

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



Ц 707

К - 783

4123 / 2-78

18/ix-78

9 - 11588

А.К.Красных, Р.Халлер

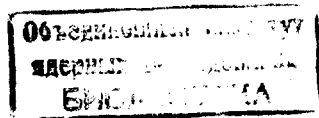
ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ
КОАКСИАЛЬНЫХ ЛИНИЙ
С ФЕРРИТОВЫМИ КОЛЬЦАМИ

1978

9 - 11588

А.К.Красных, Р.Халлер

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ
КОАКСИАЛЬНЫХ ЛИНИЙ
С ФЕРРИТОВЫМИ КОЛЬЦАМИ



Красных А.К., Халлер Р.

9 - 11588

Об оптимизации параметров коаксиальных линий с ферритовыми кольцами

Рассмотрен вопрос оптимизации электротехнических параметров при конструировании коаксиальных линий с ферритовыми кольцами, обладающих повышенной удельной энергоемкостью. Расчеты проведены для случая двухслойной изоляции линий с внутренним ферритовым слоем. Изложена методика выбора оптимальных геометрических размеров коаксиальной изоляции.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Krasnykh A.K., Haller R.

9 - 11588

On Parameter Optimization of Coaxial Lines with Ferrite Rings

The choice of electrotechnical parameters for coaxial lines filled with ferrite was considered. The lines have an increased energy capacitance. Coaxial lines including two layers of insulators and an inside ferrite layer were calculated. The method for choosing an optimal geometry for coaxial insulation is described.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

ВВЕДЕНИЕ

В мощной наносекундной импульсной технике ^{/1/}, а также в некоторых сильноточных индукционных ускорителях ^{/2/} используются формирующие коаксиальные линии с ферритовыми кольцами. В качестве дополнительной изоляции - вследствие относительно малой электрической прочности феррита - часто применяются жидкие или твердые диэлектрики ^{/3,4/}. Параметры таких линий /волновое сопротивление, напряженности/ определяются их геометрическими размерами и свойствами применяемых диэлектриков и должны быть оптимизированы с точки зрения эффективного использования изоляции, что приводит, в конечном счете, к достижению максимальной удельной энергоемкости. Ниже рассмотрен вопрос оптимизации этих параметров.

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ

Рассматривается случай, когда изоляция коаксиальных линий состоит из двух слоев, причем ферритовые кольца, наназанные на внутренний стержень, образуют внутренний слой /рис. 1/. В качестве дополнительной изоляции (внешний слой) применяются жидкие (касторовое масло, трансф. масло, глицерин, вода) или твердые (лавсан или фторопласт) диэлектрики. Значения диэлектрических проницаемостей их приведены в таблице.

При конструировании предполагается, что внутренний слой является электрически "слабой" изоляцией, пото-

му что электрическая прочность ферритовых материалов составляет $10 \div 100 \text{ кВ/см}^{1/5}$ *. Для определения оптимальных параметров линий, при которых напряженность на внутреннем стержне будет минимальной, есть две принципиальные возможности:

Таблица

Диэлектрик ϵ_r	Отношение ϵ_1/ϵ_2 и ϵ_2/ϵ_1						
	1	2	3	4	5	6	
феррит	7	1,56	2,8	0,09	0,16	3,18	1
кастор.м.	4,5	0,64					2
трансф.м.	2,5	0,36					3
вода	80	11,43					4
глицерин	50	7,14					5
лавсан	2,2	0,31	0,49	0,88	0,03	0,05	6

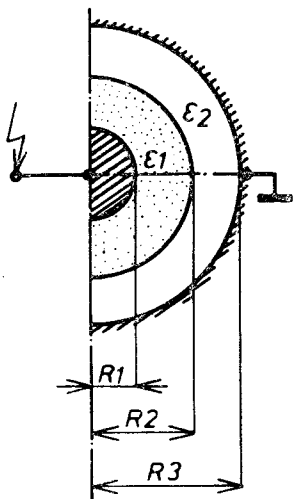


Рис. 1. Схематическое изображение двухслойной изоляции.

* Случай, когда электрически "слабой" изоляцией является внешний слой, может быть рассмотрен с учетом результатов работы /6/.

а/ геометрические размеры (R_1, R_3) и применяемые диэлектрики (ϵ_1, ϵ_2) даны, искомым является оптимальный радиус ферритовых колец (R_2)/см. рис. 1/;

б/ радиус ферритовых колец (R_2), внешний радиус (R_3) и ϵ_1, ϵ_2 даны, искомым является оптимальный радиус внутреннего проводника R_1 .

Кроме того, возможен случай, при котором задается определенная толщина кольца $R_2 - R_1 = \Delta$, а искомым является оптимальный радиус R_1 .

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

В описанной комбинированной изоляции максимальная напряженность E_{H1} определяется из

$$E_{H1} = \frac{U}{R_1 \cdot \epsilon_1 \cdot k}, \quad /1/$$

где U - действующее в линии напряжение,

$$k = \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R_3}{R_2}.$$

В случае "а", согласно выражению /1/, минимума функции $E_{H1} = f(R_2)$ не существует. Если $\epsilon_1 > \epsilon_2$ /например, феррит - касторовое масло/, то напряженность E_{H1} монотонно растет с увеличением внешнего радиуса феррита R_2 , и наоборот: при $\epsilon_1 < \epsilon_2$ /например, феррит - глицерин/, E_{H1} монотонно уменьшается в ростом R_2 /рис. 2/.

Это означает, что, с одной стороны, R_2 должен быть малым ($\epsilon_1 > \epsilon_2$), а с другой - R_2 должен быть большим, чтобы по возможности была низкая напряженность E_{H1} .

В случае "б" минимум функции $E_{H1} = f(R_1)$ существует. Из /1/ следует, что оптимальный радиус

$$(R_1)_{\text{опт}} = R_3^\gamma \cdot R_2^{1-\gamma} \cdot \frac{1}{e}, \quad \gamma = \epsilon_1 / \epsilon_2, \quad /2/$$

и соответственно минимальная напряженность

$$(E_{H1})_{\text{мин}} = \frac{U}{(R_1)_{\text{опт}}}. \quad /3/$$

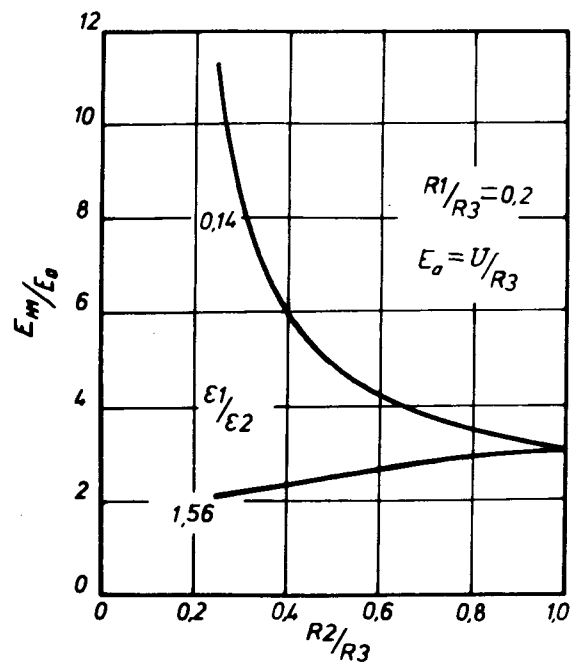


Рис. 2. Зависимость $E_{H1} = f(R_2)$ ($R_1 = \text{const}$)

На рис. 3 изображена зависимость $E_{H1} = f(R_1)$ для нескольких значений ϵ_1/ϵ_2 . Видно, что практически минимум напряженности* возможно реализовать не для всех значений R_2/R_3 и ϵ_1/ϵ_2 . Это означает, что в самом начале необходимо проверить, для каких значений существует оптимум. Введя в /2/ условие

$0 \leq R_1/R_2 \leq 1$,
получим неравенство, определяющее границу области оптимума:

$$e^{-1/\gamma} \leq R_2/R_3 \leq 1, \quad /4/$$

см. рис. 4.

* При этом предполагаем, согласно случаю "б", что выбор диэлектриков определяется другими условиями, например большим значением $\epsilon_{\text{эф}}$ и т.д.

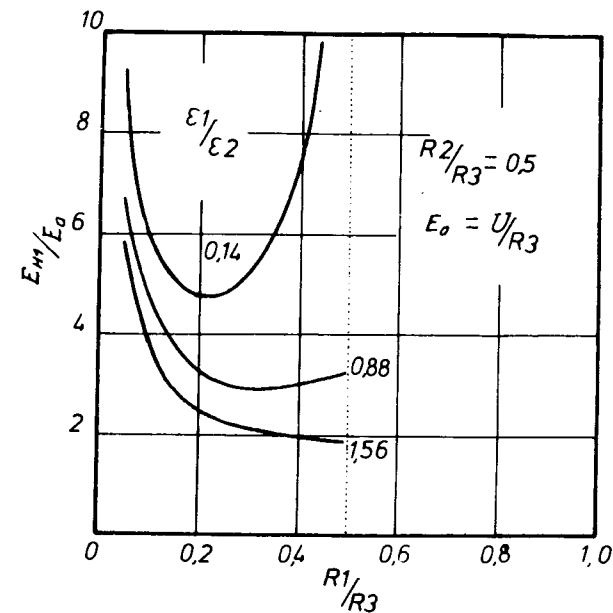


Рис. 3. Зависимость $E_{H1} = f(R_1)$ ($R_2 = \text{const}$).

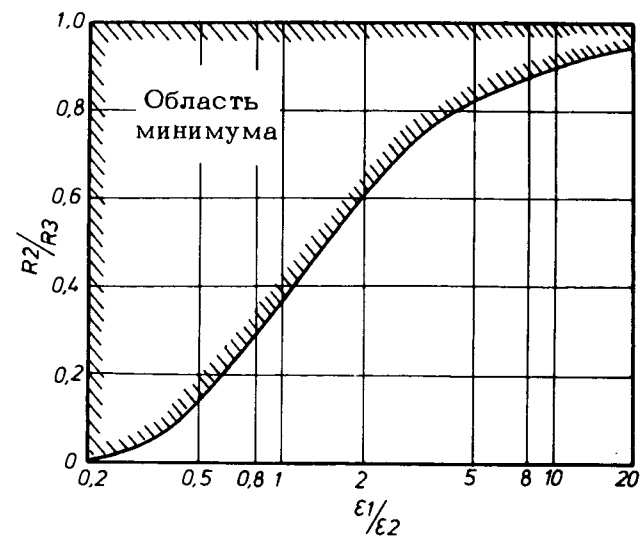


Рис. 4. К определению оптимума функции $E_{H1} = f(R_1)$ ($R_2 = \text{const}$).

Если пара значений $(R_2/R_3, \epsilon_1/\epsilon_2)$ находится внутри заштрихованной области, то оптимум есть, и наоборот: если нет, то E_{H1} монотонно падает с увеличением R_1 .

Если оптимум существует, то можно определить из приведенных зависимостей величины $(R_1)_{\text{ОПТ}}$ и $(E_{H1})_{\text{МИН}}$ /рис. 5/.

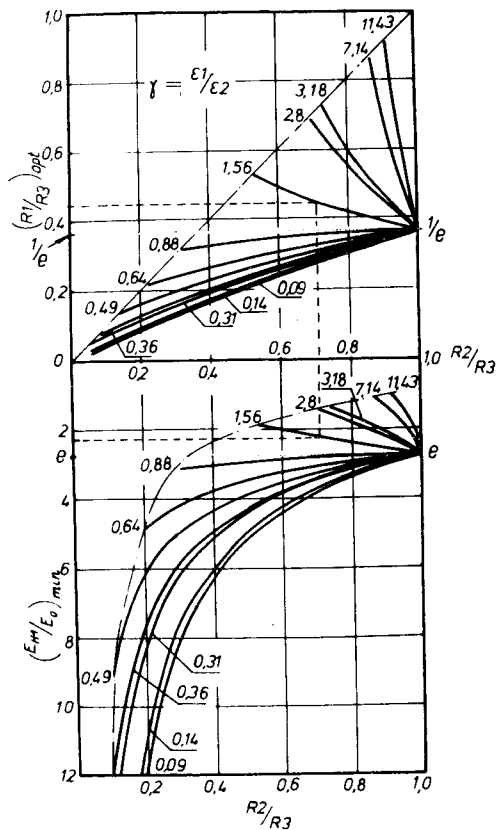


Рис. 5. Оптимальные значения $R_{1\text{ОПТ}}, E_{H1\text{МИН}}$ для различных соотношений ϵ_1/ϵ_2 ($R_2 = \text{const}$).

По известной величине E_{H1} можно рассчитать напряженность во внешнем слое E_{H2} :

$$E_{H2} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right) \cdot \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right) E_{H1} \quad /5/$$

Например: для коаксиальной системы / $R_3 = 7$ мм, $R_2 = 5$ мм, $\epsilon_1 = 7$, $\epsilon_2 = 4,5$ / при $U = 25$ кВ напряженность во внутреннем слое E_{H1} должна быть минимальной, соответственно /см. рис. 4/ пара значений $R_2/R_3 = 0,71$, $\epsilon_1/\epsilon_2 = 1,56$ находится внутри заштрихованной области, т.е. оптимум существует.

Из рис. 5 следует для оптимальных значений:

$$(R_1)_{\text{ОПТ}} \approx 3,1 \text{ мм и } (E_{H1})_{\text{МИН}} \approx 82 \text{ кВ/см.}$$

Из /5/ получим

$$E_{H2} \approx 79 \text{ кВ/см.}$$

Рассмотрим дальше случай, когда толщина внутреннего слоя Δ постоянна. Из /1/ получим для $R_2 - R_1 = \Delta = \text{const}$ трансцендентное выражение

$$\ln\left[\left(\frac{R_{1\text{ОПТ}} + \Delta}{R_3}\right)^{1-\gamma} \cdot \frac{R_3}{(R_1)_{\text{ОПТ}}}\right] = \frac{\Delta + \gamma \cdot (R_1)_{\text{ОПТ}}}{\Delta + (R_1)_{\text{ОПТ}}}, \gamma = \epsilon_1/\epsilon_2 \quad /6/$$

Соответственно получим для минимальной напряженности

$$(E_{H1})_{\text{МИН}} = \frac{U[(R_1)_{\text{ОПТ}} + \Delta]}{(R_1)_{\text{ОПТ}}[\Delta + (R_1)_{\text{ОПТ}} \cdot \gamma]} \quad /7/$$

Решения /6/ и /7/ были рассчитаны с помощью ЭВМ. Как уже показано выше, минимум функции $E_{H2} = f(R_1)$ существует не для всех пар значений $\Delta/R_3, \epsilon_1/\epsilon_2$. Аналогично по /4/ можно определить область минимума из выражения

$$\gamma \leq \frac{\ln\left(1 - \frac{\Delta_{\text{кр}}}{R_3}\right) + \frac{\Delta_{\text{кр}}}{R_3}}{\frac{\Delta_{\text{кр}}}{R_3} - 1} \quad /8/$$

где $\gamma = \epsilon_1 / \epsilon_2$, $\Delta_{\text{пр}} = R_3 - (R_1)_{\text{опт}}$ / см. рис. 6/. Для тех пар значений, которые находятся в заштрихованной области, существует минимум. В этом случае можно определить оптимальные значения внутреннего радиуса R_1 и соответственно минимум напряженности (E_{H1}) с помощью рис. 7. Например: для коаксиальной системы $R_3 = 7$ мм, $\Delta = 2$ мм, $\epsilon_1 = 7$, $\epsilon_2 = 4,5$ и $U = 25$ кВ/ оптимальный радиус R_1 и минимальная напряженность (E_{H1}) являются искомыми. Для заданных значений $R_3, \Delta, \epsilon_1,$

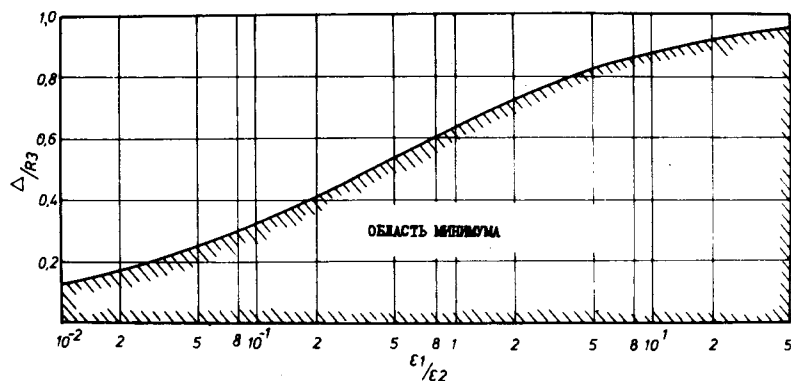


Рис. 6. К определению оптимума функции $E_{H1} = f(R_1)$ ($\Delta = R_2 - R_1 = \text{const}$).

ϵ_2 оптимум существует /см. рис. 6/. Далее, из рис. 7 и выражения /5/ следует, что для оптимальных значений

$$(R_1)_{\text{опт}} \approx 2,5 \text{ мм}, (E_{H1})_{\text{мин}} \approx 79 \text{ кВ/см}, E_{H2} \approx 67 \text{ кВ/см}.$$

Эти примеры показывают, что с помощью данных графиков могут определяться геометрические размеры коаксиальной изоляции, которым соответствует минимальное значение напряженности E_{H1} . На практике эти размеры корректируются с учетом стандартного ряда ферритовых колец.

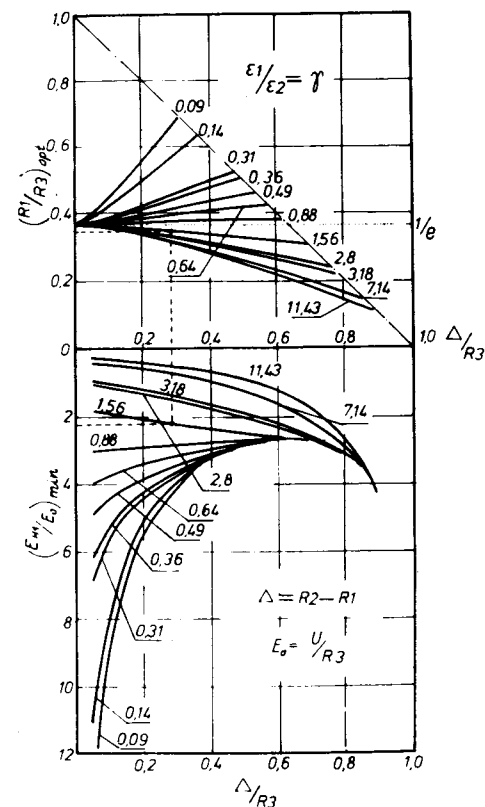


Рис. 7. Оптимальные значения $R_{1\text{опт}}$ и $E_{H1\text{мин}}$ для различных соотношений ϵ_1 / ϵ_2 ($\Delta = R_2 - R_1 = \text{const}$).

Несмотря на оптимальные соотношения, возможен случай, при котором минимальная напряженность E_{H1} превышает допустимую электрическую прочность феррита. Чтобы уменьшить E_{H1} , нужно применить либо больший внешний радиус R_3 , либо дополнительный слой с большей электрической прочностью. В дальнейшем рассматривается этот случай.

ПРИМЕНЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО СЛОЯ

В случае трехслойной изоляции /рис. 8а/ максимальная напряженность на внутреннем стержне E_{H1} получается из

$$E_{H1}^{(3)} = \frac{U}{R_1 \epsilon_{r1} \left[\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R_3}{R_2} + \frac{1}{\epsilon_3} \ln \frac{R_4}{R_3} \right]} \quad /10/$$

/индекс /3/ обозначает число слоев/.

Для оценки действия дополнительного слоя (R_3, ϵ_2) на напряженность поля в феррите E_{H1} рассматривается случай:

$$\kappa = \frac{(E_{H1})^{(3)}}{(E_{H1})_{\text{мин}}^{(2)}} = \frac{1}{1 + (\delta - \gamma) \ln \frac{R_3}{R_2}} < 1, \text{ где } \delta = \epsilon_1 / \epsilon_2, \gamma = \epsilon_1 / \epsilon_3. \quad /11/$$

Удовлетворение этого неравенства, т.е. уменьшение напряженности E_{H1} , возможно только при $\epsilon_2 < \epsilon_3$. В этом случае волновое сопротивление $Z^{(3)}$ увеличивается по сравнению с двухслойной системой.

На рис. 8б изображены возможные зависимости напряженности E_{H1} и волнового сопротивления $Z^{(3)}$ от соотношения R_3/R_2 для некоторых обычно применяемых диэлектриков. Так, для примера $2.1 / \epsilon_1 = 7$, $\epsilon_2 = 4.5$, $(R_1)_{\text{опт}} \approx 3.1$ мм, $R_2 \approx 5$ мм, $R_4 = 7$ мм/ максимальная напряженность в феррите E_{H1} уменьшается на 22%, если на ферриты наматывается слой фторопласта $/\epsilon_r = 2.2/$ толщиной 1 мм. А увеличение волнового сопротивления в этом случае составит 14% /см. рис.8б/.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При конструировании линий, обладающих большой удельной энергоемкостью, возникает необходимость оптимизировать их электромеханические параметры. Вы-



а/

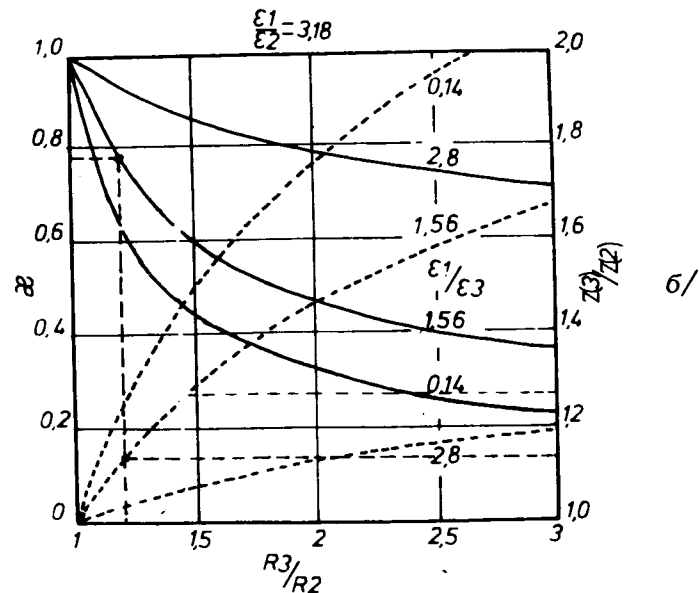


Рис. 8. Действие дополнительного слоя.

бор оптимальных соотношений зависит при этом как от геометрических размеров, так и от свойств диэлектриков. Оптимум электрической напряженности практически существует не для всех значений параметров линий. С помощью приведенных графиков может упрощаться конструирование линий, частично заполненных ферритом.

Авторы выражают признательность Г.В.Долбилову и В.П.Саранцеву за внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. "Сов.радио", М., 1974.
2. Барабаш Л.С. и др. ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
3. Катаев И.Г. Ударные электромагнитные волны. "Сов. радио", М., 1963.
4. Белянцев А.М., Богатырев Ю.К. Изв. ВУЗов СССР, Радиотехника, 1965, т.8, №1.
5. Липатов Н.Ф., Мешков А.Н. Вопросы по радиоэлектронике, 1970, сер №6, вып. 5.
6. Busch, K. Optimierung der zykindriscen Teilisolation ETZ-A 91(1970) 8, 467.
7. Ерухимов А.Х. и др. Анализ оптимальных соотношений в коаксиальной системе с комбинированной изоляцией. В сб.: Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция, Атомиздат, М., 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 мая 1978 года.