

УДК 621.384.665 : 537.312.62

## СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ СИНХРОТРОНА «ТРОЛЛЬ»

### 1. РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*Н. С. Шестакин, А. Я. Лаптиенко, Н. Г. Усов, В. И. Зонзов*

Рассмотрены различные конструкции сверхпроводящей магнитной системы с корректирующими обмотками и ферромагнитными вставками для обеспечения условий накопления электронов с целью генерации синхротронного излучения в ультрафиолетовой области спектра.

Электронный синхротрон с циклотронным предускорением «Тролль» [1] предназначен для генерации импульсов синхротронного излучения (СИ) в ультрафиолетовой области спектра. Принцип работы этого ускорителя основан на ускорении электронов в цилиндрической полости с волной  $H_{111}$  [2] при возрастании осевого магнитного поля, создаваемого безжелезным импульсным электромагнитом, который является также резонатором СВЧ ускоряющего электромагнитного поля [3, 4].

Для обеспечения режима непрерывной генерации СИ необходимо сформировать такое распределение магнитного поля в плоскости орбиты ускорения электронов в синхротроне «Тролль», чтобы электроны оставались на орбите ускорения и после затухания импульсного магнитного поля, а затем переводились на орбиту накопления. Это распределение магнитного поля можно создавать сверхпроводящей магнитной системой (СМС). При изменениях величины магнитного поля электроны удерживаются на орбитах за счет СВЧ поля резонаторов, а при переводе электронов с орбиты ускорения на орбиту накопления СВЧ волны  $H_{111}$  в цилиндрической полости импульсного электромагнита отсутствуют. Такой накопитель электронов позволит проводить радиометрические измерения в оптической области, в том числе в области мягкого рентгена, а также может применяться в промышленности для фото- и рентгенолитографии [5].

Важной характеристикой СИ является критическая длина волны излучения [6]

$$\lambda_c \sim 1/R^2 H^3, \quad (1)$$

где  $R$  — радиус орбиты релятивистского электрона,  $H$  — напряженность азимутально-симметричного магнитного поля на орбите.

Для создания источника СИ в области вакуумного ультрафиолета необходимо накапливать электроны на орбите  $R_2 = 50$  мм в магнитном поле с  $H_2 = 34.1$  кЭ, а радиус накопления можно изменять при соответствующем изменении напряженности магнитного поля, когда сохраняется значение  $\lambda_c$ , т. е.

$$R_2^2 H_2^3 = \text{const}. \quad (2)$$

Распределение магнитного поля вдоль радиуса  $R$  орбиты электрона характеризуется показателем магнитного поля [7]

$$n_k = - \frac{R_k}{H(R_k)} \left. \frac{\partial H(R)}{\partial R} \right|_{R=R_k}, \quad (3)$$

а  $H(R)$  для соленоида можно записать в виде [8]

$$H(R) = a_1 NI \left[ F - \frac{1}{2} FE_2 \left( \frac{R}{a_1} \right)^2 + \frac{3}{8} FE_4 \left( \frac{R}{a_1} \right)^4 + \dots \right], \quad (4)$$

где  $a_1$  — внутренний радиус соленоида;  $N$  — плотность намотки сверхпроводящего проводника;  $I$  — ток, протекающий по сверхпроводнику;  $F$  — форм-фактор;  $FE_2$ ,  $FE_4$  — коэффициенты разложения поля в ряд в центральной зоне соленоида.

Показатель магнитного поля представим с точностью до членов шестого порядка следующим образом:

$$n_k = \frac{2(FE'_2 - 2FE'_4 R_k^2) R_k^2}{F - FE'_2 R_k^2 + FE'_4 R_k^4}, \quad (5)$$

где

$$FE'_2 = \frac{1}{2} FE_2 / a_1^2, \quad FE'_4 = \frac{3}{8} FE_4 / a_1^4.$$

Для обеспечения слабой фокусировки электронов на орбите ускорения, которая имеет такой же радиус, как и орбита в синхротроне «Тролль», —  $R_1 = 16$  мм, показатель магнитного поля должен быть  $0.04 \leq n_1 \leq 0.065$ , а на орбите накопления  $R_2 = 50$  мм —  $0.18 \leq n_2 \leq 0.22$ . Эти требования к распределению магнитного поля в медианной плоскости соленоида можно преобразовать в следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} H_2 &= a_1 NI (F - FE'_2 R_2^2 + FE'_4 R_2^4), \\ n_1 &= 2(FE'_2 - 2FE'_4 R_1^2) R_1^2 / (F - FE'_2 R_1^2 + FE'_4 R_1^4), \\ n_2 &= 2a_1 NI (FE'_2 - 2FE'_4 R_2^2) R_2^2 / H_2, \end{aligned} \quad (6)$$

из которой можно найти

$$\frac{FE_2}{FE_4} = \frac{3}{4a_1} \left[ \frac{R_2^2 (1 + 4/n_2) - R_1^2 (1 + 4/n_1)}{R_2^2 (1 + 2/n_2) - R_1^2 (1 + 2/n_1)} \right] = C, \quad (7)$$

$$FE_2 = \frac{a_1 H_2 n_2^2}{N I R_2^2 \left( 1 - \frac{3}{2} \frac{R_2^2}{a_1^2 C} \right)}, \quad (8)$$

$$F = \frac{H_2}{a_1 NI} + \frac{1}{2} FE_2 \frac{R_2^2}{a_1^2} \left( 1 - \frac{3}{4} \frac{R_2^2}{a_1^2 C} \right). \quad (9)$$

Определим величину  $C$  для различных комбинаций  $n_1$  и  $n_2$ . Если  $n_1 = 0.065$  и  $n_2 = 0.18$ , то по формуле (7) получим  $C = 0.746$ ; если  $n_1 = 0.065$  и  $n_2 = 0.22$ , то  $C = 0.794$ ; если  $n_1 = 0.04$  и  $n_2 = 0.18$ , то  $C = 0.9426$ ; если  $n_1 = 0.04$  и  $n_2 = 0.22$ , то  $C = 1.09$ . Из этих предельных случаев последний вариант наиболее близок к реальным параметрам СМС ( $F = 0.385$ ,  $FE_2 = 0.399$ ,  $FE_4 = 0.366$ ), но такая СМС практически не выполнима, потому что максимальные значения коэффициентов, когда отношение наружного диаметра обмотки к диаметру внутреннего отверстия  $\alpha \rightarrow \infty$ , равны  $|FE_2|^{\max} = 0.5395$ ,  $|FE_4|^{\max} = 0.1407$ . Эти оценки сделаны для трапецевидных соленоидов [9, 10], так как в [11] была доказана максимальность коэффициента  $FE_2$  в таких соленоидах.

Рассмотрим поведение этих коэффициентов при уменьшении требуемого значения  $n_1$ , когда значение  $n_2$  сохраняется прежнее. В этом случае происходит уменьшение величин коэффициентов  $FE_2$  и  $FE_4$  (рис. 1) до реально выполнимых значений.

Следовательно, СМС может обеспечить выполнение условия слабой фокусировки электронов на орбите накопления, а на орбите ускорения необходимо использовать дополнительные средства формирования заданной конфигурации магнитного поля.

Рассмотрим несколько вариантов радиусов орбит накопления  $R_2 = 50, 45$  и  $40$  мм.

Например, для  $R_2 = 45$  мм необходимое значение  $n_2$  можно получить традиционной системой катушек Гельмгольца с поперечной щелью, равной  $110$  мм,

при внутреннем радиусе обмотки  $a_1=80$  мм, наружном радиусе обмотки  $a_2=130$  мм и общей длине системы катушек  $2b=226$  мм. Для такой системы  $n_2=0.2146$ ,  $F=0.2487$ , а распределение поля в медианной плоскости, приведенного к полю в центре катушек и показатель магнитного поля представлены кривыми 1 на рис. 2.

Однако обмотку можно выполнить в виде двух конических катушек [12] с трапециевидной поперечной щелью [13], размеры которой определяются из условия получения положительного значения коэффициента  $FE_2$  для создания заданного распределения магнитного поля [14]. Такая обмотка будет обеспечивать показатель магнитного поля  $n_2=0.2145$  при величине форм-фактора  $F=0.2780$ ,

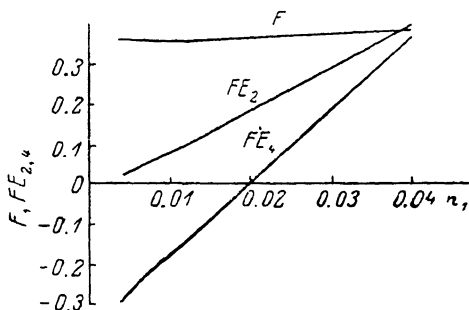


Рис. 1. Зависимости форм-фактора и коэффициентов разложения поля в ряд в центральной зоне от показателя магнитного поля на орбите ускорения электронов.

т. е. напряженность магнитного поля обмотки с такими же габаритами, как и в катушках Гельмгольца, увеличивается на 12%. Распределения приведенного магнитного поля в медианной плоскости и показателя магнитного поля показаны кривыми 2 на рис. 2.

Следует также отметить, что уменьшение радиуса орбиты накопления приводит к увеличению необходимого значения напряженности магнитного поля на

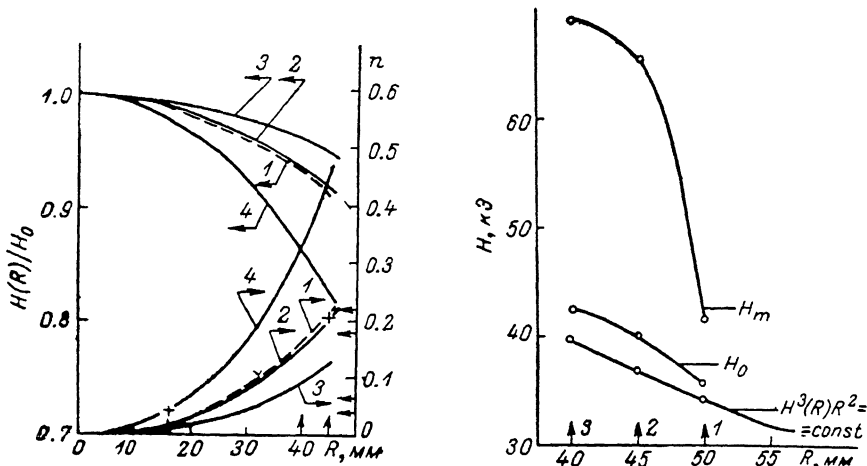


Рис. 2. Зависимости относительного распределения поля в медианной плоскости и показателя магнитного поля от радиуса орбиты электронов для различных конструкций обмоток СМС.

Рис. 3. Значения напряженности поля в центре, на орбите накопления и в обмотке для различных конструкций обмоток СМС.

орбите, так как из (1) следует  $H_2^3 R_2^2 = \text{const}$  (рис. 3), т. е.  $H_2 (R_2=45 \text{ мм})=36.58 \text{ кЭ}$  и  $H_2 (R_2=40 \text{ мм})=39.725 \text{ кЭ}$ . При этом величины напряженности поля в центре СМС и в обмотке будут зависеть от конструкции поперечной щели. Так, в случае модельной СМС — системы Гельмгольца I секция выполнена из сверхпроводника НТ-50  $\varnothing 0.85$  мм с плотностью намотки  $N_{0.85}=130$  вит./см<sup>2</sup>, а II —  $\varnothing 0.7$  мм,  $N_{0.7}=150$  вит./см<sup>2</sup> и следующими геометрическими размерами:  $a_1^I=80$  мм,  $a_2^I=104$  мм,  $e^I=133$  мм;  $a_1^{II}=108$  мм,  $a_2^{II}=130$  мм,  $e^{II}=133$  мм, поперечные щели  $2e_1^I=37$  мм,  $2e_2^I=45$  мм, при токе  $I=73.8$  А поле в центре  $H_0=35.5$  кЭ, а максимальное поле в обмотке равно  $H=41.56$  кЭ (точка 1 на рис. 3), потому что определяемый по известной методике расчета на ЭВМ [15] относительный максимум поля в обмотке  $|H|/H_0=1.17$  (рис. 4, а).

Для случая конических катушек распределение поля в пространстве изображено на рис. 4, б, где максимальное значение поля в обмотке соответствует относительному значению  $|H|/H_0=1.63$ . Такая обмотка, изготовленная из проводника  $\varnothing 0.7$  мм, при токе 120 А будет создавать необходимую величину поля на орбите  $R_2=45$  мм (рис. 3, 2), а при токе 126.85 А она создает необходимое поле на  $R_2=40$  мм (только с меньшим, что требуется, показателем магнитного поля), при этом поле в обмотке возрастает до 69 кЭ (рис. 3, 3).

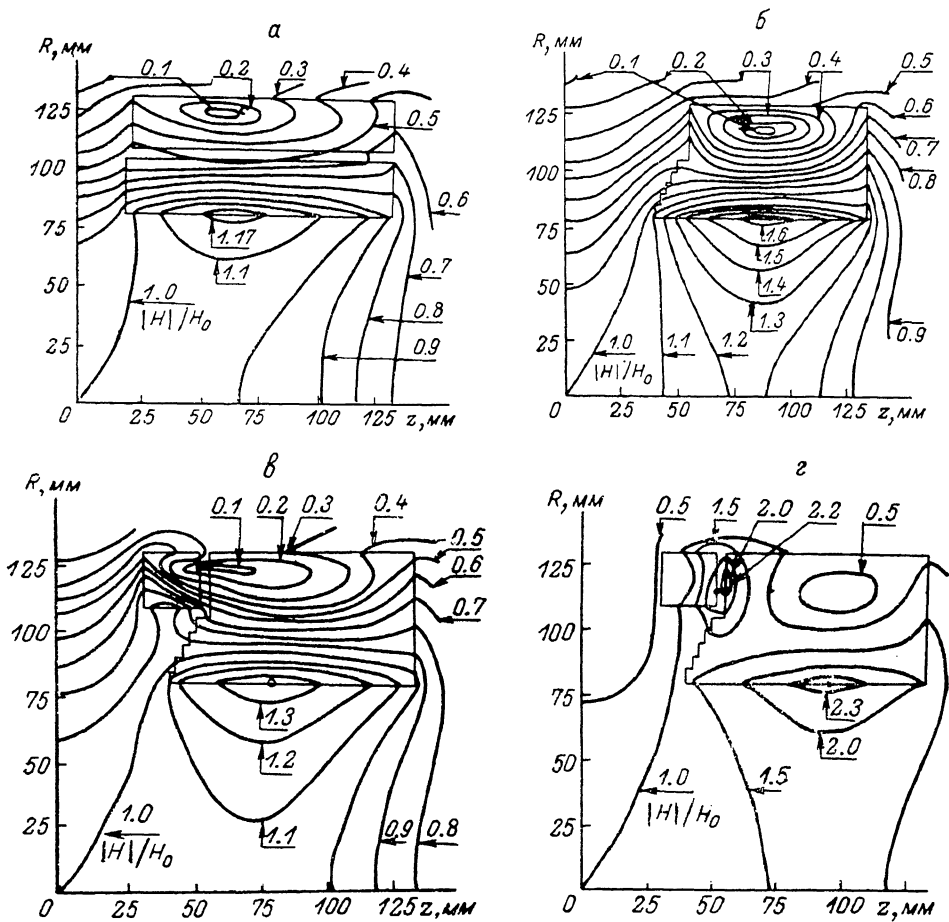


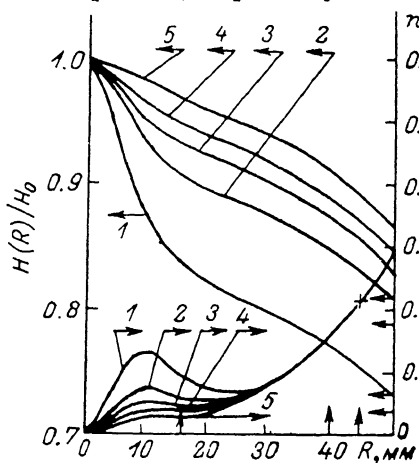
Рис. 4. Распределение относительного модуля напряженности поля в пространстве для различных конструкций обмоток СМС.

Из этих вариантов в качестве рабочего выбраны конические катушки, геометрические размеры которых изображены на рис. 4, б тонкими линиями, а значения поля на рабочей орбите  $R_2=45$  мм, в центре СМС и в обмотке — точками 2 на рис. 3; распределение поля в медианной плоскости и показатель поля — кривыми 2 на рис. 2. Такая СМС обеспечивает необходимое значение показателя поля на орбите накопления.

Проведены исследования конструкции СМС для накопления электронов в магнитных полях с такими показателями поля, при которых возможен параметрический резонанс, когда  $n_0=0.25$ . Так как для обеспечения вывода СИ вдоль медианной плоскости достаточно иметь цилиндрический доступ шириной 60 мм, то между обмотками конических катушек и экранами канала вывода излучения можно разместить корректирующую пару катушек из сверхпроводника  $\varnothing 0.5$  мм с  $N_{0,5}=330$  вит./см<sup>2</sup>, геометрия которых изображена на рис. 4, в, г тонкими линиями. Тогда при последовательном включении основных и корректирующих обмоток (КО) получится распределение магнитного поля в медианной плоскости со следующими характеристиками (рис. 2, 3):  $F=0.3910$ ,  $n_1(R_1=16 \text{ мм})=0.0106$ ,

$I_c/I_0$	$F$	$H_{16}/H_0$	$n_{16}$	$H_{40}/H_0$	$n_{40}$	$H_{45}/H_0$	$n_{45}$
1.00	0.3910	0.9948	0.0106	0.9628	0.0901	0.9507	0.1250
0.75	0.3628	0.9940	0.0123	0.9570	0.1027	0.9437	0.1416
0.50	0.3346	0.9930	0.0143	0.9509	0.1175	0.9354	0.1614
0.25	0.3060	0.9918	0.0167	0.9433	0.1353	0.9258	0.1850
0.00	0.2780	0.9904	0.0196	0.9340	0.1570	0.9141	0.2145
-0.25	0.2499	0.9887	0.0231	0.9230	0.1840	0.9000	0.2515
-0.50	0.2216	0.9865	0.0276	0.9089	0.2195	0.8817	0.2997
-0.75	0.1934	0.9838	0.0337	0.8907	0.2667	0.8584	0.3649
-1.00	0.1650	0.9800	0.0412	0.8660	0.3330	0.8272	0.4583

$n_2 (R_2=45 \text{ мм})=0.1250$ , а при встречном включении (рис. 2, 4):  $F=0.1650$ ,  $n_1 (R_1=16 \text{ мм})=0.0412$ ,  $n_2 (R_2=45 \text{ мм})=0.4583$ . Распределение магнитного поля в пространстве для случая последовательного включения основных обмоток и КО показано на рис. 4, а, а для случая встречного включения — на рис. 4, б, из которого видно резкое увеличение относительного максимума поля в обмотке.



Основные параметры такой экспериментальной СМС при различных соотношениях токов в основных обмотках и КО представлены в таблице. Показатель магнитного поля такой системы при  $R_2=45 \text{ мм}$  не доходит до 0.5, а при прохождении через резонанс  $n_0=0.25$  можно избежать потерь частиц, если допустимое значение амплитуды первой азимутальной гармоники показателя поля по величине менее  $1 \cdot 10^{-3}$  [16, 17], поэтому встреч-

Рис. 5. Зависимости относительного распределения поля в медианной плоскости и показателя магнитного поля от радиуса орбиты электронов для СМС с ФВ.

ное включение основных обмоток и КО СМС можно использовать в режиме ускорения и накопления в слабом поле, а выключая КО и поднимая до необходимого значения поле основной обмотки СМС, можно работать в режиме излучения.

Одновременное достижение заданных значений показателя магнитного поля на орбитах ускорения и накопления можно осуществить введением вдоль оси симметрии СМС тонких ферромагнитных вставок (ФВ), которые будут располагаться во внутренней полости резонатора-электромагнита и увеличивать величину поля в центре и показатель поля на орбите ускорения без существенных изменений показателя поля на орбите накопления, а также ограничивать вертикальную протяженность области захвата частиц [18].

Расчет распределения поля от ФВ производился методом эквивалентных соленоидов [19] в приближении полного насыщения [20], когда намагниченность материала ФВ равна 23 кЭ. Рассмотрено несколько вариантов таких ФВ с различными размерами при общей длине ФВ 80 мм. При ширине щели между ФВ 20 мм и радиусе 2.5 мм будет создаваться в центре системы добавка к полю в 0.43 кЭ при радиусе 3.75 мм — 1.06 кЭ, при радиусе 5 мм — 1.89 кЭ.

На рис. 5 представлены распределение приведенного магнитного поля и показатель поля ( $I$  — поле в центре основных катушек равно 5 кЭ, 2 — 10, 3 — 15, 4 — 20, 5 — 40), когда ФВ имеет радиус 5 мм, щель 20 мм и длину 80 мм. Значения показателя поля на  $R_1=16 \text{ мм}$  для ряда случаев (рис. 5) с полем в центре от основных катушек в пределах 5—10 кЭ удовлетворяют условию слабой фокусировки электронов на орбите ускорения. А значение показателя поля на  $R_2=45 \text{ мм}$  для любых величин поля СМС удовлетворяет этому условию на орбите накопления.

Таким образом, для обеспечения ускорения и накопления электронов в поле СМС с целью генерации СИ в ультрафиолетовой области спектра можно использовать коррекцию поля как КО, так и ФВ.

Авторы выражают благодарность В. И. Курочкину и В. С. Панасюку за оказанную помощь и постоянное внимание к работе.

#### Литература

- [1] Электронный синхротрон с циклотронным предускорением «Троль». Международная выставка «Наука-83». Экспонаты СССР. М., 1983, с. 80—81.
- [2] Грызлов А. В., Панасюк В. С., Рыжков В. М. и др. ЖТФ, 1972, т. 42, № 1, с. 13—18.
- [3] Великанов С. П., Квочка В. И., Панасюк В. С. и др. Атомная энергия, 1976, т. 41, № 2, с. 113—117.
- [4] Панасюк В. С., Терешкин Ю. М., Хромченко В. Б. ПТЭ, 1984, № 1, с. 30—34.
- [5] Аневский С. И. ЖТФ, 1985, т. 55, № 1, с. 212—214.
- [6] Тернов И. М., Михайлин В. В., Халилов В. Р. Синхротронное излучение и его применения. М., 1980. 278 с.
- [7] Коломенский А. А. Физические основы методов ускорения заряженных частиц. М., 1980. 302 с.
- [8] Монтгомери Д. Б. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. М.: Мир, 1971. 359 с.
- [9] Шестакин Н. С., Пермяков В. В., Сухой В. В., Таряник Н. В. ВАНТ. Фундаментальная и прикладная сверхпроводимость. Харьков, 1977, в. 1 (5), с. 40—43.
- [10] Пермяков В. В., Шестакин Н. С., Таряник Н. В. ЖТФ, 1978, т. 48, № 12, с. 2570—2574.
- [11] Маргартойд Н. П. ПНИ, 1979, № 5, с. 154—155.
- [12] Курочкин В. И., Шестакин Н. С. Вестник АН УССР, 1983, № 10, с. 14—27.
- [13] Пермяков В. В., Шестакин Н. С., Сухой В. В., Таряник Н. В. А. с. 734818 (СССР). — Оpubл. в Б. И., 1980, № 18.
- [14] Курочкин В. И., Шестакин Н. С. ДАН УССР. Серия А, 1983, № 7, с. 59—61.
- [15] Шестакин Н. С., Сухой В. В., Пермяков В. В. ВАНТ. Фундаментальная и прикладная сверхпроводимость. Харьков, 1977, в. 1 (5), с. 44—46.
- [16] Новиков М. Ю., Панасюк В. С., Самошенко Ю. К. и др. Атомная энергия, 1980, т. 49, в. 1, с. 34—38.
- [17] Коломенский А. А., Лебедев А. Н. Теория циклических ускорителей. М.: Физматгиз, 1962. 352с.
- [18] Квочка В. И., Новиков М. Ю., Самошенко Ю. К. и др. А. с. 556698 (СССР). — Оpubл. в Б. И., 1981. № 12.
- [19] Альтман А. Б., Верниковский Э. Б., Герберг А. Н. и др. Постоянные магниты. Справочник / Под ред. Пятина Ю. М. М.: Энергия, 1980. 488 с.
- [20] Александрова М. Г., Белянин А. Н., Брюкнер В. и др. Расчет электрических цепей и электромагнитных полей на ЭВМ / Под ред. Давилова А. В., Фалишова Е. С. М.: Радио и связь, 1983. 344 с.

Донецкий  
физико-технический институт  
АН УССР

Поступило в Редакцию  
3 сентября 1986 г.