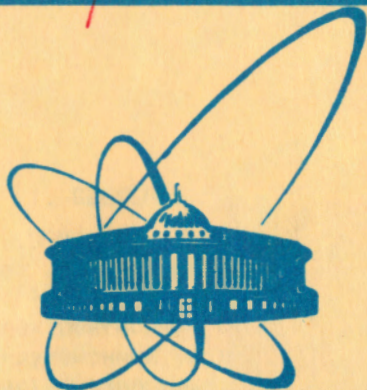


1200/82

9/III-82



**сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна**

**P9-81-809**

**В.И.Казача, И.В.Кожухов, В.В.Косухин,  
В.А.Прейзендорф, А.И.Сидоров**

**МАГНИТНАЯ СИСТЕМА  
ИНДУКЦИОННОЙ СЕКЦИИ  
ДЛЯ УСКОРЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОН-ИОННОГО КОЛЬЦА**

**1981**

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В Отделе новых методов ускорения ОИЯИ осуществлено ускорение электрон-ионного кольца в линейно-спадающем магнитном поле<sup>/1/</sup> соленоида предварительного ускорения /СПУ/. Затем электрон-ионное кольцо было ускорено<sup>/2/</sup> в электрическом поле индукционной ускоряющей секции<sup>/3/</sup>, которая является основной частью различных линейных индукционных ускорителей /ЛИУ/, предназначенных для ускорения прямых интенсивных пучков. Однако для ускорения электрон-ионных колец многие узлы индукционной секции требуют значительной переделки. В первую очередь это относится к узлам формирования магнитного поля, в котором электрон-ионное кольцо транспортируется от СПУ до приемного устройства /мишени/. Это связано с тем, что в данном случае необходимо на радиусе кольца  $R_0=40$  мм по всему тракту его движения сформировать магнитное поле, амплитуда и градиенты которого удовлетворяли бы условиям<sup>/1/</sup>:

$$B_z(R_0, z) = 1 \text{ Т},$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} \leq 5 \cdot 10^{-1} \text{ Т/м.}$$

/1/

Для создания индукционной секции были использованы индукторы ЛИУ-3000<sup>/4/</sup>. В апертуре индукторов помещены катушки, формирующие магнитное поле /рис.1/. Зазор между катушками в собранной из индукторов секции должен выдерживать импульсное напряжение питания индукторов. При указанных размерах катушки магнитное поле  $B_z=1$  Т можно получить при импульсной запитке катушки. Одновременно следует изменить конструкцию первичного витка индуктора с тем, чтобы удовлетворить взаимно противоречивым требованиям: обеспечить защиту сердечника индуктора от насыщения рассеянными магнитными полями и минимально исказить ведущее магнитное поле катушек.

Требование малости градиентов магнитного поля /1/ по всему тракту обязывает учитывать согласование магнитных полей СПУ и индукционной секции и влияние на магнитное поле конструкций различных приемных устройств. Эту задачу можно выполнить с помощью согласующих соленоидов, расположенных на торцах индукционной секции.

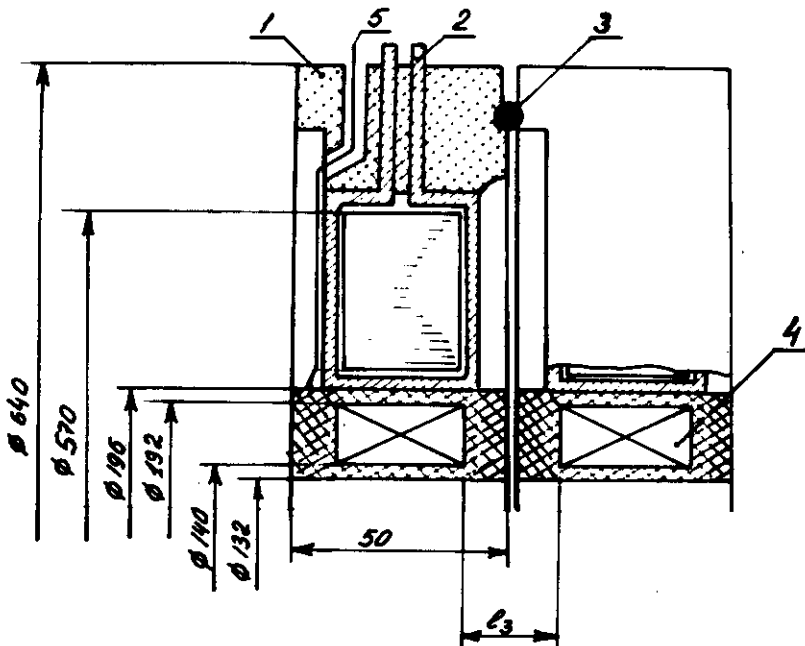


Рис.1. Индуктор ЛИУ-3000. 1 - компаунд; 2 - первичный виток; 3 - уплотнение; 4 - катушка; 5 - вывод катушки;  $l_3$  - зазор между катушками.

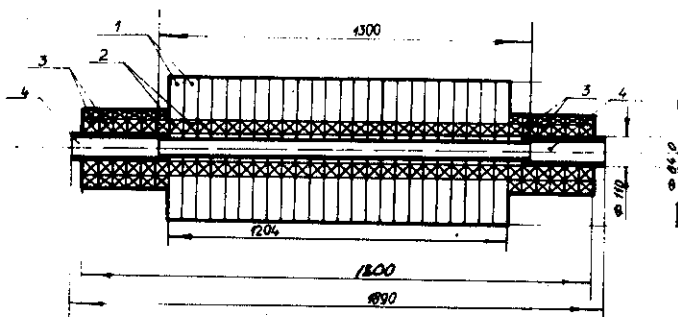


Рис.2. Схематический чертеж индукционной секции. 1 - индуктор /24 шт./; 2 - катушки индукторов; 3 - катушки соленоидов; 4 - диэлектрическая трубка.

Рассматриваемая индукционная ускоряющая секция схематически представлена на рис.2. Ниже приводятся результаты расчета и наладки основных ее узлов.

## 2. РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ИНДУКТОРА И ИНДУКЦИОННОЙ СЕКЦИИ

Для расчета полей использовалась методика, предложенная в работе /5/. Считая внешние токи  $I_B$ , экраны и наведенные в экранах токи  $I_H$  аксиально симметричными и разбив экраны на  $N$  достаточно малых аксиально-симметричных колец, можно написать систему уравнений для нахождения в этих кольцах наведенных токов:

$$I_k \cdot R_k + \frac{\partial}{\partial t} \left[ \sum_{i=1}^N I_i M_{ik} \right] = - \frac{\partial}{\partial t} [2 \cdot \pi \cdot r_k \cdot A_{Bk}]. \quad /2/$$

Здесь  $I_k, R_k, r_k$  - наведенный ток, сопротивление и радиус  $k$ -го кольца экрана;  $M_{ik}$  - взаимдуктивность  $i$ -го и  $k$ -го колец;  $M_{ii}$  - самоиндуктивность колец;  $A_{Bk}$  - векторный потенциал внешних токов на  $k$ -ом витке. Если удельное сопротивление  $\rho$  металла экрана мало, а  $d \gg \delta$ , где  $d$  - толщина экрана,  $\delta$  - скин-слой, то выражение /2/ упрощается:

$$\sum_{i=1}^N I_i M_{ik} = -2 \pi \cdot r_k \cdot A_{Bk}. \quad /3/$$

В работе /6/ показано, что для определения амплитуд наведенных токов выражение /3/ справедливо вплоть до  $d \approx \delta$ .

Зная токи  $I_B$  и  $I_H$ , по известным правилам /7/ можно определить векторный потенциал и компоненты  $V_z(r, z)$  и  $V_r(r, z)$  в интересующей нас области  $V_\phi = 0$ . Для индуктора ЛИУ-3000 /рис.1/ токи в катушке 4 являются внешними, а первичный виток - экраном. Основные расчеты по определению геометрии первичного витка, катушки и параметров поля проводились по формуле /3/, затем уточнялись и корректировались на основании системы уравнений /2/.

Первый этап расчетов магнитного поля был проведен для одиночного индуктора /с катушкой/ с целью выбора конструкции его первичного витка. Размеры катушки и первичного витка показаны на рис.3. Катушка содержит 80 витков. Первичный виток индуктора /рис.3б/ сплошной, без разрезов. Виток индуктора 3в имеет разрезы на цилиндрической поверхности. Разрезы продолжены по боковым поверхностям на величину  $\Delta r$ . Там же представлены соответствующие кривые распределения  $V_z(R_0, z)$  при амплитуде тока в катушке  $I_B = 1$  кА. Если указанные кривые отнормировать на собственный максимум, то кривая 1 будет наиболее полой, кривая 2 - наиболее острой. Остальные займут промежуточное значение. Следовательно, наименьшие искажения поля катушки вносит первичный виток 3в с большим  $\Delta r$ . Это объясняется тем, что почти 90% наведенного в первичном витке тока сосредоточено в двухсантиметровой области от конца разрезов  $\Delta r$  /рис.4-1/. С увеличением  $\Delta r$  влияние наведенного тока на поле в области кольца уменьшается.

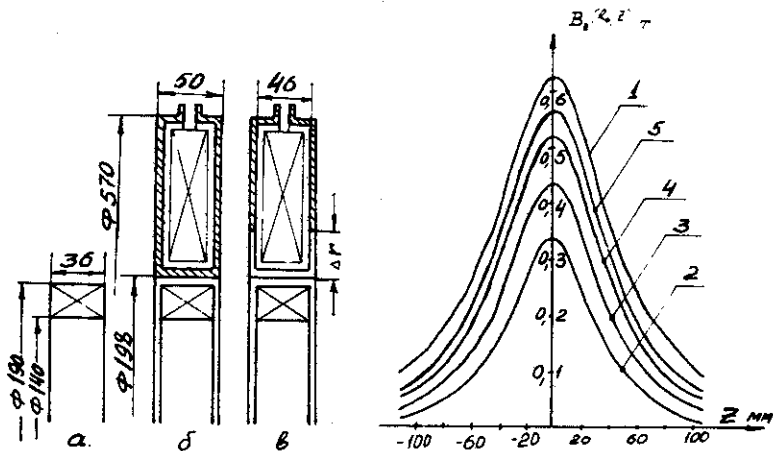


Рис.3. Катушка /а/, индуктор /б,в/ и распределение их магнитных полей. 1 - для  $\Delta r$ ; 2 - для  $\Delta r$ ; 5 - для  $\Delta r$ , соответственно  $\Delta r = 20$  и  $40$  мм.

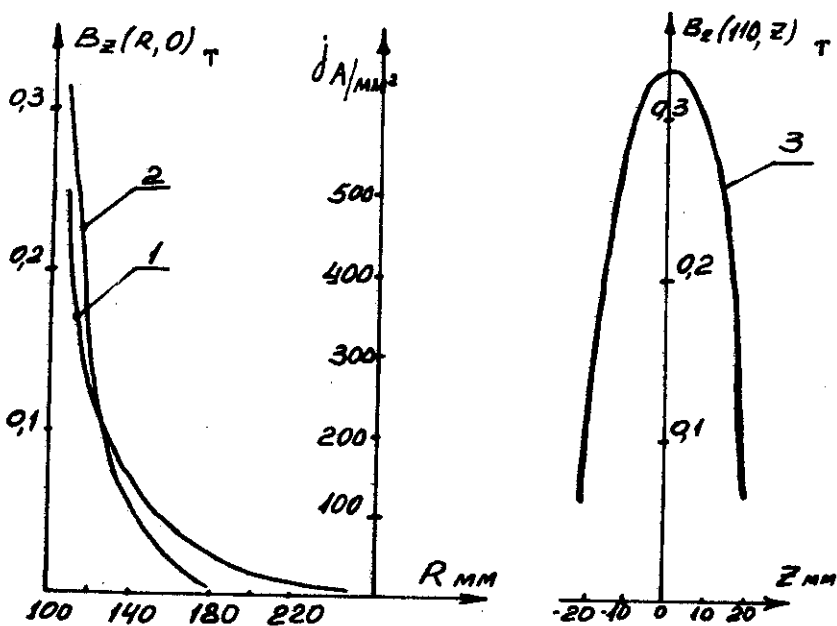


Рис.4. Распределение плотности наведенного тока /1/ по первичному витку и поля /2,3/ в полости индуктора  $\Delta r = 0$ .

Наличие разрезов  $\Delta r$  в первичном витке индуктора уменьшает его экранирующее действие. Магнитное поле, проникнув в область нахождения сердечника, может привести часть его, прилегающую к разрезам, в насыщенное состояние, т.е. уменьшить эффективность сердечника. Распределение поля в полости индуктора /без учета сердечника/ показано на рис.4 /2,3/. Можно предположить, что сердечник окажется насыщенным на глубину, превышающую разрез на 10-20 мм.

Второй этап расчетов проводился с целью уточнения размеров первичного витка и катушки. Расчеты сделаны для средней области индукционной секции, собранной из 50 индукторов /рис.1,2/. Найдено, что при зазоре между катушками  $l_3 = 14$  мм /ширина катушки 36 мм/ градиенты поля превышают допустимые, указанные в /1/, даже без учета влияния первичных витков индуктора. Поэтому взят минимально выполнимый зазор  $l_3 = 9$  мм /ширина катушки 41 мм/. Для этого зазора на рис.5а представлены нормированные на 1 Т графики поля  $B_z(R_0, z)$  для первичных витков /рис.3в/. Для сравнения приведен график поля при отсутствии первичных витков /кривая 1/. С увеличением  $\Delta r$  одновременно увеличивается амплитуда поля /рис.5б/.

Основываясь на рис.4 и 5, следует выбрать  $\Delta r = 20$  мм. При этом толщина насыщенного слоя сердечника будет допустимой для индуктора ЛИУ-3000, если запитывать его импульсным напряжением амплитудой 30 кВ и длительностью 200 нс. Для улучшения азимутальной однородности следует сделать 8-12 равномерно расположенных разрезов.

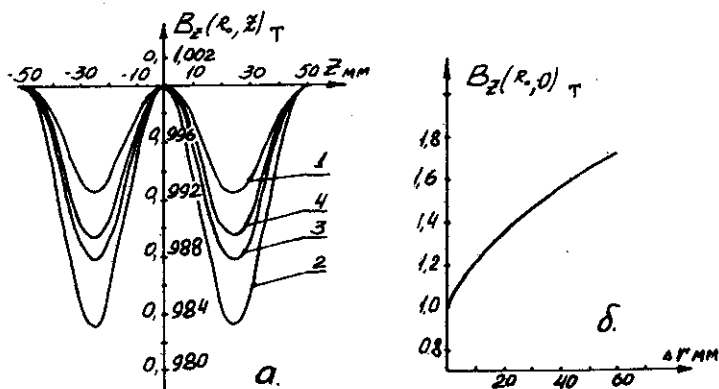


Рис.5. Пульсация /а/ и амплитуда поля /б/ секции при различных первичных витках. 1 - без учета влияния первичных витков; 2,3,4 -  $\Delta r = 0, 20$  и 40 мм соответственно.

Выше было отмечено, что для согласования магнитных полей индукционной секции, СПУ и приемного устройства используются согласующие соленоиды, расположенные по торцам секции. Конструктивно соленоиды и секция выполнены как одно целое. Согласующие соленоиды содержат по 6 катушек, аналогичных катушкам индукторов, расположенных в диэлектрических корпусах. Период и зазор между катушками /по меди/ такие же, как и в секции, т.е. 50 и 9 мм соответственно. Если известны поля  $B_z(z)$  СПУ и секции, то методом подбора токов в катушках согласующего соленоида и в первых катушках секции эти поля можно согласовать с требуемой точностью. Расчеты показали, что без таких соленоидов требуемое согласование полей невозможно.

Результаты расчета величины тока в катушках и расчета поля  $B_z(R_0, z)$  представлены на рис.6 /1,3/, где 100% соответствуют 775 А. По оси абсцисс отложено расстояние от медианной плоскости адгезатора и номера катушек /6 катушек первого согласующего соленоида, 24 катушки индукторов, 6 катушек второго согласующего соленоида/. Последние три катушки /34-36/ запитаны одинаковым током с целью облегчения требований к источникам их питания. Если потребуются согласовать магнитное поле секции с другим приемным устройством, величина тока в катушках второго соленоида будет иной.

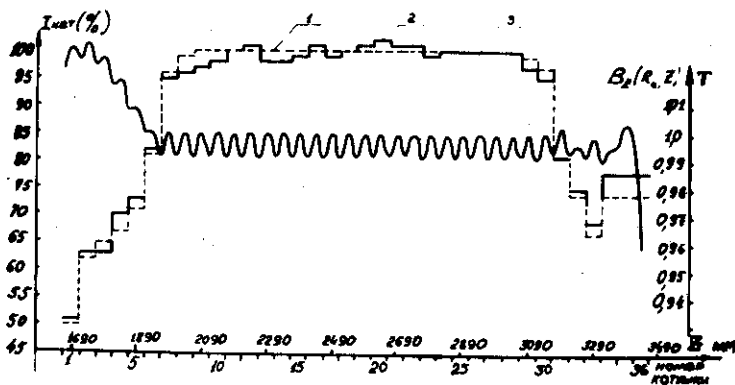


Рис.6. Гистограммы расчетного /1/, установленного /2/ токов катушек и график расчетного значения поля  $B_z(R_0, z)$ .

### 3. ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ СЕКЦИИ

За основу были взяты рассчитанные значения тока катушек согласно рис.6. Видно, что по величине тока все 36 катушек можно разбить на 5 групп и присоединить их к схемам питания согласно рис.7. Зарядка всех пяти конденсаторных батарей от одного общего выпрямителя и одновременный запуск всех тиристор-

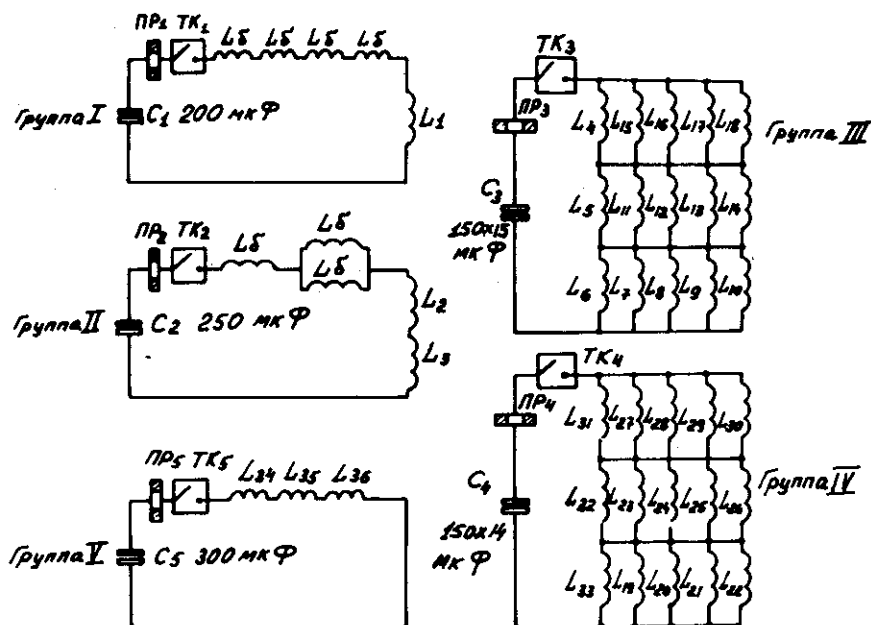


Рис.7. Схемы питания катушек  $L_1 \div L_{36}$ . ПР - пояса Роговского; ТК - тиристорные ключи; С - конденсаторные батареи;  $L_5$  - балластные индуктивности.

ных ключей ТК от одного общего управляющего устройства обеспечивает значительные преимущества при создании и эксплуатации всей системы. Ключи ТК обеспечивают рекуперацию энергии<sup>/8/</sup>. Импульс тока в катушках имеет форму полусинусоиды, длительность которой  $T_r$  во всех группах одинакова с точностью  $\pm 5\%$ .

Расчетная индуктивность основных / III и IV / групп - 0,8 мГ, а расчетный суммарный ток в группах - 3-4 кА. При рабочем напряжении 3-4 кВ / конденсаторы ИМ-5-150 / легко определить:  $C_3 \approx C_4 = 2200 \mu\text{F}$ ,  $T_r = 4,5 \text{ мс}$ . При такой длительности  $T_r$  магнитное поле будет меняться меньше, чем на 1%, если кольцо будет транспортироваться с разбросом  $\pm 100 \mu\text{с}$  вблизи максимума поля.

Установка тока в максимуме импульса в каждой катушке III и IV групп, согласно рис.6, осуществлялась с точностью  $\pm 2\%$  при помощи добавочных сопротивлений из полосок стали 12ХТ8НТ толщиной 0,3 мм. Величина тока в катушках I, II и V групп устанавливалась путем одновременного изменения емкости конденсаторной батареи и балластной индуктивности  $L_5$ . Измерительная аппаратура позволяла определять величину тока с точностью  $\pm 0,3\%$  / см. рис. 6 гистограмма 2/.



Окончательная коррекция тока в катушках была проведена на основании магнитных измерений с помощью модернизированного импульсного холловского магнитометра МИХ-2<sup>9/</sup>. В основном корректировалась величина тока 1-3 катушек, ибо в области стыковки СПУ - индукционная секция градиенты поля оказались в 2 раза выше допустимых <sup>1/</sup> из-за увеличенного зазора между СПУ и индукционной секцией.

Расчетные и измеренные значения поля индукционной секции и его градиентов представлены в работе<sup>3/</sup>.

При загрузке электронного кольца легкими ионами или протонами градиенты магнитного поля должны быть  $\sim 10 \frac{\partial B_z}{\partial z} \approx 0,1$  Т/м. Получить такие градиенты в секции из индукторов ЛИУ-3000 можно в основном за счет применения профильных катушек. Например, если в катушках убрать по 4 витка в центральной части двух внутренних слоев, то максимальные градиенты поля уменьшатся на  $2 \cdot 10^{-1}$  Т/м, и влияние зазора между катушками будет меньше, чем влияние конструкции первичного витка индуктора.

На основании изложенного была создана магнитная система индукционной секции прототипа КУТИ, удовлетворяющая поставленным требованиям, в которой осуществлены транспортировка и ускорение электрон-ионного кольца<sup>2/</sup>.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить В.П.Саранцева и Л.Н.Беляева за постановку задачи, ценные советы и постоянную помощь в работе; В.М.Лачинова, В.С.Александрова и участвовавших под их руководством в эксперименте сотрудников за организацию и проведение магнитных измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9-1191, Дубна, 1978.
2. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9-12414, Дубна, 1979.
3. Саранцев В.П. и др. ОИЯИ, Р9-12124, Дубна, 1979.
4. Анацкий А.И. и др. АЭ, 1966, 24, с. 439, 1966.
5. Дерендяев Ю.С. и др. ОИЯИ, Р9-9140, Дубна, 1975.
6. Кузнецов А.Б. и др. ОИЯИ, Р9-11656, Дубна, 1978.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред, гл. IV. Госиздат физ-мат. лит., М., 1959
8. Барабаш Л.С. ОИЯИ, Р9-8759, Дубна, 1975.
9. Лачинов В.М. и др. ОИЯИ, Р9-8118, Дубна, 1974.
10. Иванов Г.А. и др. ОИЯИ, Р9-6983, Дубна, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел  
21 декабря 1981 года.