают картину, частично компенсируют МПР. Требуются более детальные исследования этой особенности прежде чем обсуждать возможные практические решения.



соответствуют уклонениям вектора ведущего поля  $H$  на 0,5, 1,0 и 1,5 градуса. Усреднённое уклонение вектора  $H$  в этой секции около 1 градуса в нижнюю полуплоскость.

Рис. 1. Синтезированная по измеренным в 200 точках составляющим  $H_x$  и  $H_y$  проекция годографа вектора поперечного магнитного поля  $H$  на плоскость  $Z = const$  характеризует качество составного соленоида 4-й секции инжекторного участка ЛИУ-30. При  $H=300$  Э усреднённая по модулю величина помехи  $H = (5,5 \pm 0,3) \text{ Э}$ . Окружности

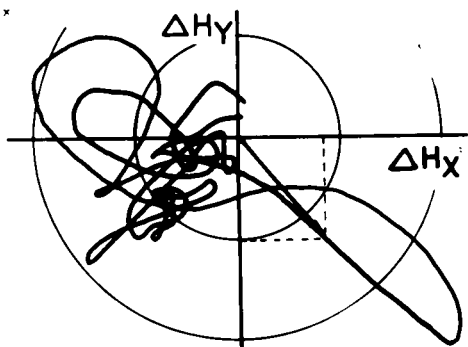


Рис. 2. В более качественном соленоиде 1-й секции имеются значительные локальные дефекты.

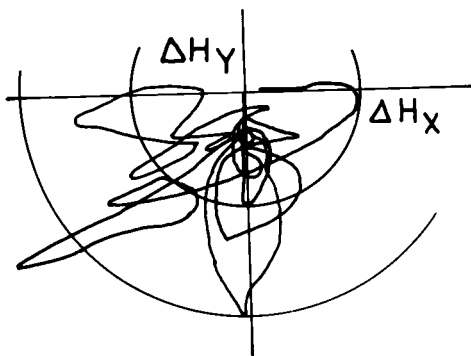


Рис. 3. "Уход" характеристики и 3-й секции в нижнюю полуплоскость возможно подтверждает закономерность уклонения вектора  $H$  в данной конструкции соленоида.

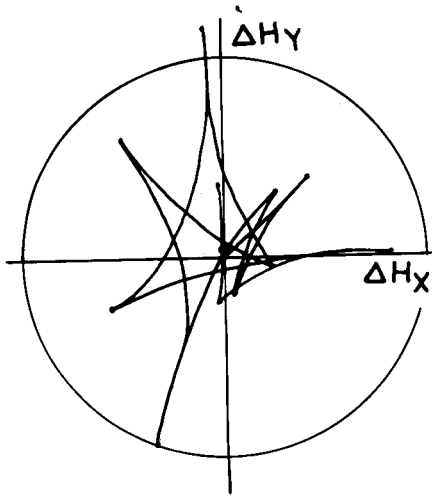


Рис. 4. При моделировании составного соленоида на ЭВМ наклоны "идеальных" катушек на различные углы при различных азимутах дают симметричный годограф. Окружность соответствует углу в полградуса.

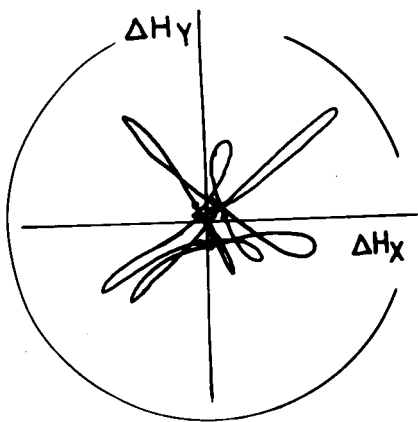


Рис. 5. Параллельным сдвигом осей катушек относительно оси ускорителя соответствует симметричный годограф с округлыми контурами.

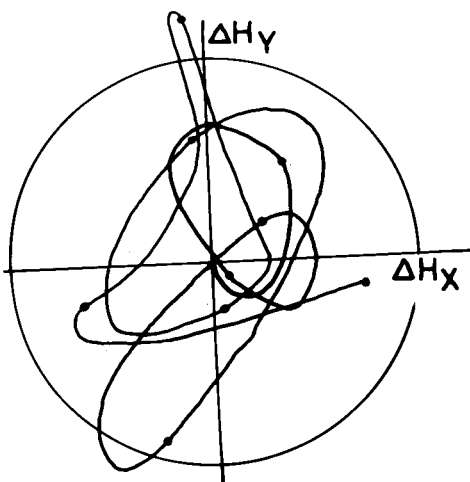


Рис. 6. Одновременный учет при моделировании наклонов и сдвигов, принятых на рис. 4 и 5 приводит к представленному здесь виду годографа. При движении вдоль оси ускорителя от медианной плоскости одной катушки (помечены точками) до медианной плоскости соседней конец вектора ведущего поля описывает плавную дугу без "перехлестов", наблюдаемых на рис. 1, 2, 3. Для возникновения же каждого "перехлеста" требуется более двух плохо сориентированных "идеальных" катушек.



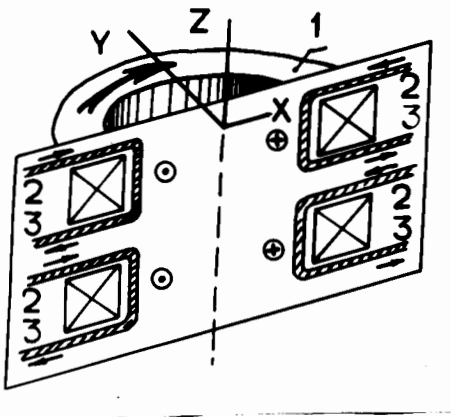


Рис. 7. Перемагничивание сердечников 1 токами через двухпроводниковые одновитковые обмотки, расположенные в плоскости рисунка. При направлении токов от 2 к 3, например, рассеянные магнитные поля слева от оси  $OZ$  направлены к читателю (помечено точкой в кружке), а справа - от читателя (крестик в кружке), т.е. навстречу

основному магнитному полю в сердечнике (помечено стрелкой).

При обходе вокруг оси  $OZ$  МПР четырежды меняют направление, а при движении вдоль оси на заданном азимуте направление МПР остаётся неизменным.

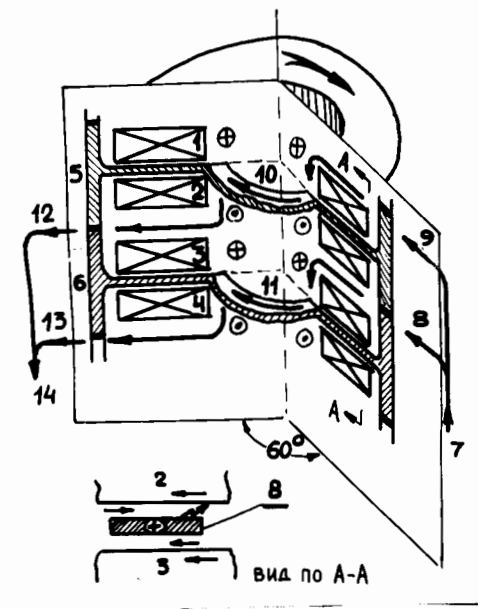


Рис. 8. Случай, когда входные 8,9 и выходные 12,13 части трехпроводниковых обмоток ЛМУ разнесены по азимуту на угол  $60^\circ$ , а корпуса индукторов 5,6 соединены электрически, имеет ряд особенностей. Токи в перемычках 10,11 создают продольную составляющую МПР, поперечные составляющие оказываются знакопеременной функцией  $Z$  (обозначено точками и крестиками), а в случае различных характеристик сердечников 1,2 или 3,4 появляется возможность перетекания тока, например, из 9 в 13, минуя сердечник с наибольшим в данный момент импедансом 2. Вид А-А поясняет причину пробоев с входного проводника 8 на "чужой" сердечник 2 из-за отсутствия "сдувающего" магнитного поля, т.к. МПР проводника и сердечника компенсируют друг друга (см. стрелки).

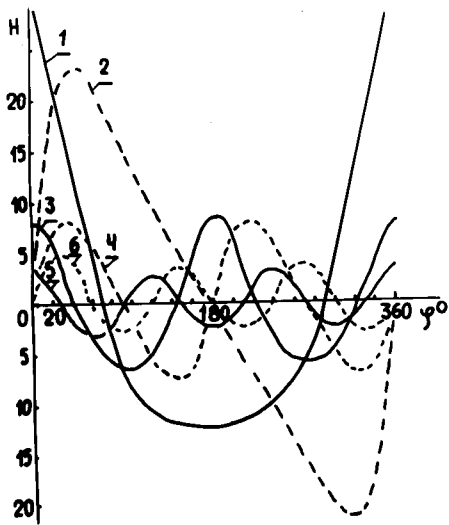


Рис. 9. Распределения азимутальных  $H_\phi$  (1,3,5) и радиальных  $H_r$  (2,4,6) составляющих МПР по азимуту для одного, двух и трех проводников в обмотке индуктора соответственно на радиусе  $R = 4$  см при удалении проводников от оси  $R_{\text{макс}} = 10$  см.

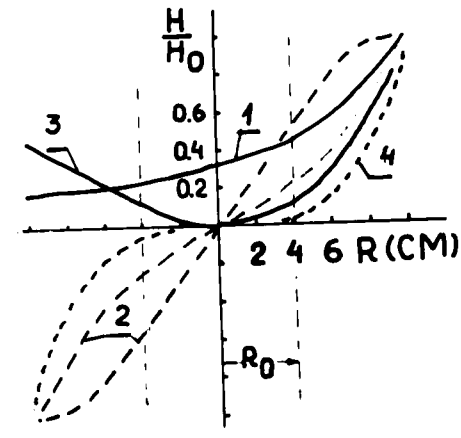


Рис. 10. Распределения  $H_\phi$  составляющей МПР вдоль радиуса индуктора для однопроводниковой (1), двух, трех и четырехпроводниковых обмоток (2,3,4). Симметрия относительно оси ускорителя  $R=0$  свойственна лишь обмоткам с чётным числом проводников.  $R_0$  - радиус вакуумной камеры ЛИУ-30.

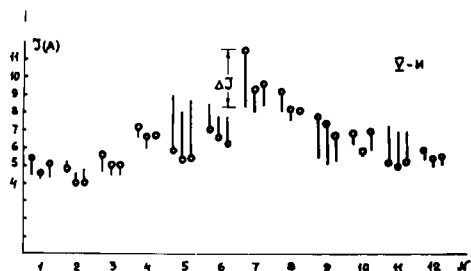


Рис. 11. В каждом из двенадцати индукторов (№ 1-12 по горизонтальной оси) 5-й секции инжекторного участка ЛИУ-30 были измерены "втекающие" и "вытекающие" токи размагничивания  $\mathcal{I}$  (А) каждого из трех проводников. Разность этих токов, например, в первом проводнике седьмого индуктора, обозначенная как  $\Delta \mathcal{I}$ , положительна (кружок вверх) и равна 3,5 А.

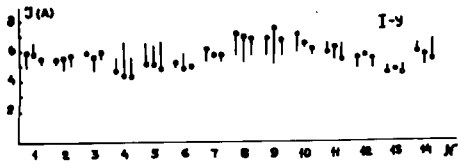


Рис. 11. В первой секции первого участка I4 индукторов, но спада тока к краям секции не наблюдается, т.к. подводящие шины здесь не вносят заметных потерь. Сумма же положительных и отрицательных  $\Delta J$  в обоих случаях равна нулю, чем наглядно объясняется механизм перетекания токов по корпусам из-за разброса параметров сердечников.

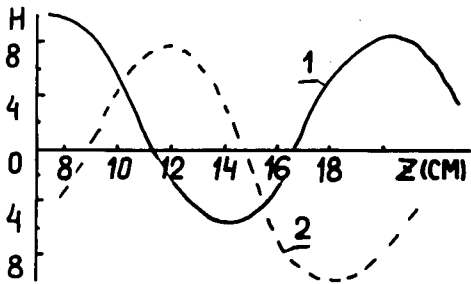


Рис. 12. Импульсные МПР в ЛИУ-30.

1 -  $H_y(z)$  при  $\Phi = 270^\circ$   
 2 -  $H_z(z)$  при  $\Phi = 240^\circ$

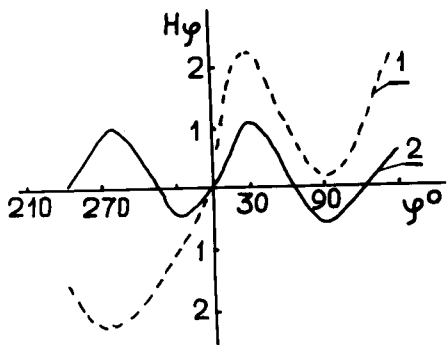


Рис. 13. Характер азимутального распределения  $\Phi$  - составляющей (2) МПР нарушается при подгрузке резисторами проводника обмотки индуктора, расположенного на азимуте  $\Phi = 270^\circ$  (1).