EFI--1293-79-90

Препринт ЕФИ-1293(79)-90

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
YEREVAN PHYSICS INSTITUTE

К.А.САДОЯН

РАЗРАБОТКА МАГНИТОВ ОСОБОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Атоминформ
ЕРЕВАН-1990

Նախնատիպ ԵրՖԻ 1293(79)-90

Կ.Ա.ՍԱԴՈՅԱՆ

ՀԱՏՈՒԿ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ՄԱԳՆԻՍՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԱՐԱԳԱՑՈՒՑԻՉ-ԿՈՒՏԱԿԻՉՆԵՐԻ ՍՏԵՂԾՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

Մշակվել է սինքրոտրոնների և կուտակիչների մագնիսների ճոռնակ շրջանները կուպակցող և միավորող մագնիսի հատուկ տեսակ: Առաջարկվում է, որպես այլընտրական լուծում ստեղծել Երևանի սինքրոտրոնի թունե ում արագացուցիչ-կուտակիչային կոմպլեքս, կուզակցված մագնիսի հիման վրա: Ցույց է տրված, որ այն ունի կպալի առավելություններ սինքրոտ- րոնի կուտակիչ «կույգից» (ձգիչ). բարձրացրած σ e t v գործոն և դուրս ռեռված փնջերի ինտենսիվություն, հավաք մագնիսներ՝ հատարակների հետ՝ անհան հնարավորական համակարգով: Որպես ֆիզիկական հետազոտությունների տեսիք, համալիրի հնարավորությունները լայն են. նրա մագնիսական կա ռուցվածքը թույլ է տալիս կազմակերպել e - e : e - e : e p փնջերի բա խումներ:

Երևանի Ֆիզիկայի ինստիտուտ

Երևան 1990

© Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИатоминформ) 1990 г.

Препринт ЕФИ-1293(79)-90

УДК 621.318:621.384.634.665

К.А.САДОЯН

РАЗРАБОТКА МАГНИТОВ ОСОБОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Разработан особый тип магнита, комбинированный, объединяющий функции магнитов синхротронов и накопителя. Предлагается, как альтернативное решение, создать на базе комбинированного магнита, в тоннеле Ереванского синхротрона ускорительно-накопительный комплекс. Показано, что он имеет существенные преимущества перед традиционным "дуэтом" синхротрон-накопитель (растяжитель) : повышенный duty фактор и интенсивность выведенных пучков, компактные магниты в сочетании с простой, экономичной системой питания. Как инструмент физических исследований возможности комплекса шире, его магнитная структура позволяет организовать столкновения $e^- - e^+$; $e^- - e^-$; $e^- - e^+$ пучков.

Ереванский физический институт

Ереван 1990

Preprint YERPHI-1293(79)-90

K.A. SADOYAN

DESIGN OF MAGNETS OF A SPECIAL CONSTRUCTION FOR ACCELERATOR-STORAGE-RING COMPLEXES

A special type of a combined magnet is designed, which unites the functions of a synchrotron and a storage ring magnet. As an alternative solution, on the basis of this combined magnet it is proposed to create an accelerator-storage ring complex in the tunnel of the Yerevan synchrotron. That is shown to have certain advantages over the conventional synchrotron-storage ring "duet" (stretcher): an enhanced duty factor and intensity of extracted beam, compact magnets with a simple and economical power supply. The potentialities of the complex as an instrument for physics research are wider. Its magnetic structure allows to organize collision of e^--e^+; e^--e^-; e^+-e^- beams.

Yerevan Physics Institute

Yerevan 1990

Магнит особой структуры, на базе которого предлагается создать ускорительно-накопительный комплекс в тоннеле Ереванского синхротрона, объединяет в едином модуле функции магнитов синхротронов и накопителя. Конфигурация магнитопровода и расположение обмоток (рис.I) таковы, что в зазорах магнита генерируются три ведущих магнитных поля. Первые два - для создания ускорительных колец электронов на энергию 6 ГэВ, а третье - для накопительного кольца электронов на такую же энергию. По первой обмотке, расположенной на центральном ярме, течет постоянный ток, и он создает основной поток в магните, который разветвляется на две части: одна замыкается по зазору накопительного кольца (правый сегмент рис.2а), вторая - по зазорам ускорительных колец (левый сегмент рис.2а). По остальным обмоткам, расположенным на полюсах, течет синусоидальный ток, и потоки, созданные ими, циркулируют по зазорам ускорительных колец (рис.2б); в одном зазоре они складываются с внешним потоком, созданным первой обмоткой, в другом - вычитаются (рис.2в). Потоки (рис.3) в зазорах магнита определяются формулами, в кото-

рых магнитным сопротивлением магнитопровода пренебрегали:

а) для накопительного кольца

$$\Phi_н = \frac{I_п W_1}{R_{мн}} , \qquad (I)$$

б) для ускорительных колец

$$\Phi_{у1} = \frac{1}{R_{му1}} \left(I_п W_1 + \bar{I} W_2 \cos \omega t \right) \qquad (2')$$

$$\Phi_{у2} = \frac{1}{R_{му2}} \left(I_п W_1 - \bar{I} W \cos \omega t \right) \qquad (2'')$$

где: - $\Phi_н$, $\Phi_{у1}$, $\Phi_{у2}$ - потоки в зазорах накопителя и ускорителей, $I_п$ - ток в первой обмотке, $\bar{I}$; ω - амплитуда и круговая частота тока в обмотках (2) и (3), W_1 , W_2 , W_3 - количество витков обмоток соответственно, $R_{мн}$, $R_{му1}$, $R_{му2}$- магнитные сопротивления зазоров, t - время.

Складывая (I), (2'),(2''), получим выражения для потока $\Phi_ц$, циркулирующего по центральному ярму:

$$\Phi_ц = \left(\frac{1}{R_{мн}} + \frac{1}{R_{му1}} + \frac{1}{R_{му2}} \right) I_п W_1 + \left(\frac{W_2}{R_{му1}} - \frac{W_3}{R_{му2}} \right) \bar{I} \cos \omega t \qquad (3)$$

складывая (2') и (2''), получим выражения для потока $\Phi_{су}$, поступающего от центрального ярма в ускорительный сегмент магнита:

$$\Phi_{су} = \left(\frac{1}{R_{му1}} + \frac{1}{R_{му2}} \right) I_п W_1 + \left(\frac{W_2}{R_{му1}} - \frac{W_3}{R_{му2}} \right) \bar{I} \cos \omega t \qquad (4)$$

при выполнении условия

$$\frac{W_2}{R_{мч1}} - \frac{W_3}{R_{мч2}} = 0 \qquad (5)$$

выражения (3) и (4) упрощаются

$$\Phi_ц = \left(\frac{1}{R_{мн}} + \frac{1}{R_{мч1}} + \frac{1}{R_{мч2}} \right) I W_1 \qquad (6)$$

$$\Phi_{су} = \left(\frac{1}{R_{мч1}} + \frac{1}{R_{мч2}} \right) I_n W_1 \qquad (7)$$

и получаем сбалансированную магнитную структуру; особенность ее заключается в том, что только в локализованном объеме, т.е. в ускорительном сегменте комбинированного магнита, происходят циклические изменения магнитного потока, в остальных его частях он - постоянный. Это обстоятельство позволяет значительно снизить активные потери в магнитопроводе и стоимость комбинированного магнита, так как в этом случае только ускорительный сегмент необходимо изготовить из шихтованной электротехнической стали. Учитывая эти факторы, в качестве базисного варианта для Ереванского ускорительно-накопительного комплекса с разделенными функциями выбран комбинированный магнит с сбалансированной структурой.

Обсудим некоторые инженерные вопросы проектирования магнита, системы его питания и ускоряющей системы. Предварительные технологические расчеты показывают, что оптимальной является гибрид-

ная конструкция магнита в модульном исполнении, в соответствии с которой накопительный сегмент и центральное ярмо изготавливаются из брусков низкоуглеродистой электротехнической стали, ускорительный сегмент собирается из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм [I] . Обмотки - монолитные, усиленной конструкции, на основе эпоксидных смол. Последовательность сборки магнита такова: собираются две идентичные полюсные конструкции магнитопровода, верхние и нижние (штампованные листы ускорительного сегмента вдеваются в соответствующие пазы брусков накопительного сегмента и под давлением склеиваются), на нижней конструкции устанавливаются центральное ярмо, обмотки и верхняя конструкция магнитопровода и закрепляются. Следует отметить, что гибридная конструкция магнита по прочности уступает обычным магнитам синхротронов, поэтому на этой стадии проектирования провели ориентировочный динамический расчет магнита и наметили способы по повышению прочности гибридного магнита.

Силы, действующие в разных участках магнита (рис.4а), приведенные к единице площади, с достаточной точностью определяются формулами

а) для полюса накопительного сегмента ($F_н$)

$$F_н = \frac{B_н^2}{2\mu_0} \qquad (8)$$

б) для полюсов ускорительного сегмента (F_{y1} , F_{y2})

$$F_{y1} = \frac{B_0^2}{\mu_0} \cos^4 \frac{\omega}{2} t \qquad (9)$$

$$F_{y2} = \frac{B_o^2}{\mu_o} \sin^4 \frac{\omega}{2} t \qquad (10)$$

в) результирующая сила ($F_{ру}$) взаимодействия полюсных конструкций ускорительного сегмента

$$F_{ру} = \frac{B_o^2}{2\mu_o} (3 + \cos 2\omega t) \qquad (11)$$

г) суммарная сила ($F_{мк}$) взаимодействия всех полюсов магнита

$$F_{мк} = \frac{B_н^2}{2\mu_o} - \frac{B_o^2}{2\mu_o} (3 + \cos 2\omega t), \qquad (12)$$

где μ_o - магнитная постоянная, $B_н = \Phi_н S_н^{-1}$ - индукция в зазоре накопительного кольца, $B_o = \Phi_{y1}(2S_{y1})^{-1} = \Phi_{y2}(2S_{y2})^{-1}$ - постоянная составляющая индукции в зазорах ускорительных колец, при выполнении условия $I_n W_1 = \bar{I} W_2 = \bar{I} W_3$, $S_н$, S_{y1} , S_{y2} - площади полюсов накопительного и ускорительного сегментов.

На рис.4б приведены расчетные кривые сил для 6-Гэв-ного режима работы ускорительно-накопительного комплекса. По величине эти силы примерно равны силам, действующим в обычных магнитах синхротронов на ту же энергию, однако переменная составляющая результирующей силы

$$(F_{ру})_{\sim} = B_o^2 (2\mu_o)^{-1} \cos 2\omega t \qquad (13)$$

которой в первую очередь обусловлены процессы, приводящие к разрушению магнита, по величине в два раза меньше, а по частоте в два раза больше, чем переменная составляющая тех же сил в обычных магнитах. Поэтому величина упругих деформаций, вызванных этой силой в комбинированном магните, с учетом влияния инерционных масс, будет примерно в четыре раза меньше, чем соответствующие деформации в обычных магнитах. Несмотря на это, предусмотрено установить "подпорки" на участке действия результирующей силы, т.е. между соседними полюсами ускорительного сегмента. Умеренная величина результирующей силы $F_{рус} = 30Н$ (рис.4б) допускает применять в качестве "подпорок" обмотки монолитной конструкции. Предлагаемое техническое решение опирается: с одной стороны - на анализ условий работы обмоток в существующих ускорителях, с другой - на анализ механических свойств изоляционных компонентов, применяемых в электромашиностроении [I-3] . По этой технологии на последней стадии сборки магнита пространство между обмотками и магнитопроводом под давлением заполняется изоляционными, связывающими компонентами, а затем весь магнит как монолитный модуль проходит термическую обработку. По оценкам магнитный модуль по прочности не уступает обычным магнитам синхротронов.

Выбор конфигурации магнитопровода активных материалов и оптимизация геометрических размеров магнита осуществлены программой, разработанной на основе следующих конструкторских решений и экономических расчетов:

- ширина окна магнитопровода ускорительного сегмента выбирается разной ширине полюса. Выполнение этого условия приведет к максимальному использованию электротехнического листа, выпускае-

мого промышленностью, и сокращению вдвое операции штамповки (рис.5);

- окна магнитопровода полностью заполняются обмотками, которые наматываются массивным проводником прямоугольного сечения с центральным отверстием для водоохлаждения;

- начальные капиталовложения, которые складываются из:

а) стоимости активных материалов (электротехническая сталь, медь, алюминий, изоляционные материалы, склеивающие компоненты и т.д.);

б) стоимости изготовления отдельных узлов магнита, сборки, установки и т.д.;

- эксплуатационные расходы, которые складываются из:

а) стоимости электроэнергии, потребляемой магнитом (активные потери), охлаждающей воды и т.д.;

б) стоимости обслуживания, профилактических, ремонтных и других работ.

Необходимые данные, на основе которых осуществлен поиск оптимальной конструкции магнита в многомерном пространстве технико-экономических параметров активных материалов, приведены в табл.I. В расчетах независимыми переменными являются плотность тока в обмотках, индукция в магнитопроводе, а критерием оценки вариантов априори выбраны следующие экономические показатели:

- соизмеримость первоначальных капиталовложений с эксплуатационными расходами в течение срока ($5-6\ 10^4$ ч) функционирования комплекса;

- минимальное значение суммы капиталовложений и эксплуатационных расходов.

Расчеты показали:

- холоднокатанная текстурованная электротехническая сталь толщиной 0,5 мм, с содержанием 3-3,5% кремния (Si), нашедшая широкое применение в трансформаторостроении, является наиболее подходящим материалом для магнитопровода ускорительного сегмента.

- оптимальное значение индукции в ярмах магнитопровода находится в пределах I,4-I,9 Тл, такая приближенность объясняется в первую очередь специфическими, униполярными магнитными циклами в магнитопроводе. В литературе по магнитным усилителям и дросселям насыщения подобные вопросы освещены в основном для высококачественных, магнитомягких материалов, поэтому экстраполяция этих данных на обычные электротехнические стали носят приближенный ориентировочный характер. Выбор минимального значения индукции приводит к увеличению ширины ярма и повышению механической прочности конструкции магнита;

- применение меди в качестве токопроводящего материала по сравнению с алюминием существенно снижает эксплуатационные расходы, но повышает начальные капиталовложения. Оптимальным являлся бы смешанный вариант - медные обмотки в ускорительном сегменте, а алюминиевые в первой обмотке, расположенной на центральном ярме. Однако, из-з сложностей, связанных с водоохлаждением разнородных металлов (Cu и Al), предпочтение отдано однотипным медным обмоткам;

- выбор изоляционных материалов,количества витков в обмотках осуществлен отдельной подпрограммой. С увеличением числа витков в обмотках сечение проводника и коммуникационных кабелей уменьшается, что приводит к снижению потерь от вихревых (уравнитель-

ных) токов, индуцируемых в обмотках ускорительного сегмента,но вместе с этим приводит к увеличению межслойного и корпусного напряжения. Коэффициент заполнения и механическая прочность многовитковых обмоток - невысокие. Оптимальными оказались обмотки монолитной конструкции с таким числом витков, что напряжение на обмотках W_2 ; W_3 ускорительного сегмента не превышает $3\text{-}4\cdot10^3$ В, а на первой I0-I2 В. В качестве изоляционных материалов выбраны эпоксидные смолы с неорганическими наполнителями (Al , Si).

В табл.2 даны технико-экономические показатели различных вариантов магнита в зависимости от плотности тока в обмотках (σ) при оптимальной величине индукции ($B_я$ = I,5 тл) в ярмах магнитопровода. На рис.6 изображены кривые нормализованных экономических показателей, по которым отобран оптимальный вариант магнита (рис.7а), а в табл.3 даны его параметры.

Анализ результатов расчетов показывает, что комбинированный магнит по сравнению с традиционными магнитами синхротронов [4, 5] и накопителей [6] на ту же энергию в совокупности имеет в I,2-I,4 раза меньше веса активных материалов и потерь мощности в них. В ускорительном сегменте с двумя ведущими магнитными полями используется меньше листовой электротехнической стали, чем в магните синхротрона с одним ведущим магнитным полем, более того, коэффициент использования электротехнического листа (рулона), выпускаемого промышленностью, значительно выше, чем при изготовлении традиционных магнитов синхротронов. В этой связи особый интерес представляет комбинированный магнит с плотностью тока в обмотках $\sigma = 9$ А·мм$^{-2}$. В этом случае конфигурация магнитопровода принимает форму,аналогичную "О" - образным

магнитам ускорителя с такими же преимуществами и недостатками [7] , но главное достоинство этого варианта - предельно простая технология изготовления магнитопровода. Он собирается из прямоугольных листов электротехнической стали (рис.5б и 7б) с добавлением полюсных наконечников накопителя. Листы требуемых геометрических размеров изготавливаются из листов или рулонов электротехнической стали, выпускаемой промышленностью, не методом штамповки, а простым способом срезания.

Система питания магнита

Определим параметры ее основных узлов, основываясь на анализе энергетических процессов, имеющих место в магните.Энергия магнитного поля, накопленная в одном зазоре ускорительного сегмента $\mathcal{E}_y$,выражается формулой

$$\mathcal{E}_y = \frac{h_y}{2\mu_0 S_y} \Phi_y^2 . \qquad (14)$$

Суммарная энергия двух зазоров $\sum_{i=1}^{2} \mathcal{E}_y$

$$\sum_{i=1}^{2} \mathcal{E}_y = \frac{1}{2\mu_0} \left(\frac{h_{y1} \Phi_{y1}^2}{S_{y1}} + \frac{h_{y2} \Phi_{y2}^2}{S_{y2}} \right), \qquad (15)$$

где h_{y1} , h_{y2} - высота зазоров между полюсами ускорительного сегмента.

Выше было принято, что зазоры между полюсами идентичны и выполняется условие $I_n W_H = \bar{I} W_2 = \bar{I} W_3$, тогда выражения (14) и (15) с учетом (2) и (2) примут вид:

$$\varepsilon_y = \frac{h_y}{2\mu_0 S_y} \Phi_0^2 (1 \pm \cos \omega t) \qquad (16)$$

и

$$\sum_{i=1}^{2} \varepsilon_y = \frac{h_y}{2\mu_0 S_y} \Phi_0^2 (3 + \cos 2\omega t) \qquad (17)$$

где знак " + " для одного, знак "–" – для другого зазора.

Сопоставление кривых ε_y и $\sum \varepsilon_y$ (рис.8), построенных по формулам (16) и (17), показывает, что только половина максимального значения энергии одного зазора передается к внешним накопителям энергии, а другая половина энергии циркулирует внутри магнита между зазорами, таким образом в ускорительном сегменте магнита энергетические процессы частично сбалансированы. Нетрудно заметить, что половина максимальной энергии создается обмоткой постоянного тока $W_н$, расположенной на центральном ярме, а другая половина – переменная составляющая – обмотками на полюсах. Синусоидальный закон изменения энергии указывает на то, что в качестве внешних накопителей энергии можно применять конденсаторные батареи соответствующей энергоемкости. Максимальную мощность батареи определим, дифференцируя по времени выражение (17) и подставив $\sin 2\omega t = 1$, получим:

$$P_к = \frac{h_y}{\mu_0 S} \Phi_0^2 \omega \qquad (18)$$

На рис.9 представлена схема питания магнита, в котором, сле-

дует отметить особо,отсутствуют реакторы значительной энергоемкости и мощности, функционально необходимые узлы традиционных схем питания синхротронов. Для создания переменного тока в магните использован принцип резонансов напряжений, последовательное включение индуктивности, емкости и генератора переменного тока, благодаря чему обеспечивается идентичность токов во всех блоках магнита. Мощность генератора определяется потерями в магнитопроводе, обмотках W_2 , W_3 , коммуникационных кабелях и в конденсаторных батареях. В табл.4 даны основные параметры системы питания магнита: генератора переменного тока, источника постоянного тока, от которого питаются обмотки W_1 .

Практически мощность системы питания определяется только потерями в комбинированном магните, что является прямым следствием особенностей его работы. По сравнению с системами питания синхротронов [8] она экономична, имеет минимальную сложность,и примерно в I,5-2 раза меньшую установленную и потребляемую мощность.

Ускоряющая система

Рассмотрим некоторые аспекты системы, связанные с особенностями работы ускорительно-накопительного комплекса на базе комбинированного магнита. К ним относится выбор частоты ускоряющей системы, которая должна быть единой для всего комплекса, несмотря на разные длины равновесных орбит частиц в накопителе и в ускорительных кольцах. Решение задачи сводится к выполнению "квантового" условия для равновесных орбит:

$$L_н - L_{y1} = \frac{cK_i'}{f_y}\,; \qquad L_{y1} - L_{y2} = \frac{cK_i''}{f_y}\,, \tag{I9}$$

где f_y - частота ускоряющей системы, $L_н$; L_{y1} ; L_{y2} - длины равновесных орбит частиц в накопителе и ускорительных кольцах соответственно, C - скорость света, K_i' ; K_i'' - ряд целых чисел.

В этой связи весьма ценным является предложение Кумпферта Г. (ДЕЗИ, ФРГ) установить небольшие магнитные корректоры на входах и выходах магнитных блоков с таким расчетом, чтобы орбиты в прямолинейных промежутках ускорительных колец пересеклись (рис.IO), и в местах пересечения установить общие ускоряющие резонаторы для обоих колец. В результате длины равновесных орбит в ускорительных кольцах становятся одинаковыми $L_{y1} = L_{y2} = L_y$, и задача по определению f_y упрощается

$$f_y = \frac{K_i C}{L_н - L_y} \qquad (20)$$

При таком решении вопроса для комплекса потребуется только два комплекта ускоряющих резонаторов: один для накопителя, второй - для ускорительных колец.

Остановимся на режимах работы ускоряющей системы ускорительных колец, модуляционная амплитудная характеристика которой представлена на рис.II. Особенность ее заключается в том, что соотношение пикового значения амплитуд ускоряющего поля к среднему значению по рабочему циклу вдвое меньше, чем та же характеристика синхротронов. Благодаря этому относительные мощностные параметры основных узлов системы питания ускоряющей системы, а именно пассивных и активных фильтров, управляемого выпрямителя, модуляторов снижаются, а КПД системы увеличи
По оценкам установленная мощность оборудования и потреб

мощность от сети для двух ускорительных колец увеличивается не вдвое, а примерно в I,5-I,6 раза.

Заключение

Разработан особый тип электромагнита, объединяющий в едином модуле функции магнитов синхротронов и накопителя. Имея два воздушных зазора для создания двух автономных ускорительных колец электронов и один для накопления ускоренных электронов, он компактен, экономичен, имеет меньший вес, чем традиционные магниты синхротронов и накопителей в совокупности. Система питания магнита отличается простотой, экономичностью, в нем отсутствуют дополнительные энергоемкие реакторы, функционально необходимые узлы традиционных схем питания синхротронов. Мощность, потребляемая системой питания магнита, примерно в I,5-I,6 раза меньше, чем мощность, потребляемая только синхротроном на ту же энергию. Двухтактный режим работы в сочетании с пересекающимися орбитами движения электронов в ускорительных кольцах позволяют создать компактную, экономичную ускоряющую систему с таким же количеством ускоряющих резонаторов, сколько в обычных синхротронах.

Ускорительно-накопительный комплекс, созданный на основе комбинированного магнита как инструмент физических исследований, имеет большие возможности, чем "дуэт" синхротрон - накопитель, в частности осуществление столкновений $e^- - e^-$, $e^- - e^+$ пучков при модернизации одного из ускорительных колец для ускорения протонов p^+, так же $e^- - p^+$, $e^+ - p^+$ столкновений в энергетическом диапазоне до 6 ГэВ.

Автор глубоко признателен за обсуждение и советы профессору Воссу Г.А., доктору Кумферту Г. (ДЭЗИ),Гамбург), Казаряну С.П., Мартиросяну Г.А.

Таблица I

I. Исходные параметры магнита

I. Общее число магнитных блоков	- 48
2. Индукция на равновесных орбитах	- I Тл
3. Поперечные размеры воздушных зазоров	
а) ускорительного сегмента	- 5 x I6 см
б) накопительного сегмента	- 2,5x8 см
4. Продольные размеры воздушных зазоров	- 300 см
5. Длительность рабочего цикла	- 20 $I0^{-3}$с

П. Активные материалы

I. Электротехническая сталь	
а) листовая толщина	- 0,5;0,35мм
содержание кремния (Si)	- 0,8-4,8%
б) низкоуглеродистая, массивная,	
содержание углерода (С)	- 0,025-0,04%
2. Электротехническая медь и алюминий	

Подробные данные об электротехнических материалах приведены в [2] .

Таблица 2

Плотность тока	Обмотки сегментов				Магнитопроводы сегмент.			Магнит		Экономические показатели нормализованные		
	Ускорительный		Накопительный		Ускорительный		Накопительный					
	Вес т	Потери кВт	Вес т	Потери кВт	Вес т	Потери кВт	Вес т	Вес т	Потери кВт	Капитальные затраты	Эксплуатационные расходы	Коэффициент полных затрат
I	2	3	4	5	6	7	8	9	I0	II	I2	I3
I	73,4	I40	5I,4	96,5	303	405	238	666	642	2,84	0,52	I,65
2	40,I	280	25,9	I93	2I6	3I8	I73	455	79I	I,64	0,65	I,I2
3	24,5	420	I7,3	289	I88	289	I52	38I	998	I,24	0,83	I,0I
4	I8,2	562	I3,I	386	I73	275	I4I	345	I2I3	I	I	I
5	I4,4	70I	I0,I	482	I65	266	I35	325	I449	0,92	I,I8	I,03
6	I2,I	840	8,6	579	I59	26I	I30	3I0	I680	0,84	I,38	I,09
7	I0,6	979	7,2	675	I55	256	I27	300	I9I0	0,76	I,57	I,I5
8	9,I	II23	6,2	772	I52	253	I25	292	2I48	0,70	I,76	I,23
9	8,2	I262	5,8	868	I49	25I	I23	286	238I	0,67	I,96	I,33
I0	7,2	I402	5,3	965	I47	249	I2I	28I	26I6	0,65	2,25	I,44

Таблица 3

Параметры магнитного блока оптимальной конструкции

I. Общее число	- 48
2. Индукция на орбитах	- I Тл
3. Поперечные размеры воздушных зазоров 2 шт.	- 5 x I6 см
I шт.	- 2,5x8 см
4. Продольный размер воздушных зазоров	- 300 см
5. Магнитопровод: внешние размеры - 34 x 96 x 300 см	
активные потери	- 5,73 кВт
вес листовой электротехнической стали	- 3615 кг
вес массивной низкоуглеродистой стали	- 2935 кг
6. Обмотки: общий вес	- 650 кг
а) ускорительного сегмента	
количество витков	- 2 x 24
сечение проводника	- I50 $мм^2$
вес проводника	- 382 кг
сопротивление	- 34 $I0^{-3}$ Ом
ток, эффективный	- 590 А
б) накопительного сегмента	
количество витков	- 24
сечение проводника	- 200 $мм^2$
вес проводника	- 268 кг
сопротивление	- I2 $I0^{-3}$ Ом
ток	- 830 А

продолжение таблицы 3

7. Индуктивность обмоток ускорительного сегмента - 14 10^{-3}Гн
8. Энергия магнитного поля воздушного зазора ускорительного сегмента - 9,6 10^{3}Дж

Таблица 4

Основные параметры системы питания

I. Конденсаторная батарея	
а) максимальная энергия	- 230 кДж
б) установленная мощность	- 80000 квар.
в) количество групп	- I6
г) емкость одной группы	- 242 мФ
д) напряжение на группе	- 8 кВ
2. Общие потери в цепи	
а) по переменному току	- II00 кВт
б) по постоянному току	- 450,0 кВт
3. Источник переменного тока	
а) мощность	- I200 кВт
б) напряжение	- 6 кВ
4. Трансформаторы подпитки	
а) количество	- I6
б) мощность	- 75 кВА
в) вторичное напряжение	- 8,0 кВ
г) первичное напряжение	- 6 кВ
5. Источник постоянного тока	
а) ток	- I000 А
б) напряжение	- 600 В

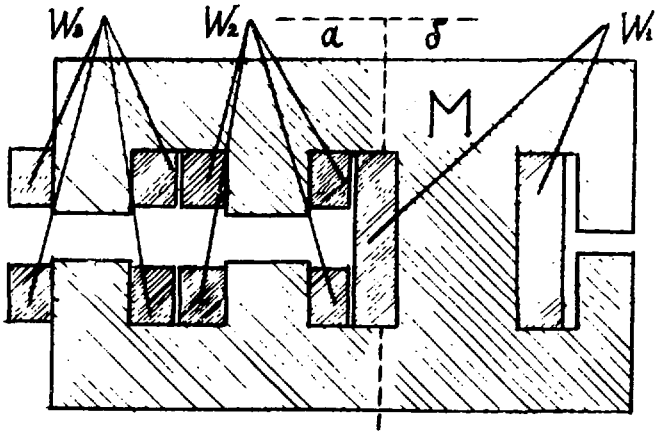

Рис.I Поперечный разрез комбинированного магнита, а - ускорительный и б - накопительный сегменты, W_1 , W_2 , W_3 W_3 - обмотки, М - магнитопровод

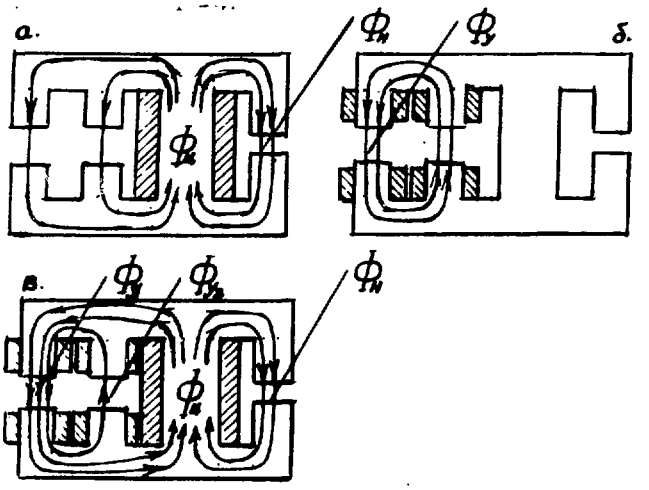

Рис.2 Магнитные потоки в зазорах комбинированного магнита созданные: а - первой; б - второй и третьей обмотками, в - суммарные потоки

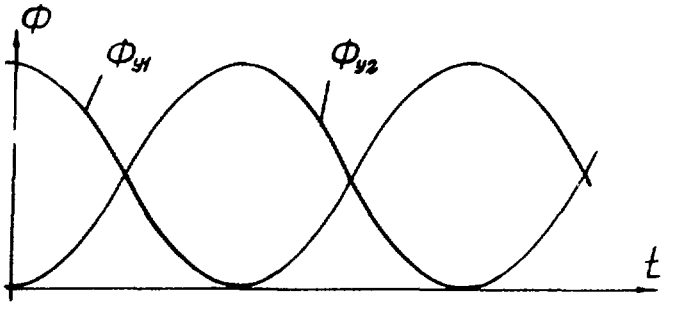

Рис.3 Временные диаграммы магнитных потоков в зазорах ускорительного сегмента

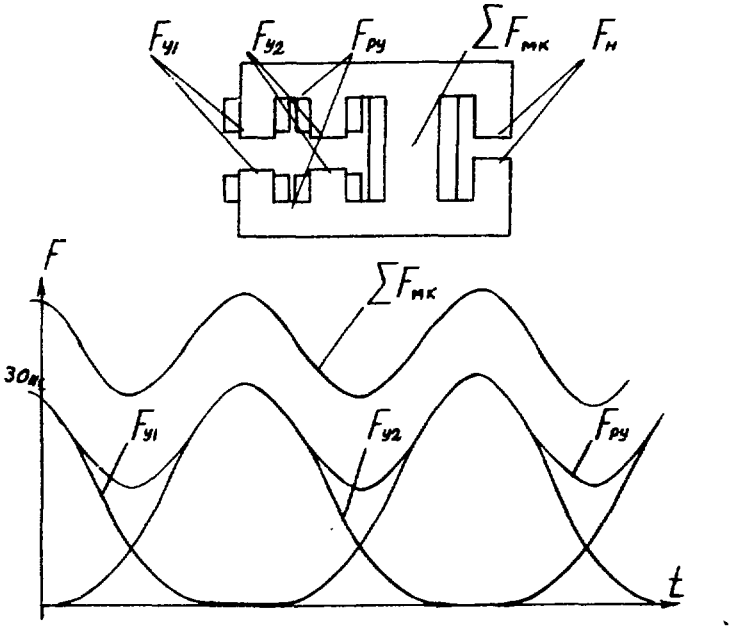

Рис.4 Распределение сил взаимодействия полюсов по сечению комбинированного магнита и их временные диаграммы

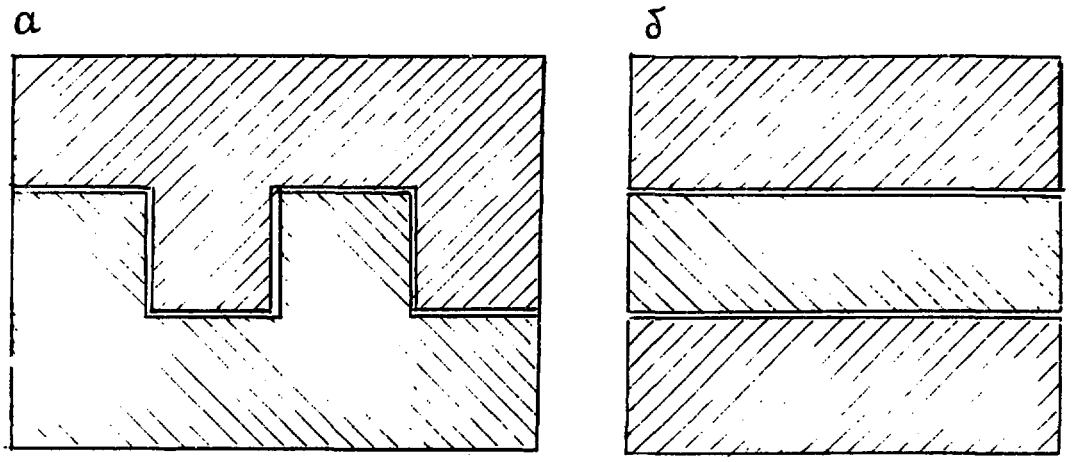

Рис.5 Листы магнитопровода ускорительного сегмента, а - штампованные, б - срезанные

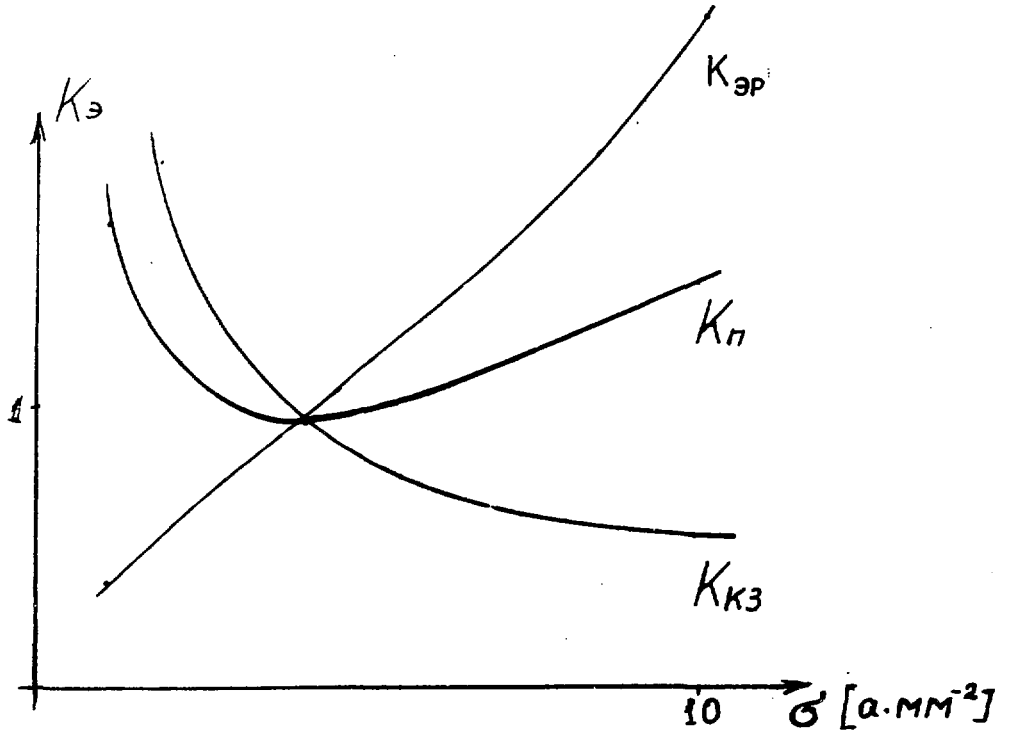

Рис.6 Зависимость экономических показателей от плотности тока в обмотках, при индукции в ярмах магнитопровода $B_{яр}$ = I,5 Тл

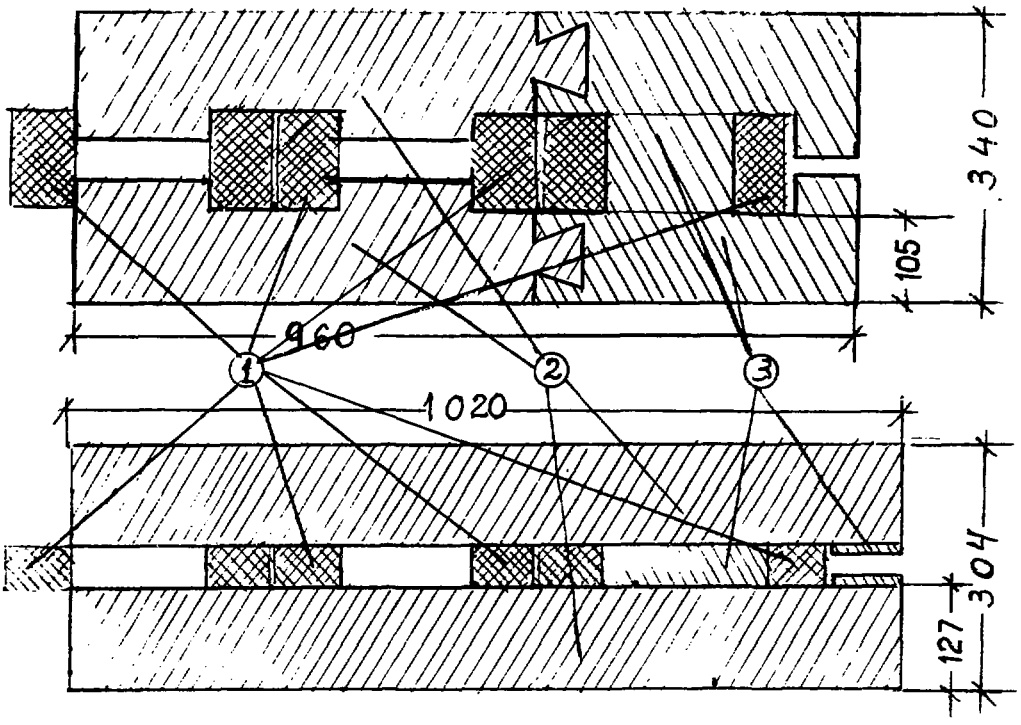

Рис.7 Поперечные разрезы комбинированных магнитов, а - оптимального, б - "0" образного

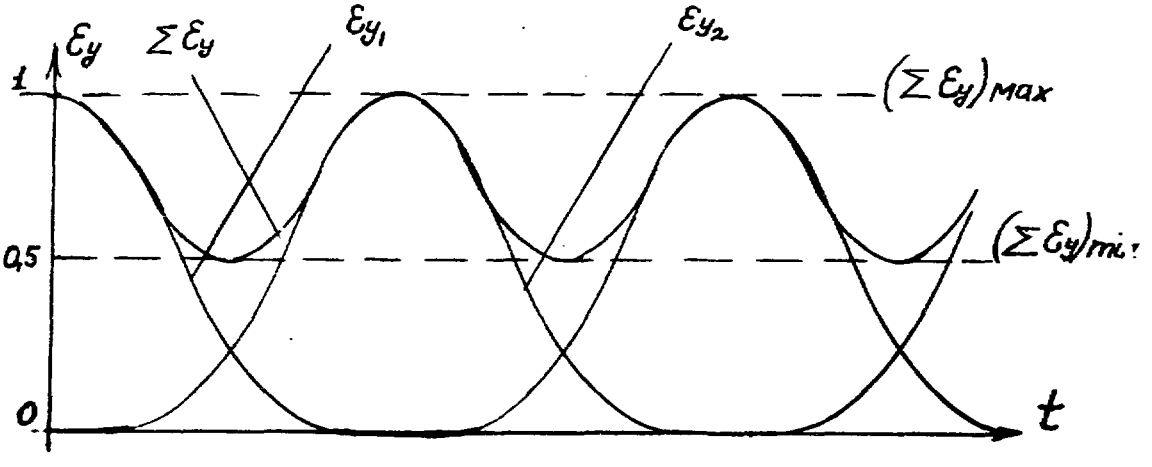

Рис.8 Временные диаграммы энергии магнитных полей зазоров ускорительного сегмента

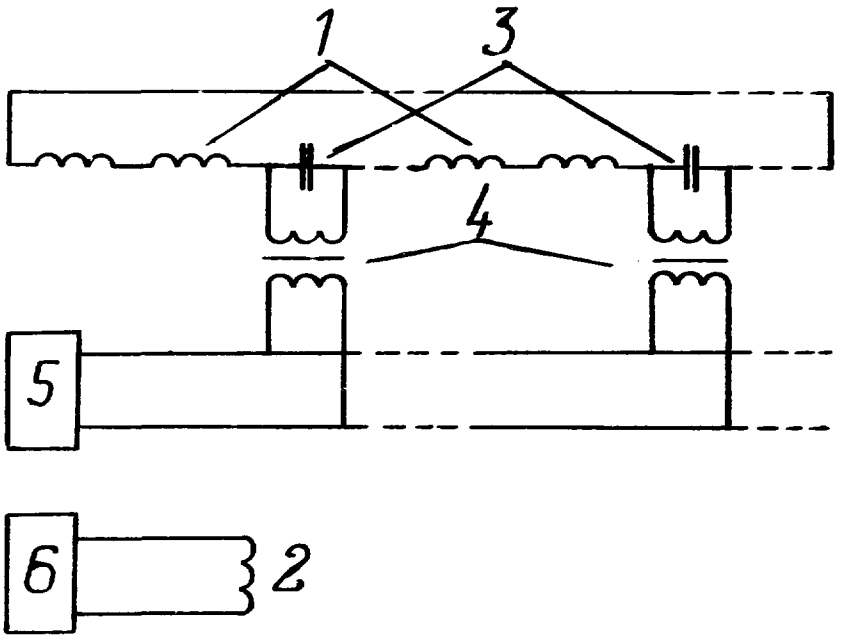

Рис.9 Система питания комбинированного магнита. I – обмотки ускорительного и 2 – накопительного сегментов магнитных блоков, 3 – конденсаторные батареи, 4 – трансформаторы подпитки, 5 – источники переменного и 6 – постоянного тока

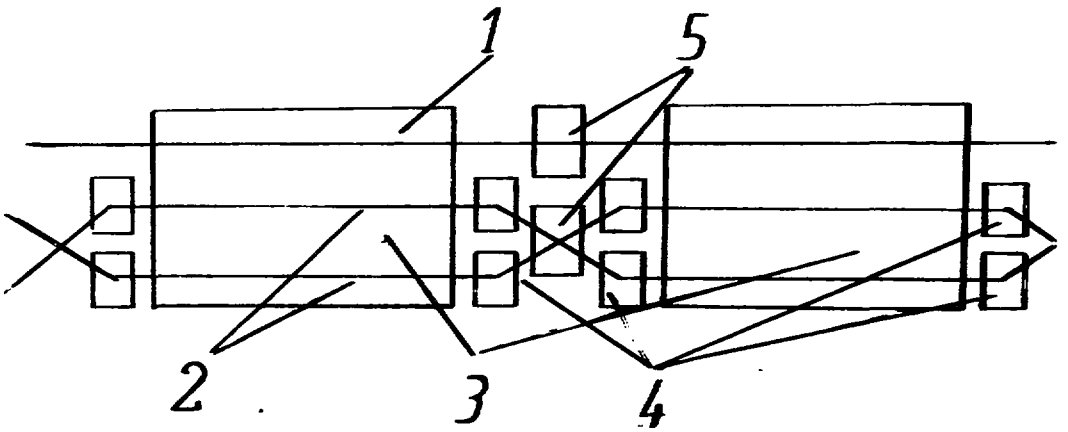

Рис.IO. Равновесные орбиты электронов I – накопительного кольца 2 – ускорительных колец, 3 – магнитные блоки, 4 – магнитные корректоры, 5 – ускоряющие резонаторы

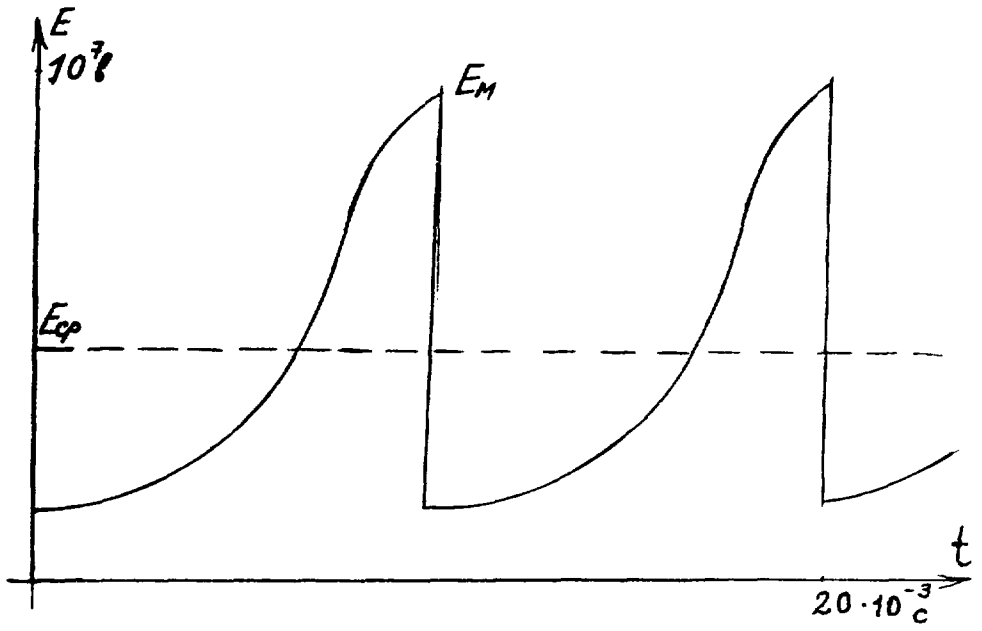

Рис.II Модуляционная амплитудная характеристика ускоряющей системы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

I. Моносзон Н.А. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.I, М.: I968,с.I39.

2. Справочник по электротехническим материалам /под редакцией Ю.В.Корицкого и др.,т.3, Л.: Энергия, I976

3. Гинзбург Л.Б.,Федотов А.И. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов. М.: Машиностроение,I980, с.364 с.I54.

4. Коломенский А.А. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц,т.I, М.:, I970, с.47

5. Дьяченко К.К. и др. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.I, М.: I970, с.I95.

6. ESRF, Foundation Phase Report, February 1987. B.P.220-38043 Grenoble Cedex.

7. Тенг Л. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.I, М.: I970, с.I52.

8. Борисов В.П. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.I, М.: I970, с.2I2.

Рукопись поступила 3 сентября I990 г.

К.А.САДОЯН

РАЗРАБОТКА МАГНИТОВ ОСОБОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Редактор Л.П.Мукаян
Технический редактор А.С.Абрамян

Подписано в печать 22/XII-90г. Формат 60x84/16
Офсетная печать.Уч.изд.л. 1,0 Тираж 299 экз. Ц.15 к.
Зак.тип.№ 353 Индекс 3649

Отпечатано в Ереванском физическом институте
Ереван 36, ул.Братьев Алиханян,2

The address for requests:
Information Department
Yerevan Physics Institute
Alikhanian Brothers 2,
Yrevan, 375036
Armenia, USSR

ИНДЕКС 3649

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ