

A.16

11

**И Н С Т И Т У Т  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р**

**И Я Ф 48 -71**

**Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, В.М.Долгушин,  
И.В.Казарезов, В.Ф.Куценко, В.М.Радченко**

**ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ  
ИМПУЛЬСНОМ УСКОРИТЕЛЕ**

**Новосибирск**

**1971**



Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, В.М.Долгушин,  
И.В.Казарезов, В.Ф.Куценко, В.М.Радченко

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ИМПУЛЬСНОМ  
УСКОРИТЕЛЕ

А Н Н О Т А Ц И Я

Рассмотрены вопросы перенапряжений в высоковольтных импульсных ускорителях на связанных контурах, возникающих при быстром разряде высоковольтного электрода на землю. Приводятся методы расчета и моделирования режима перенапряжений, описаны элементы конструкции и схемы, снижающие уровень перенапряжений и ослабляющие последствия от их воздействия.

БИБЛИОТЕКА  
Института ядерной  
физики СО АН СССР  
ИНВ. № \_\_\_\_\_

## В в е д е н и е

Ускорители прямого действия являются высоковольтными устройствами, и обеспечение надежной работы их изоляции — одна из главных задач при их проектировании. Опыт показывает, что опасные градиенты электрического поля в изоляции могут возникать как в рабочих режимах, так и при различных отклонениях от него. Одним из наиболее опасных режимов является пробой в ускорителе по полному напряжению. Если изолирующая среда — газообразный или жидкий диэлектрик, то в ней, как правило, после прохождения разряда заметных необратимых явлений не происходит, и в этом смысле пробой не представляет серьезной опасности. Однако, в различных местах, где используется твердая изоляция (витки обмоток, секции ускорительной трубки и др.), перенапряжения вследствие пробоя по полному напряжению могут значительно превышать рабочие градиенты до пробоя и приводить к повреждению конструкции. Хотя природа перенапряжений в высоковольтных ускорителях и описываемый подход к анализу соответствующих процессов являются в основном общими для ускорителей различных типов, конкретные методики расчета и моделирования системы и особенно конструкция элементов защиты от перенапряжений, как правило, существенно отличаются. Настоящая работа относится прежде всего к разработанным в Институте ядерной физики импульсным ускорителям на связанных контурах (ЭЛИТ, ЭЛИТА, РИУС-5) /1/.

Электрическая схема этих ускорителей показана на рис. 1. Основные элементы конструкции видны на рис. 2.

### 1. Процессы в ускорителе при пробоях по полному напряжению

Основной причиной возникновения импульсных перенапряжений в трансформаторе и других элементах ускорителя (например, в секциях ускорительной трубки) является скачкообразное изменение потенциала высоковольтного электрода вторичной обмотки трансформатора, наблюдаемое при электрических пробоях в системе по полному напряжению. Такие пробой, как правило, происходят при



Ускоритель импульсного типа... в основном... работы... как... как...

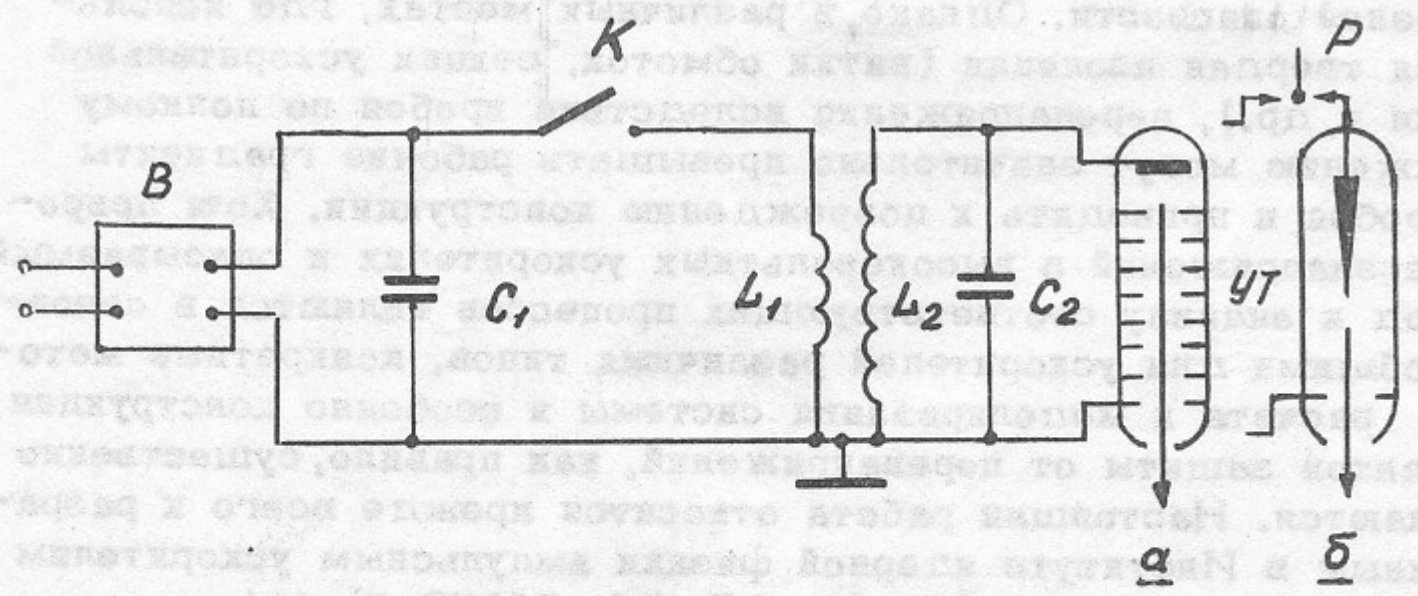


Рис.1. Электрическая схема импульсного ускорителя.  
 В-выпрямитель;  $C_1$ ,  $L_1$ ,  $C_2$ ,  $L_2$ -элементы связанных контуров, К-ключ первичного контура, УТ-ускорительная трубка: а - непосредственно присоединенная к высоковольтной обмотке, б-присоединенная к ней через разрядник-обостритель Р.



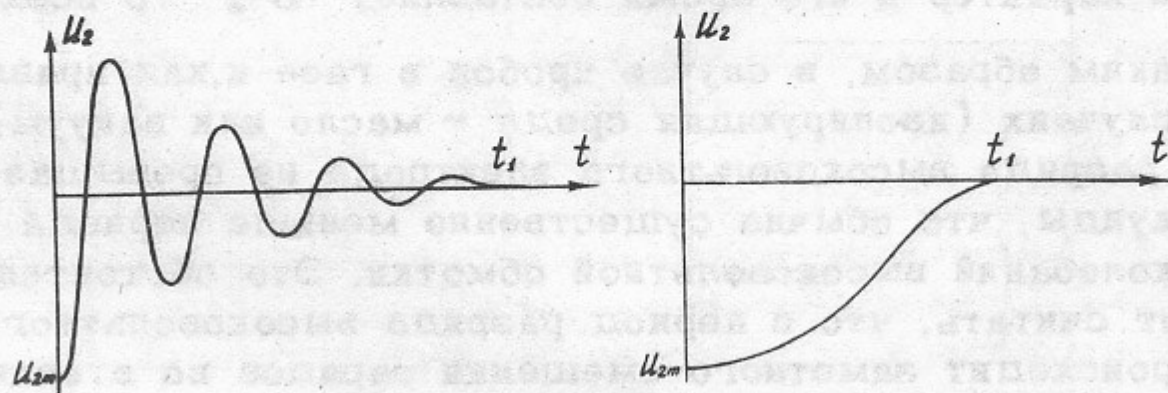
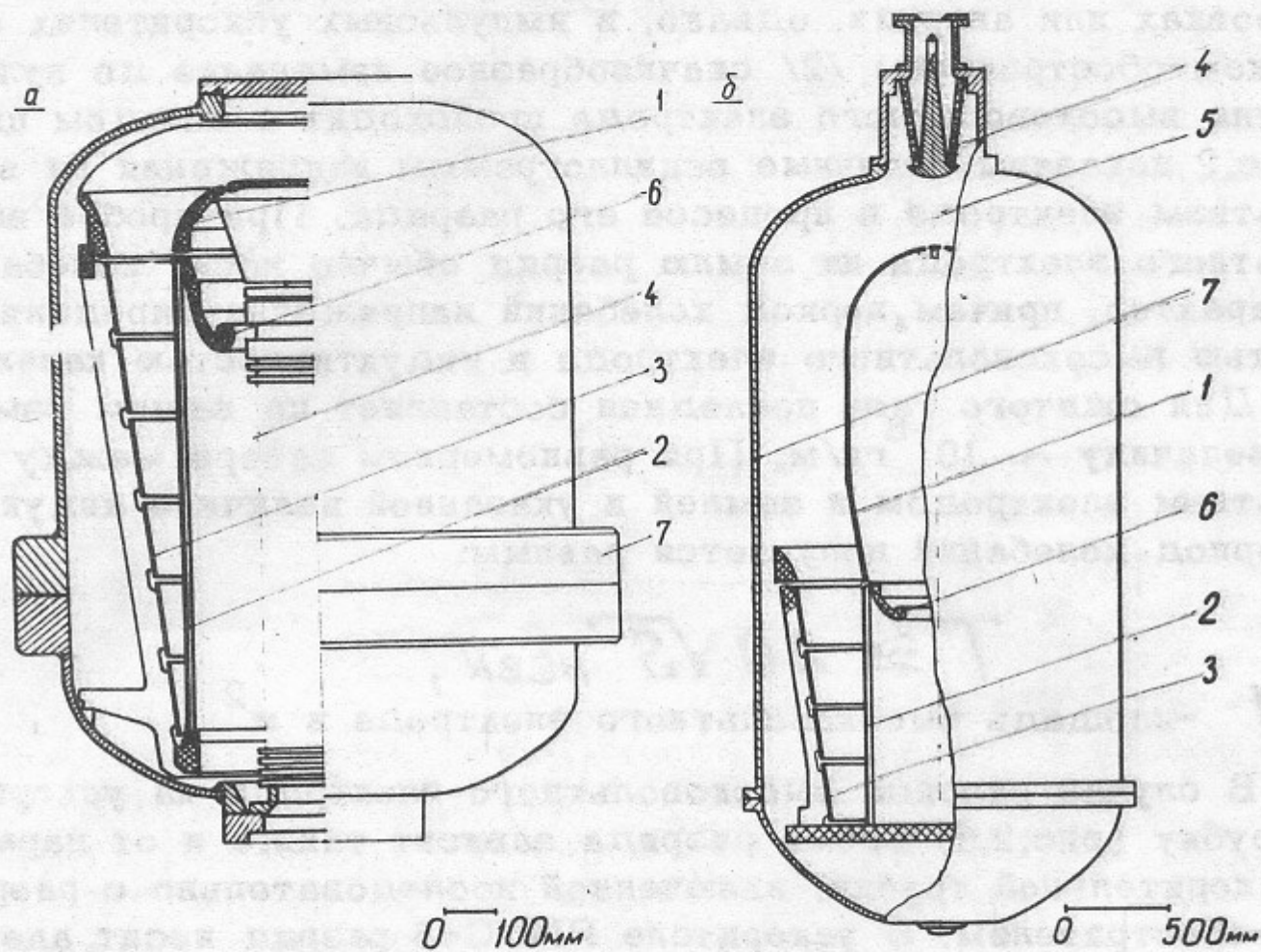


Рис.2. Конструктивная схема импульсных ускорителей и типичные осциллограммы напряжения на высоковольтном электроде при разряде.

- 1 - высоковольтный электрод (кондуктор),
- 2 - вторичная обмотка трансформатора, 3-первичная обмотка,
- 4 - ускорительная трубка, 5-разрядник-обостритель, 6-котел ускорителя, 7-электрод емкостной защиты.



тренировках или авариях, однако, в импульсных ускорителях с разрядником-обострителем /2/ скачкообразное изменение до нуля потенциала высоковольтного электрода происходит в каждом цикле. На рис.2 показаны типичные осциллограммы напряжения на высоковольтном электроде в процессе его разряда. При пробое высоковольтного электрода на землю разряд обычно носит колебательный характер, причем, период колебаний напряжения определяется емкостью высоковольтного электрода и индуктивностью канала разряда. Для сжатого газа последняя составляет по нашим измерениям величину  $\sim 10^{-6}$  гн/м. При равномерном зазоре между высоковольтным электродом и землей и указанной величине индуктивности период колебаний получается равным:

$$T \cong 20 \sqrt{S} \text{ нсек},$$

где  $S$  -площадь высоковольтного электрода в  $\text{м}^2$ .

В случае разряда высоковольтного электрода на ускорительную трубку (рис.2,б) время разряда зависит также и от параметров ускорительной трубки, включенной последовательно с разрядником-обострителем. В ускорителе РИУС-5 разряд носит аперiodический характер и его время составляет 60  $\pm$  70 нсек.

Таким образом, в случае пробоя в газе и, как правило, в других случаях (изолирующая среда - масло или вакуум) время полного разряда высоковольтного электрода не превышает долей микросекунды, что обычно существенно меньше периода собственных колебаний высоковольтной обмотки. Это обстоятельство позволяет считать, что в период разряда высоковольтного электрода не происходит заметного смещения зарядов во вторичной обмотке трансформатора и других элементах и что в этот период в системе протекают только емкостные токи. В дальнейшем в обмотках проходят затухающие колебания (волновые процессы), заканчивающиеся тем, что все части обмоток приобретают нулевой потенциал.

Возможность разделения всего переходного процесса во времени на две идеализированные стадии, которые будем условно называть сверхпереходной и волновой, облегчает понимание физических процессов и их количественный анализ. Такой подход используется, в частности, при изучении атмосферных и коммутационных перенапряжений в обмотках силовых трансформаторов и электрических машин (см., например, монографию /3/).



процессом, в этот период не меняются и, в частности, потенциал высоковольтного электрода

$$U_{2xx}(t) = U_{2xx}(0) = -U_{2max} = \text{Const.}$$

Величина эквивалентного импульса, воздействующего на систему (первый процесс)

$$U_{имп} = U_{2пер}(t) - U_{2xx}(t) = U_{2пер}(t) + U_{2max}$$

Кривые  $U_{имп}$  для основных видов разрядов, показанных на рис.2, приведены на рис.3.

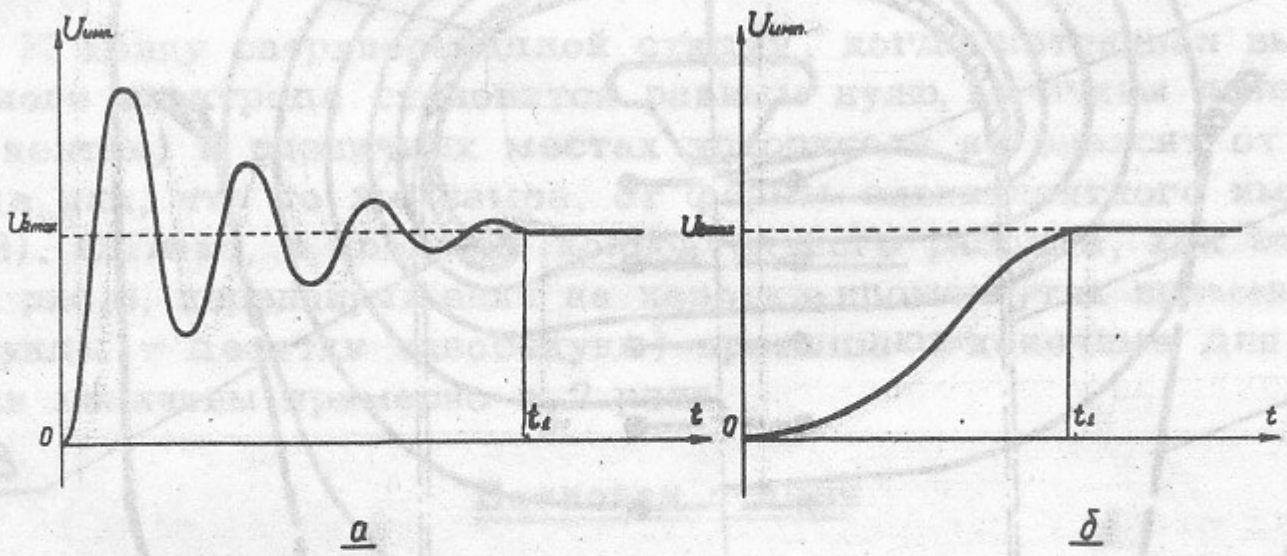
Как видно из предыдущего, изучение процесса в сверхпереходной стадии практически полностью сводится к анализу воздействия импульса напряжения на систему при нулевых начальных условиях. Для учета начальных потенциалов (градиентов) их нужно сложить (алгебраически) с полученными потенциалами (градиентами). Достоинства такого подхода очевидны. Во-первых, облегчается качественный анализ поведения системы; во-вторых, облегчается расчет распределения потенциалов в эквивалентной емкостной цепи; упрощается также моделирование. Вопросы расчета и моделирования будут подробно рассматриваться в следующем параграфе. Качественную картину распределения потенциалов электрического поля и возможность снижения максимальных градиентов рассмотрим здесь. Поскольку в интересующем нас классе импульсных ускорителей емкости, задающие распределение потенциалов в сверхпереходной стадии, обусловлены электрическим полем между конструктивными элементами, а сосредоточенные емкости (конденсаторы) обычно отсутствуют, и поскольку поле, как правило, имеет аксиально-симметричный характер, наглядную картину распределения электрических потенциалов проще всего получить из рассмотрения электростатического поля между высоковольтным электродом и землей. Эта картина соответствует воздействию импульсной составляющей напряжения на систему при нулевых начальных условиях.

Такая картина показана на рис.4. На левой части рисунка видно, что наибольшие градиенты поля наблюдаются в верхней части вторичной обмотки и на верхних секциях ускорительной трубки. Применение электрода емкостной защиты 6, скругляющего нижнюю часть высоковольтного электрода 5, позволяет заметно снизить гра-



Анализ на короткой обмотке и трубка при перемагничивании. Этот электрод является основным конструктивным элементом в виде - большой катушки с тонкими, обмоточными проводами.

На рис. 4 также видно, что в переходной стадии на верхних витках короткой обмотки 2 могут возникнуть электрические потенциалы, что приводит к пробоям между обмотками и изоляцией. Поэтому в процессе перемагничивания на время короткой обмотки подается напряжение в соответствии с рис. 5. В момент переключения напряжения на короткой обмотке (левый график) происходит перемагничивание короткой обмотки, а также происходит перемагничивание основной обмотки. В момент переключения напряжения на основной обмотке (правый график) происходит перемагничивание основной обмотки, а также происходит перемагничивание короткой обмотки.



Эти процессы происходят в этот момент, когда происходит перемагничивание основной обмотки (момент времени  $t_i$  на рис. 2). К этому моменту устанавливается колебательный режим перемагничивания. Это перемагничивание происходит в виде перемагничивания основной обмотки (с учетом ее индуктивности). Это перемагничивание является начальным для последующих процессов. В последующей стадии перемагничивания обмотки перемагничивание происходит как перемагничивание, так и перемагничивание основной обмотки. В этот момент перемагничивание происходит на коротком моменте перемагничивания (со стороны перемагничивания основной обмотки) и перемагничивание происходит на коротком моменте перемагничивания (со стороны перемагничивания основной обмотки).

**Рис. 3. Импульсная составляющая напряжения для колебательного и апериодического разрядов.**

Рис. 4. Кривые перемагничивания обмотки. 1 - перемагничивание основной обмотки, 2 - перемагничивание короткой обмотки, 3 - перемагничивание основной обмотки, 4 - перемагничивание короткой обмотки, 5 - перемагничивание основной обмотки, 6 - перемагничивание короткой обмотки.



происком в этот период не меняется в течение короткого  
 высоковольтного электрода

$$U_{2, \text{max}}(t) - U_{2, \text{max}}(0) = -U_{2, \text{max}} = \text{const.}$$

Величина статического импульса, соответствующая им импульсу  
 (первый импульс)

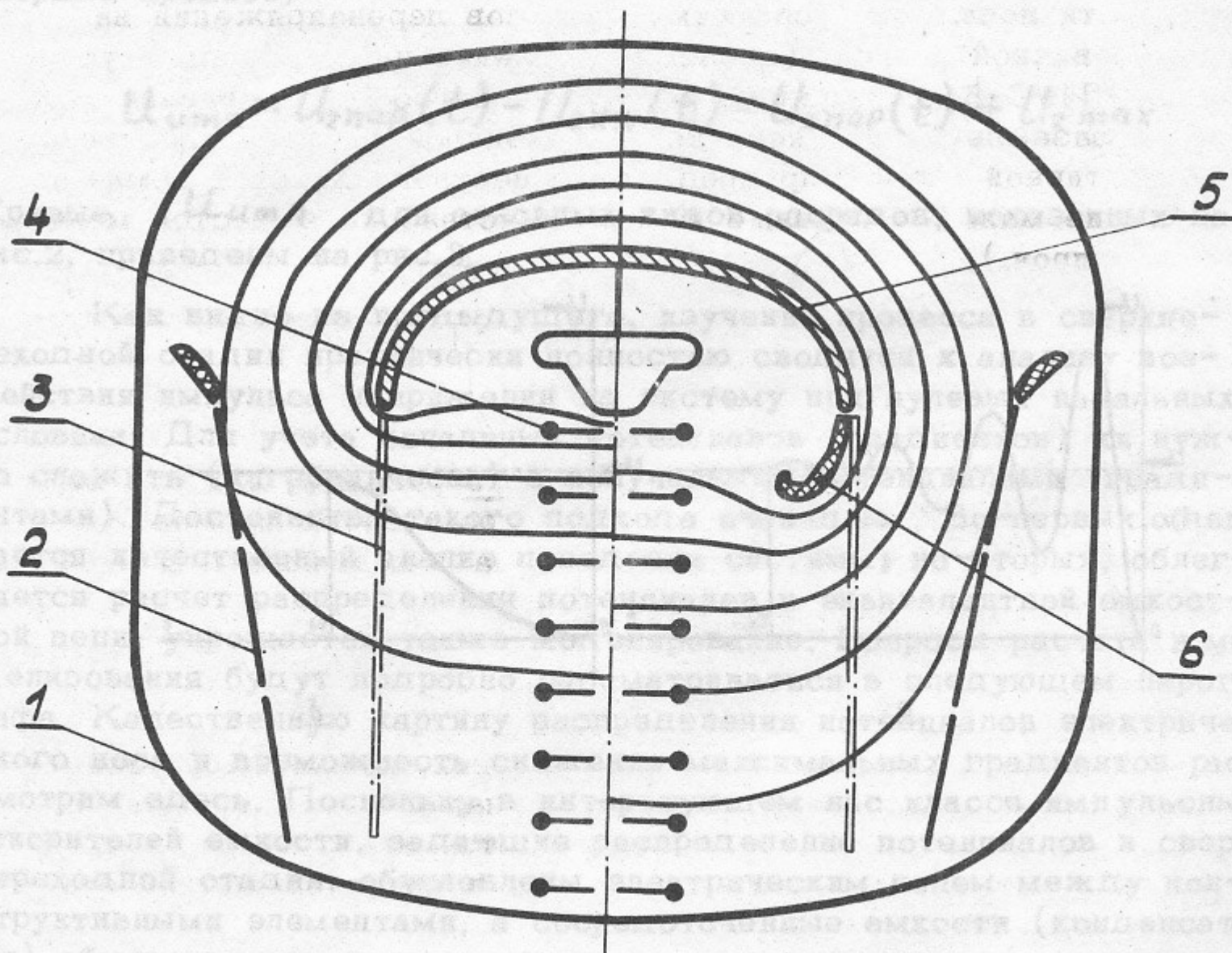


Рис.4. Картина электрического поля, обусловленная импульсной составляющей напряжения. Слева от оси - без защитного электрода, справа - с защитным электродом 6.

- 1 - котел, 2 - первичная обмотка, 3 - вторичная обмотка,  
 4 - ускорительная трубка, 5 - высоковольтный электрод,  
 6 - защитный электрод.



диенты на вторичной обмотке и трубке при перенапряжениях. Этот электрод является основным конструктивным элементом в разрядных импульсных ускорителях, снижающим перенапряжения.

Из рис.4 также видно, что в сверхпереходной стадии на верхних витках первичной обмотки 2 могут возникать значительные потенциалы, что приводит к пробоям между её витками и возможности попадания коротких импульсов перенапряжения на вводы первичной обмотки (последнее явление наблюдалось в ускорителе РИУС-5). Возможны различные способы подавления этой наводки (заземление верхнего конца первичной обмотки короткой малоиндуктивной шиной, присоединение верхнего витка к земле через большие малоиндуктивные емкости, установка емкостей между витками и проч.).

К концу сверхпереходной стадии, когда потенциал высоковольтного электрода становится равным нулю, величины потенциалов (градиентов) в различных местах ускорителя не зависят от вида разряда или, что то же самое, от формы эквивалентного импульса (рис.3). Однако, в процессе колебательного разряда, как это видно из рис.3, перенапряжения на короткие промежутки времени (наносекунды - десятки наносекунд) превышают конечные для этой стадии величины примерно в 2 раза.

### Волновая стадия

Эта стадия начинается с того момента, когда высоковольтный электрод приобретает нулевой потенциал (момент времени  $t_1$ , на рис.2). К этому моменту устанавливается конечное распределение потенциалов вдоль вторичной обмотки в сверхпереходной стадии (с учетом обеих составляющих процесса). Это распределение является начальным для последующих волновых процессов. В волновой стадии вдоль вторичной обмотки, которую можно рассматривать как спиральную линию, в обе стороны движутся волны, отражаясь на короткозамкнутых концах её (со стороны высоковольтного электрода - через искровой канал) до полного затухания. Длительность волновой стадии составляет обычно десятки и сотни микросекунд, т.е. на несколько порядков больше длительности сверхпереходной стадии.

В этот период градиенты в различных местах вторичной обмотки совершают затухающие колебания и могут достигать опас-



ных величин. Типичная картина процесса показана на рис.5. Кривая начального распределения  $\alpha$  рождает две волны половинной амплитуды, движущиеся в противоположные стороны. Через полпериода колебаний (фаза  $\sigma$ ) все потенциалы меняют знак, а распределение градиентов становится зеркальным относительно середины обмотки (затухание колебаний на первом периоде практически отсутствует). Если при начальном распределении потенциалов максимальные градиенты находятся, как правило, вблизи высоковольтного конца обмотки, то через полпериода такая же картина будет наблюдаться у заземленного конца. В промежуточных фазах волнового процесса величины градиентов в различных частях вторичной обмотки не превышают максимальных значений при начальном распределении.

## 2. Методы расчета и моделирования распределения потенциалов

Изложенное в предыдущем разделе является основой для проведения расчетов и моделирования распределения потенциалов в элементах ускорителя, если последние заданы (прямая задача), и подбора (расчета) параметров элементов защиты от перенапряжений по допустимым градиентам (обратная задача).

Для расчета (моделирования) конкретной системы в сверхпереходном режиме в некоторых случаях целесообразно использовать схему замещения в виде цепей, составленных из ёмкостей. Однако, в большинстве случаев, встречающихся в рассматриваемых ускорителях, такой метод, хотя принципиально и возможен, является нежелательным. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, учет всех ёмкостных связей между элементами конструкции ускорителя приводит к очень громоздким схемам. Правда, в некоторых случаях эти схемы можно упростить, приняв ряд ёмкостей (малых) равными нулю и ряд других (относительно больших) равными бесконечности. Сделать это обоснованно, однако, не всегда удается, так как одна и та же по величине ёмкость может по-разному влиять на распределение потенциалов в зависимости от её места в схеме. Другой причиной, ограничивающей применение ёмкостной схемы замещения, является трудность вычисления (за небольшими исключениями) ёмкостей между элементами ускорителя, имеющими в большинстве своем достаточно сложную геомет-



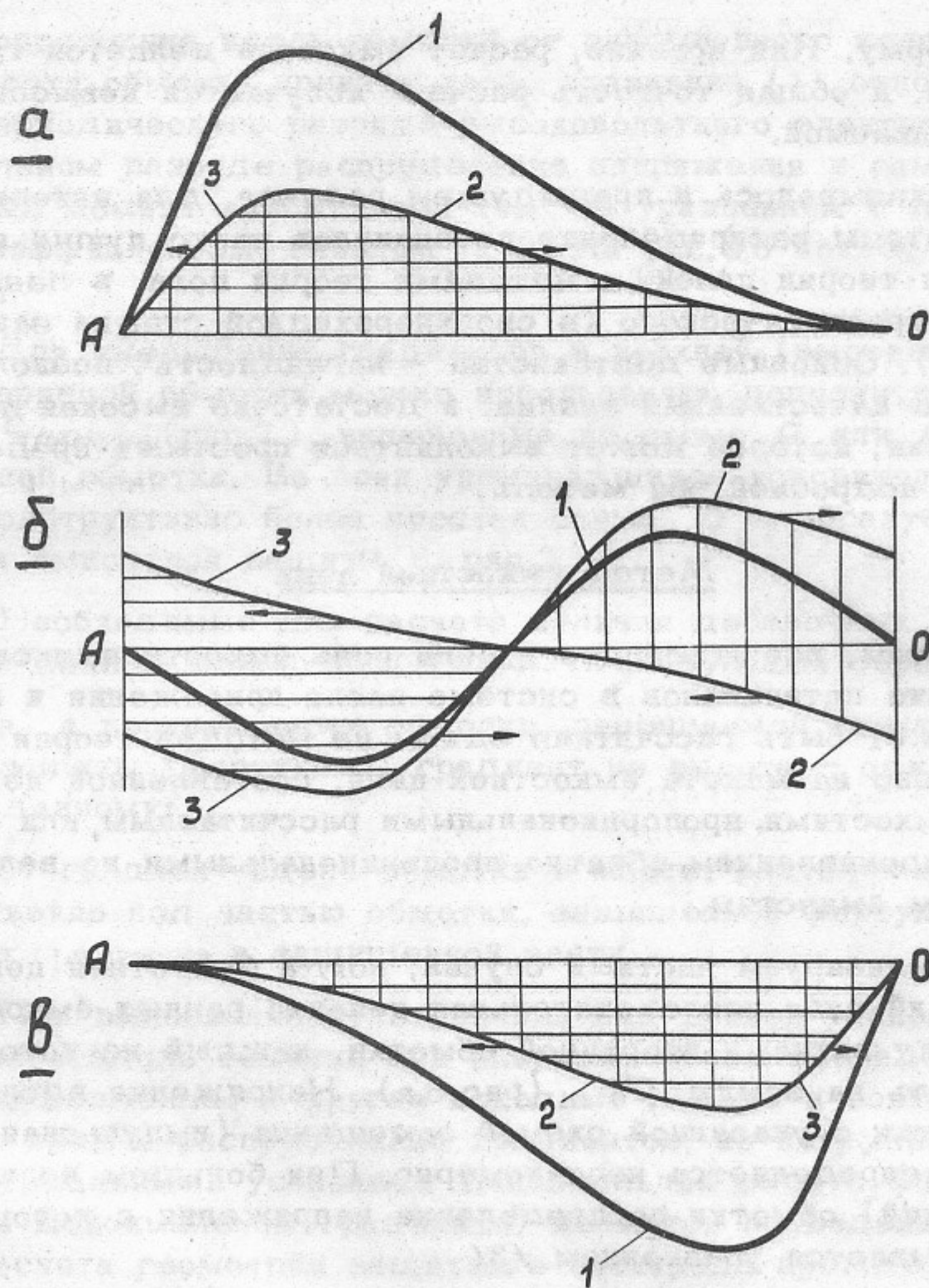


Рис.5. Движение волн и распределение потенциалов вдоль вторичной обмотки в различные моменты времени без учета затухания.

а - начальный момент, б - волны пробежали половину длины обмотки, в - волны пробежали всю длину обмотки:

1 - кривая распределения потенциала вдоль обмотки,

2 - волна, начавшая движение в сторону заземленного конца,

3 - волна, движущаяся в противоположную сторону.



рическую форму. Как правило, расчёт емкостей делается грубо приближенно, и общая точность расчёта получается невысокой и трудно оцениваемой.

Как указывалось в предыдущем разделе, для интересующей нас системы распределение потенциалов часто лучше искать не методами теории цепей, а методами теории поля, в данном случае, электростатического (в сверхпереходной стадии заряды неподвижны). Основные достоинства — наглядность, позволяющая легко делать качественный анализ, и достаточно высокая точность моделирования, которое может выполняться простыми средствами. Рассмотрим подробнее оба метода.

### Метод ёмкостной цепи

Допустим, все играющие в цепи роль ёмкости вычислены/5/. Распределение потенциалов в системе после приложения к ней напряжения может быть рассчитано одним из методов теории цепей, либо промерено на макете ёмкостной цепи, составленной из конденсаторов с ёмкостями, пропорциональными рассчитанным, или из резисторов с сопротивлением, обратно пропорциональными по величине рассчитанным ёмкостям.

Проанализируем частный случай, когда ёмкостная цепь имеет простейший вид: последовательная цепочка равных ёмкостей  $C'_d$  между витками вторичной обмотки, каждый из которых имеет ёмкость на землю  $C'_g$  (рис. 6,а). Напряжение вдоль вторичной обмотки с указанной схемой замещения (импульсная составляющая) распределяется неравномерно. При большом количестве витков (секций) обмотки распределение напряжения с хорошей точностью описывается уравнением /3/

$$U_x = U_m \frac{\operatorname{sh}(\sqrt{C_g/C_d} \cdot x)}{\operatorname{sh} \sqrt{C_g/C_d}}, \quad (1)$$

где  $C_d$  — полная продольная ёмкость обмотки; если число витков (секций) обмотки  $n$ , то  $C_d = C'_d/n$ ;  $C_g$  — полная поперечная ёмкость  $C_g = C'_g \cdot n$ .



X -расстояние вдоль обмотки от заземленного конца, причем, вся высота обмотки принята за 1. Уравнение (1) относится к случаю апериодического разряда высоковольтного электрода; при колебательном разряде распределение напряжения в самый неблагоприятный момент описывается тем же уравнением с дополнительным коэффициентом, близким к 2. На рис.6,б показаны оба эти случая.

Для уменьшения градиентов в верхней (высоковольтной) части вторичной обмотки можно использовать дополнительные ёмкости  $C_{\text{доп}}$  (рис.7), включенные по схеме а или б к части вторичной обмотки. Во всех упоминавшихся ускорителях использована конструктивно более простая схема б, образуемая электродом ёмкостной защиты в, рис.2.

Необходимые для расчета величин добавочных ёмкостей исходные данные можно сформулировать следующим образом:

а) в верхней части обмотки, защищаемой электродом ёмкостной защиты (фартуком), градиент по высоте - одинаковый, равный заданному;

б) градиент вдоль обмотки в месте, расположенном непосредственно под частью обмотки, защищенной фартуком, не превышает градиента в защищенной части.

При выполнении этих условий вид кривой распределения градиента вдоль обмотки при апериодическом разряде показан на рис.7,в. Возможны и другие исходные данные и соответственно другие кривые распределения градиентов, но нетрудно показать что оптимальными условиями (минимальная высота фартука при заданном максимальном градиенте) являются приведенные выше. Для расчета геометрии защитного электрода прежде всего необходимо определить его "электрическую" высоту.

Пусть  $U_m$  - рабочее напряжение на вторичной обмотке,

$h$  - полная высота вторичной обмотки,

$a$  - часть высоты обмотки, защищаемой фартуком, ("электрическая" высота фартука),

$U'$  - градиент напряжения в обмотке,

$\alpha$  - отношение максимального градиента в обмотке, не имеющей фартука, от импульсной составляющей напряжения к рабочему градиенту при апериодическом разряде;



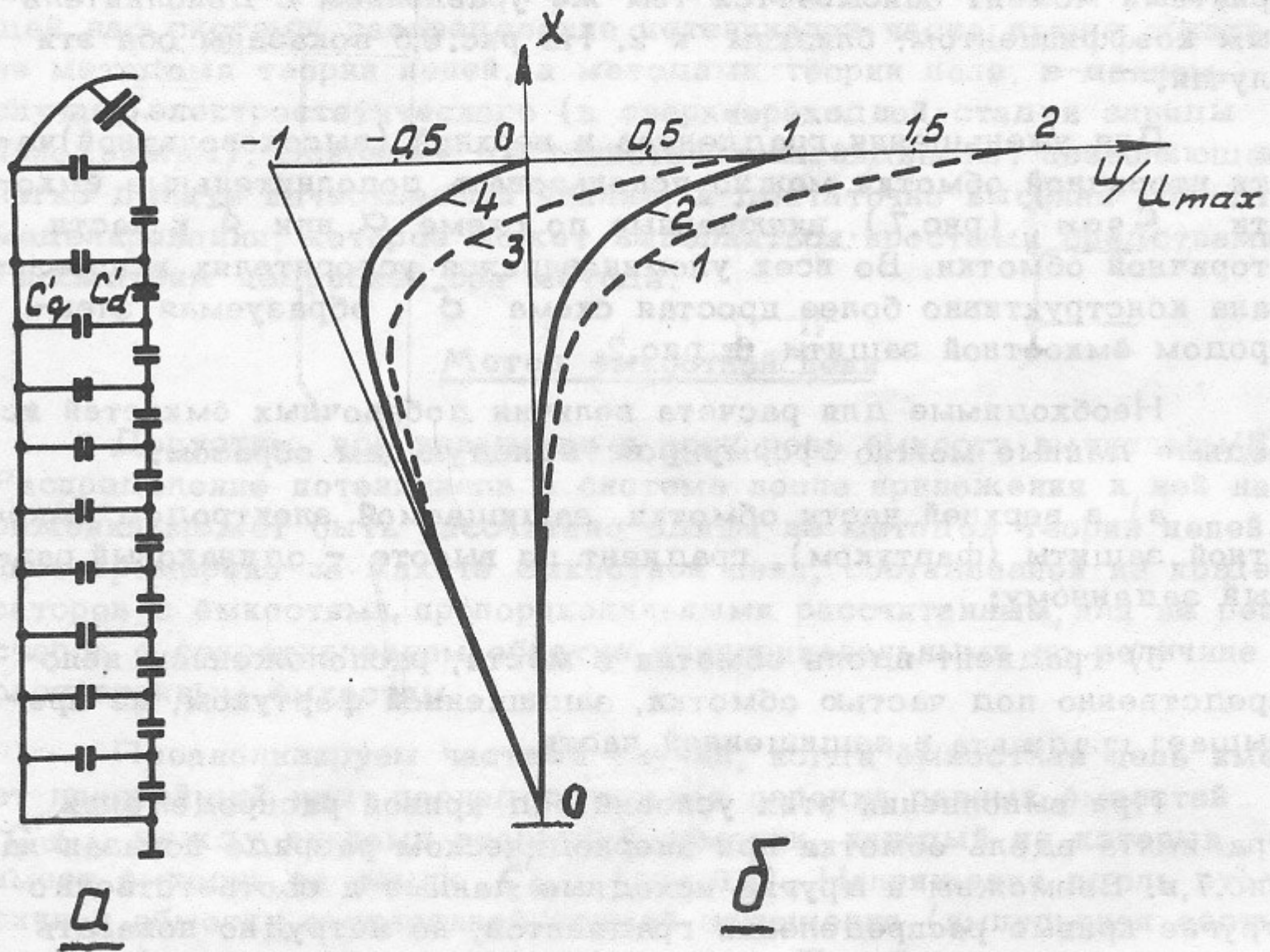


Рис. 6. Простейшая схема замещения вторичной обмотки в сверхпереходной стадии (а) и кривые распределения напряжения (б) от импульсной составляющей (1 и 2) и результирующие (3 и 4) при колебательном и апериодическом разрядах.



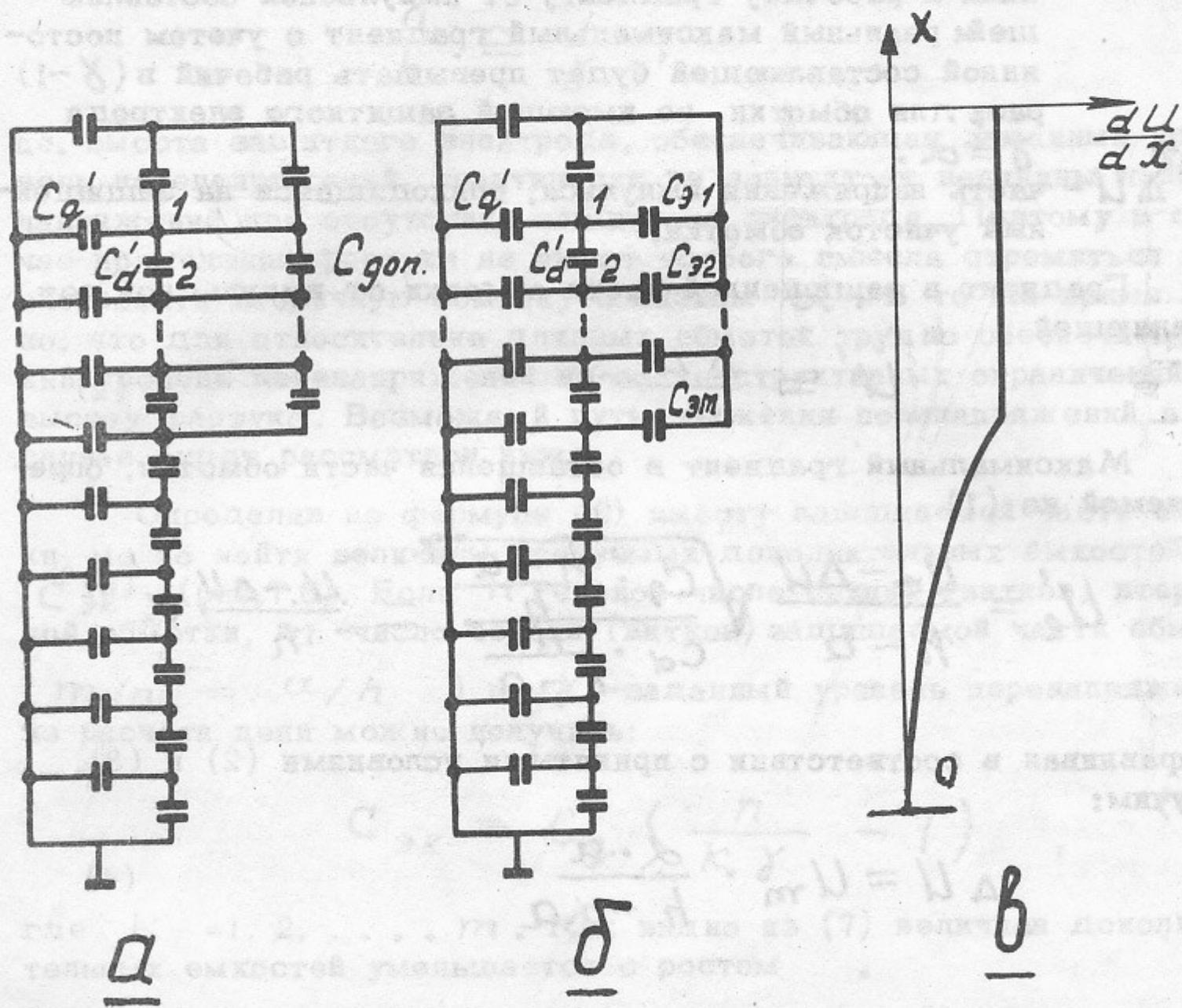


Рис.7. Схемы емкостной защиты продольными (а) и поперечными (б) емкостями; кривая оптимального распределения градиента вдоль обмотки (в).



из уравнения (1)

$$\alpha = \sqrt{C_g/C_d}$$

$\gamma$  - отношение максимального градиента при перенапряжениях к рабочему градиенту от импульсной составляющей; реальный максимальный градиент с учетом постоянной составляющей будет превышать рабочий в  $(\gamma - 1)$  раз; для обмотки, не имеющей защитного электрода  $\gamma = \alpha$ .

$\Delta U$  - часть напряжения импульса, приходящаяся на защищенный участок обмотки.

Градиент в защищенной части обмотки от импульсной составляющей

$$U' = \frac{\Delta U}{a} \quad (2)$$

Максимальный градиент в оставшейся части обмотки, определяемой из (1)

$$U_2' = \frac{U_m - \Delta U}{h - a} \sqrt{\frac{C_g \cdot \frac{h - a}{h}}{C_d \cdot \frac{h}{h - a}}} = \frac{U - \Delta U}{h} \alpha \quad (3)$$

Приравнявая в соответствии с принятыми условиями (2) и (3), получим:

$$\Delta U = U_m \cdot \frac{\alpha \cdot a}{h + \alpha a} \quad (4)$$

и

$$\gamma = \frac{1}{\frac{a}{h} + \frac{1}{\alpha}} \quad (5)$$

откуда

$$\frac{a}{h} = \frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\alpha} \quad (6)$$

Выражение (6) даёт зависимость необходимой высоты защищаемой части обмотки по отношению ко всей высоте от уровня



перенапряжений  $\gamma$ . Так как обычно  $\alpha \gg \gamma$ , величиной  $1/\alpha$  в (6) можно пренебречь и

$$\frac{a}{h} \approx \frac{1}{\gamma},$$

т.е. высота защитного электрода, обеспечивающая заданный уровень перенапряжений, практически не зависит от величины перенапряжений при отсутствии защитного электрода. Поэтому в случае применения фартука не имеет особого смысла стремиться проектировать вторичную обмотку с низким  $\alpha$ . В то же время видно, что для относительно длинных обмоток трудно обеспечить низкий уровень перенапряжений из-за конструктивных ограничений на высоту фартука. Возможный путь снижения перенапряжений в этом случае будет рассмотрен ниже.

Определив по формуле (6) высоту защищаемой части обмотки, можно найти величины требуемых дополнительных ёмкостей

$C_{эк}$  (рис.7,б). Если  $n$  - полное число секций (витков) вторичной обмотки,  $m$  - число секций (витков) защищаемой части обмотки ( $m/n = \alpha/h$ ) и  $\gamma$  - заданный уровень перенапряжений, из расчета цепи можно получить:

$$C_{эк} = C'_g \left( \frac{n}{k\gamma} - 1 \right), \quad (7)$$

где  $k = 1, 2, \dots, m$ . Как видно из (7) величина дополнительных ёмкостей уменьшается с ростом  $k$ .

#### Метод электростатического поля

Наиболее просто электростатическое поле, как известно, моделируется на электролитической ванне. В рассматриваемом случае ванна должна иметь наклонное дно в связи с тем, что поле аксиально-симметричное. В принципе возможно моделирование реальных (результатирующих) полей в сверхпереходной стадии, но проще и в этом случае рассматривать поле только от импульсной составляющей, т.е. моделировать поле, описываемое уравнением Лапласа, вместо поля, описываемого уравнением Пуассона. Задача еще более упрощается, если учесть, что полную картину поля знать обычно не нужно, достаточно знать распределение потенциалов по электродам.



Для этой цели не требуется механической системы фиксации координаты точки, в которой производится измерение потенциала, и нанесения эквипотенциалей. Поэтому для моделирования может использоваться обычный стол, покрытый ровным листом стекла (рис.8). В этом случае электроды, ограничивающие зону моделирования, уплотняются (обычно пластилином).

Учёт диэлектриков между электродами трубки, витками обмоток и проч. осуществляется корректировкой электрического сопротивления воды в соответствующей области за счет её глубины или расстояния между электродами. Геометрия электрода ёмкостной защиты, обеспечивающая заданный уровень максимальных градиентов, находится подбором. Опыт показывает, что для нахождения приемлемой геометрии электрода достаточно затратить несколько часов.

### 3. Конструкция элементов защиты от перенапряжений

При конструировании системы защиты от перенапряжений наряду с выбором конструкции основного элемента — защитного электрода (фартука), обеспечивающего заданный уровень перенапряжений, возникает еще несколько вопросов.

1. Высоковольтный электрод вторичной обмотки соединяется с ней в одной точке и, следовательно, в сверхпереходной стадии могут возникнуть нежелательные "перекосы" потенциалов по азимуту.

2. Желательно ограничить действие случайных скользящих разрядов или короны по поверхности витков вторичной обмотки, вызывающих необратимые повреждения.

3. Желательно предотвратить накапливание зарядов на внутренней поверхности каркаса вторичной обмотки от случайных разрядов или короны по поверхности.

При конструировании защитного электрода геометрии его наружной поверхности выбирается исходя из результатов, полученных при моделировании или расчетным путем. Так как защитный электрод по сути дела является продолжением высоковольтного электрода со стороны вторичной обмотки, то необходимо выполнить



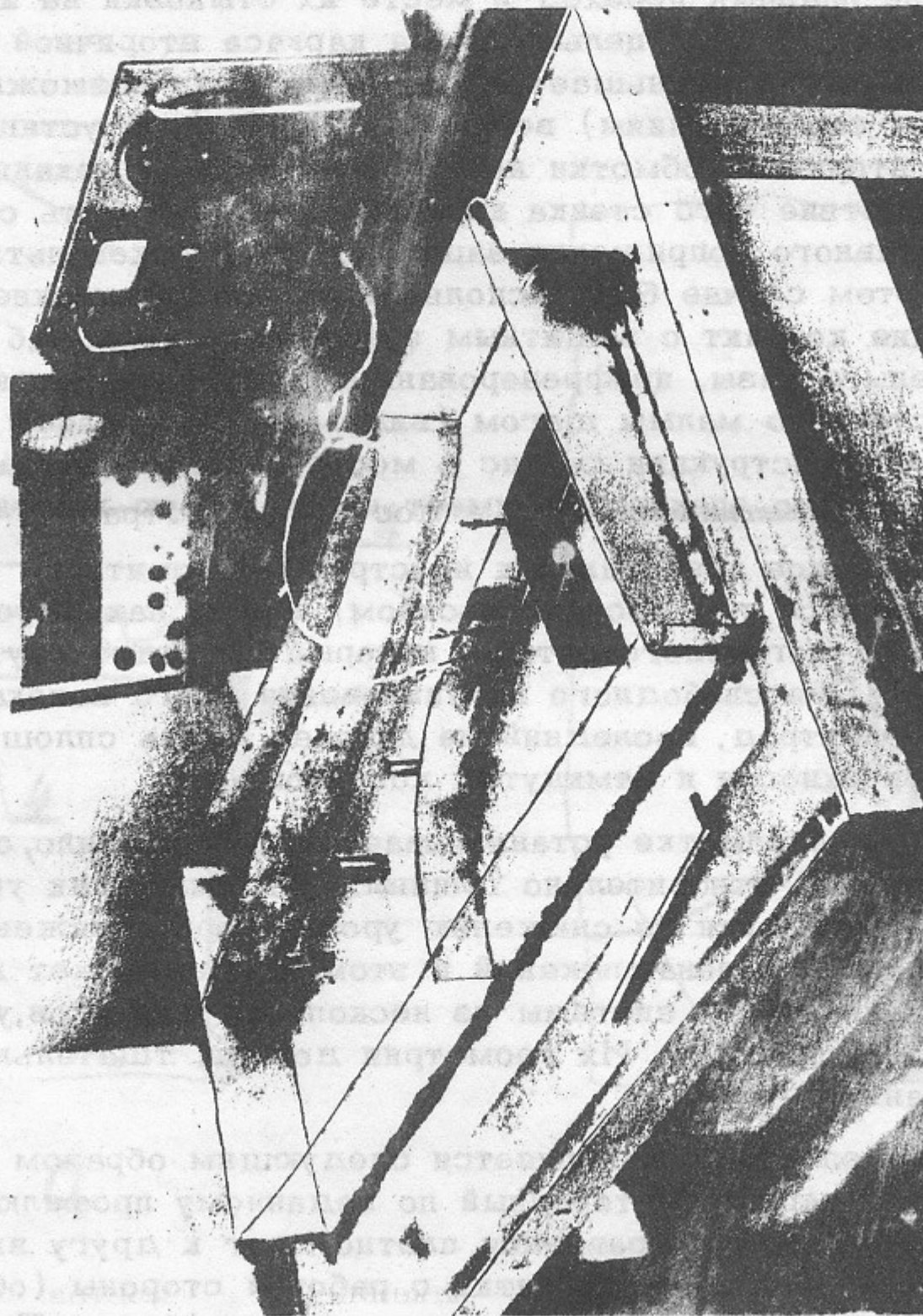


Рис. 8. Вид электролитической ванны при моделировании электростатического поля в ускорителе РИУС-5.



возможно более плавный переход в месте их стыковки на конце вторичной обмотки. С этой целью стенка каркаса вторичной обмотки в верхней её части уменьшается до минимально возможной (по конструктивным соображениям) величины (рис. 9,а). В установке РИУС каркас вторичной обмотки несет значительную механическую нагрузку, вследствие чего стенка каркаса не может быть слишком тонкой. Для плавного сопряжения защитного и высоковольтного электродов в этом случае были использованы металлические сегменты, имеющие контакт с защитным электродом (рис. 9,б). Сегменты вставлены в пазы, профрезерованные в каркасе вторичной обмотки с достаточно малым шагом (видны на фотографии, рис. 13). При такой конструкции каркас в месте сопряжения защитного и высоковольтного электродов имеет необходимую жесткость.

Дополнительное требование к конструкции защитного электрода накладывает на него обстоятельство, что он находится на пути переменного магнитного потока, который проходит внутри вторичной обмотки. Для свободного проникновения этого потока через защитный электрод, последний не должен иметь сплошной металлической поверхности и замкнутых контуров.

На вторичной обмотке устанавливается, как правило, один защитный электрод. В относительно длинных обмотках, как указывалось выше, возможности по снижению уровня перенапряжений ограничены. Снижение перенапряжений в этом случае может достигаться при использовании системы из нескольких фартуков, установленных по высоте (рис. 10). Их геометрия должна тщательно подбираться на ванне.

Защитный электрод выполняется следующим образом (рис. 11). На текстолитовый каркас, выточенный по заданному профилю, наматываются в радиальном направлении плотно друг к другу витки эмалированного провода. Затем витки с рабочей стороны (обращенной к обмотке) промазываются эпоксидным компаундом. После полимеризации смолы витки зачищаются от наплывов компаунда и полируются. Ненужная (с внутренней стороны каркаса) часть витков удаляется. Проволочки в верхней части каркаса закорачиваются медной шинкой. Чтобы не образовывался короткозамкнутый виток, шина имеет в одном месте разрыв, в этом же месте на ширине разрыва удалены витки на поверхности каркаса. Ширина разрыва определяется величиной виткового напряжения, которое наводится на закорачивающей шинке.



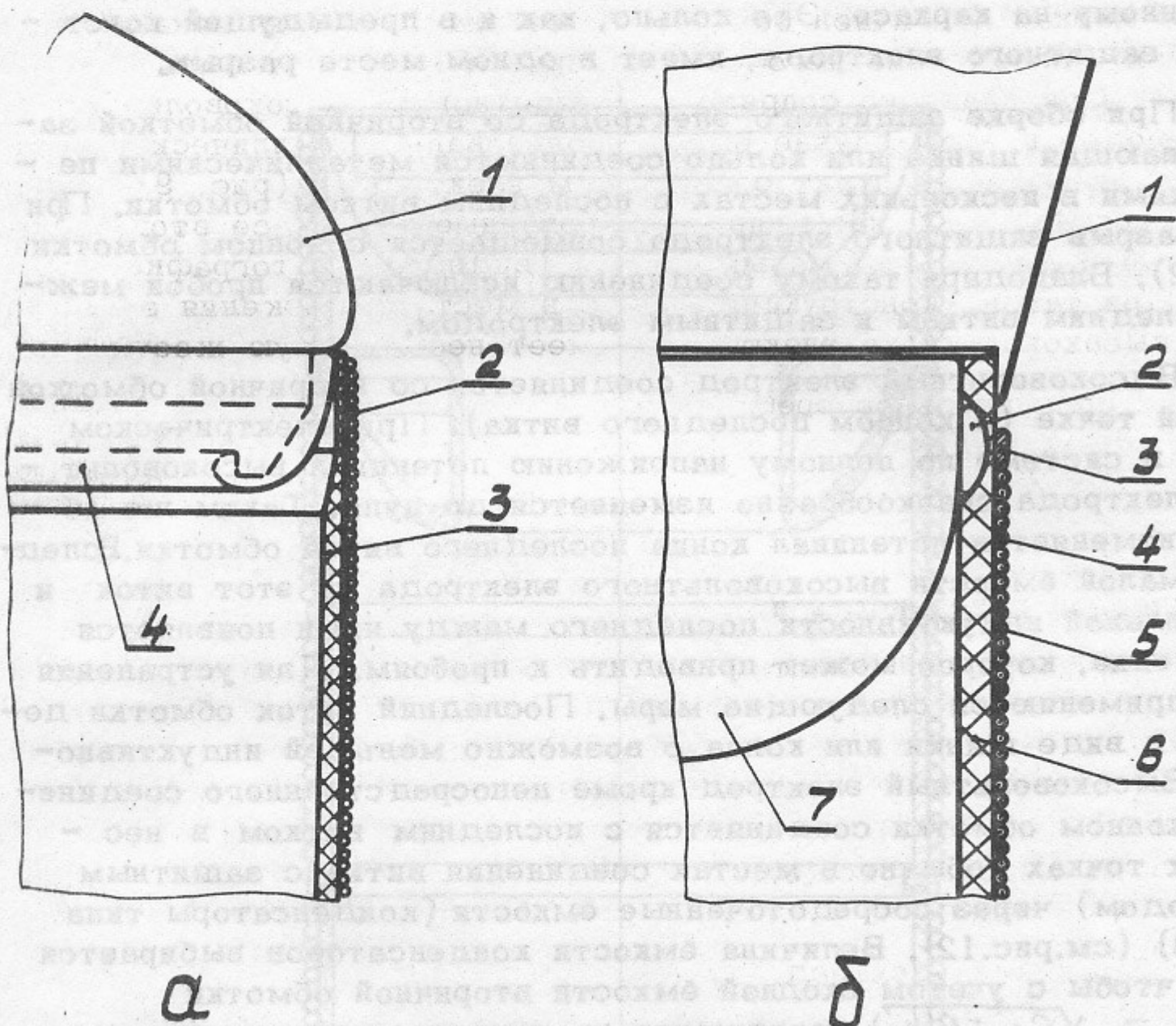


Рис. 9. Компонировка вторичной обмотки с защитным и высоко-  
вольтным электродами.

а-в ускорителях типа ЭЛИТ; 1-высоковольтный электрод,  
2-витки вторичной обмотки, 3-каркас вторичной обмотки,  
4-защитный электрод.

б-в ускорителе РИУС-5; 1-высоковольтный электрод,  
2-металлические сегменты, 3-последний виток вторичной  
обмотки, 4-голый (без изоляции) виток, 5-виток с изоля-  
цией, 6-каркас вторичной обмотки, 7-защитный электрод.



В ускорителях относительно больших габаритов (РИУС) вместо проволочек на каркасе установлены пластинки из нержавеющей стали, имеющие зазор между собой. В верхней части защитного электрода пластинки присоединяются к металлическому кольцу, закрепленному на каркасе. Это кольцо, как и в предыдущей конструкции защитного электрода, имеет в одном месте разрыв.

При сборке защитного электрода со вторичной обмоткой закорачивающая шинка или кольцо соединяются металлическими перемычками в нескольких местах с последним витком обмотки. При этом разрыв защитного электрода совмещается с концом обмотки (рис.12). Благодаря такому соединению исключаются пробой между последним витком и защитным электродом.

Высоковольтный электрод соединяется со вторичной обмоткой в одной точке (с концом последнего витка). При электрическом пробое в системе по полному напряжению потенциал высоковольтного электрода скачкообразно изменяется до нуля. Таким же образом изменяется потенциал конца последнего витка обмотки. Вследствие малой ёмкости высоковольтного электрода на этот виток и значительной индуктивности последнего между ними появляется напряжение, которое может приводить к пробоям. Для устранения этого применяются следующие меры. Последний виток обмотки делается в виде шинки или конца с возможно меньшей индуктивностью. Высоковольтный электрод кроме непосредственного соединения с концом обмотки соединяется с последним витком в нескольких точках (обычно в местах соединения витка с защитным электродом) через сосредоточенные ёмкости (конденсаторы типа КВИ-3) (см.рис.12). Величина ёмкости конденсаторов выбирается такой, чтобы с учетом входной ёмкости вторичной обмотки ( $C_{\text{вх}} = \sqrt{C_{\text{г}} \cdot C_{\text{д}}}$ ) напряжение на конденсаторах не превосходило допустимой величины.

В месте разрыва закорачивающей шинки защитного электрода также могут возникать заметные напряжения. Для снижения последних шинки электрода закорачиваются через такие же конденсаторы.

Соединение различных точек схемы ёмкости, закорачивающими эти точки по высокой частоте при перенапряжениях, не должно влиять на работу схемы в рабочем режиме. Это оказывается возможным вследствие того, что частоты в этих режимах резко отличаются.



Таким образом в момент пробоя скачок напряжения выходящего  
го электрода передается на весь осевидный электрод обмотки и в  
дальнейшем процесс развивается симметрично по азимуту обмотки.  
На эти же соображения необходимо по возможности исключить  
пробой в старую. Для чего целесообразнее всего в смысле  
де электрической прочности место расположения на оси усилителя.

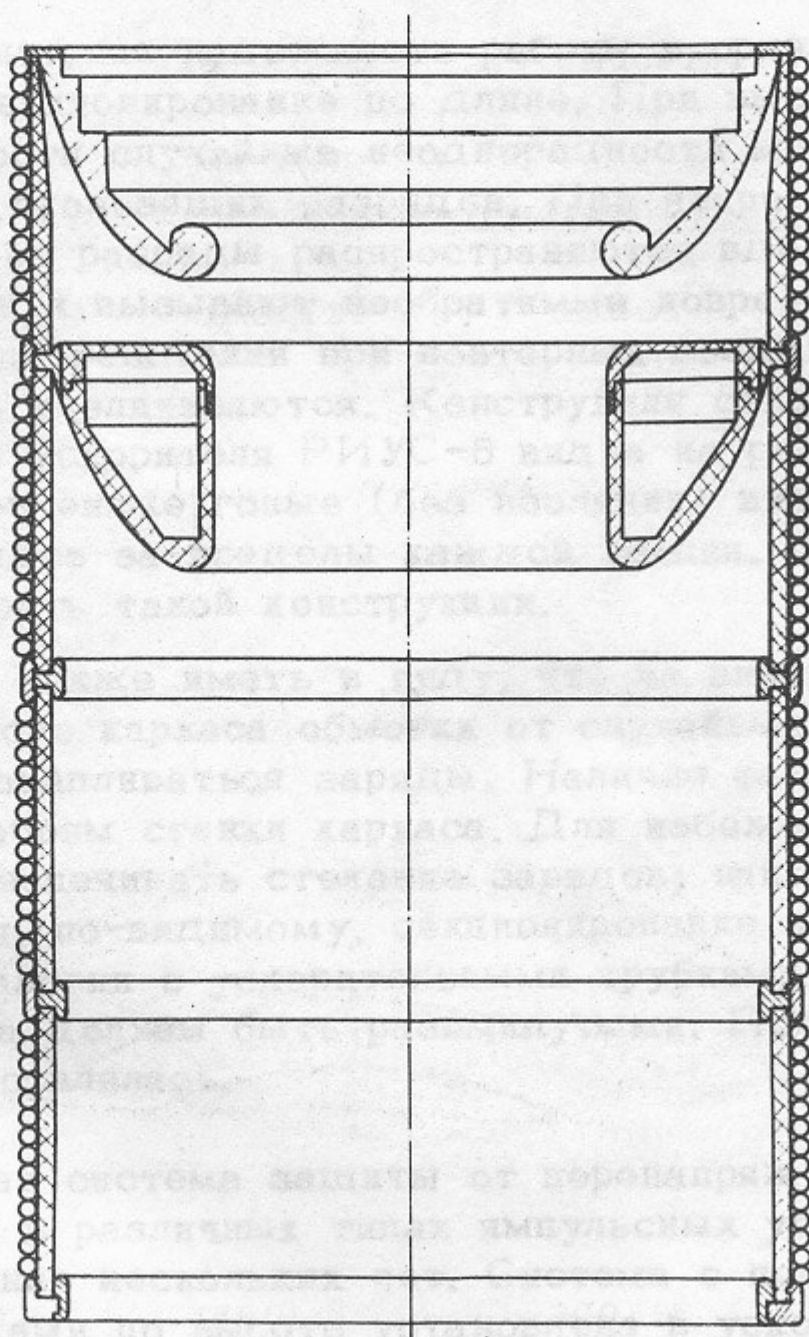


Рис.10. Вторичная обмотка с двумя защитными электродами.



Таким образом, в момент пробоя скачок потенциала высоковольтного электрода передается на весь последний виток обмотки, и в дальнейшем процесс развивается симметрично по азимуту обмотки. Из этих же соображений необходимо, по возможности, исключать пробой в сторону, для чего целесообразно наиболее слабое в смысле электрической прочности место располагать на оси ускорителя.

Для повышения надежности работы вторичной обмотки целесообразно её секционирование по длине. При высоких градиентах вдоль поверхности случайные неоднородности могут вызвать появление местных скользящих разрядов. При непрерывной намотке провода скользящие разряды распространяются вдоль обмотки по поверхности витков и вызывают необратимые повреждения их твердой изоляции. Эти повреждения при повторных воздействиях напряжения непрерывно увеличиваются. Конструкция секционированной вторичной обмотки ускорителя РИУС-5 видна на рис. 9, б и 13. Периодически установленные голые (без изоляции) витки препятствуют развитию разрядов за пределы каждой секции. Опыт работы показал эффективность такой конструкции.

Следует также иметь в виду, что на внутренней поверхности изоляционного каркаса обмотки от случайных скользящих разрядов могут накапливаться заряды. Наличие таких зарядов часто приводит к пробоям стенки каркаса. Для избежания этого эффекта желательно обеспечивать стекание зарядов; наиболее радикальной мерой является, по-видимому, секционирование каркаса вторичной обмотки по аналогии с ускорительными трубками, но с той разницей, что кольца должны быть разомкнутыми. Подобная конструкция пока не осуществлялась.

Описанная система защиты от перенапряжений успешно применяется нами в различных типах импульсных ускорителей (ЭЛИТ, РИУС) в течение нескольких лет. Система с несколькими защитными электродами по высоте установлена в ускорителе ЭЛИТА-3. Первые испытания дали положительные результаты.



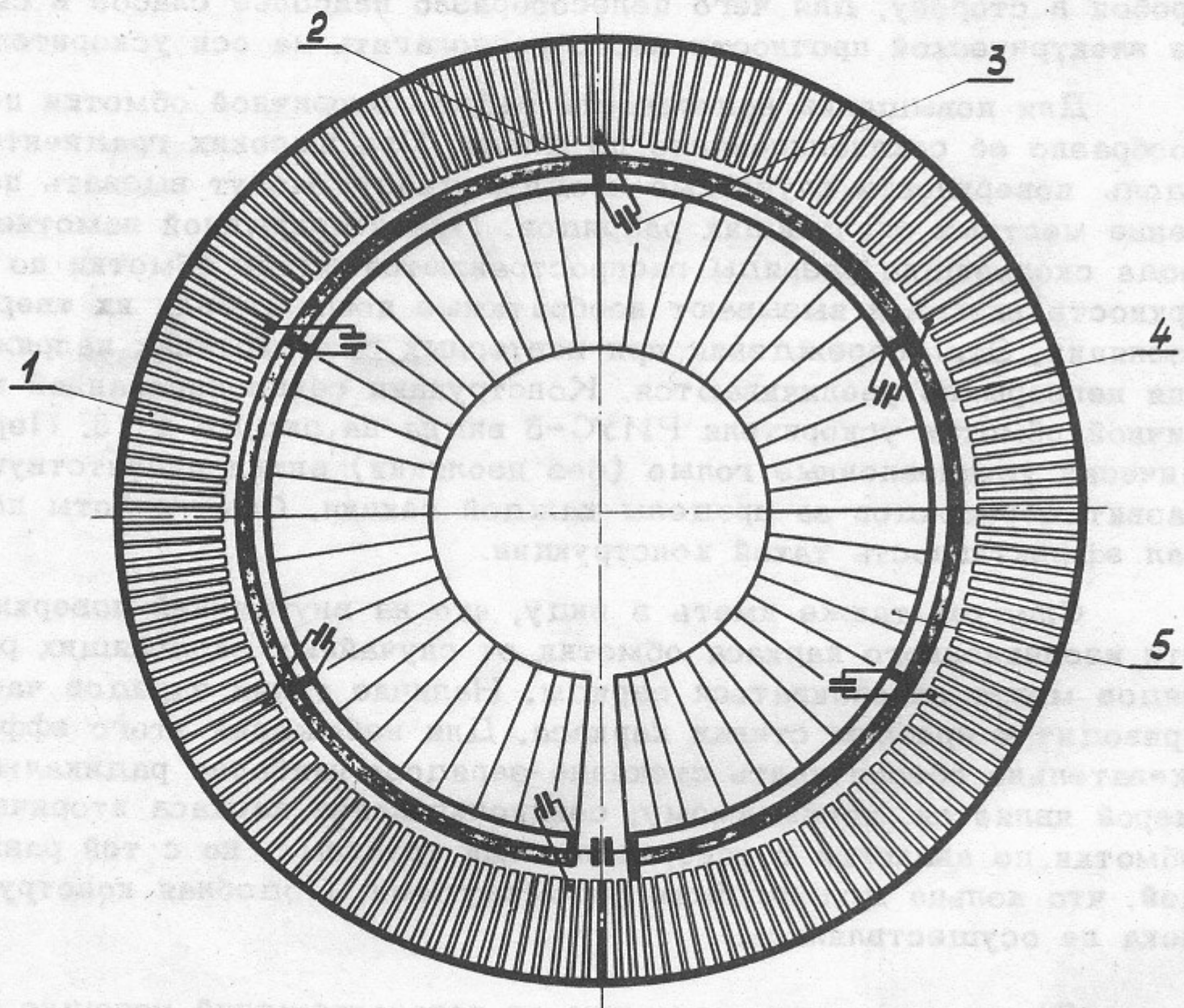


Рис.12. Схема соединений между высоковольтным электродом, последним витком вторичной обмотки и защитным электродом. 1-высоковольтный электрод, 2-металлическая перемычка, 3-конденсаторы, 4-последний виток вторичной обмотки, 5-защитный электрод.



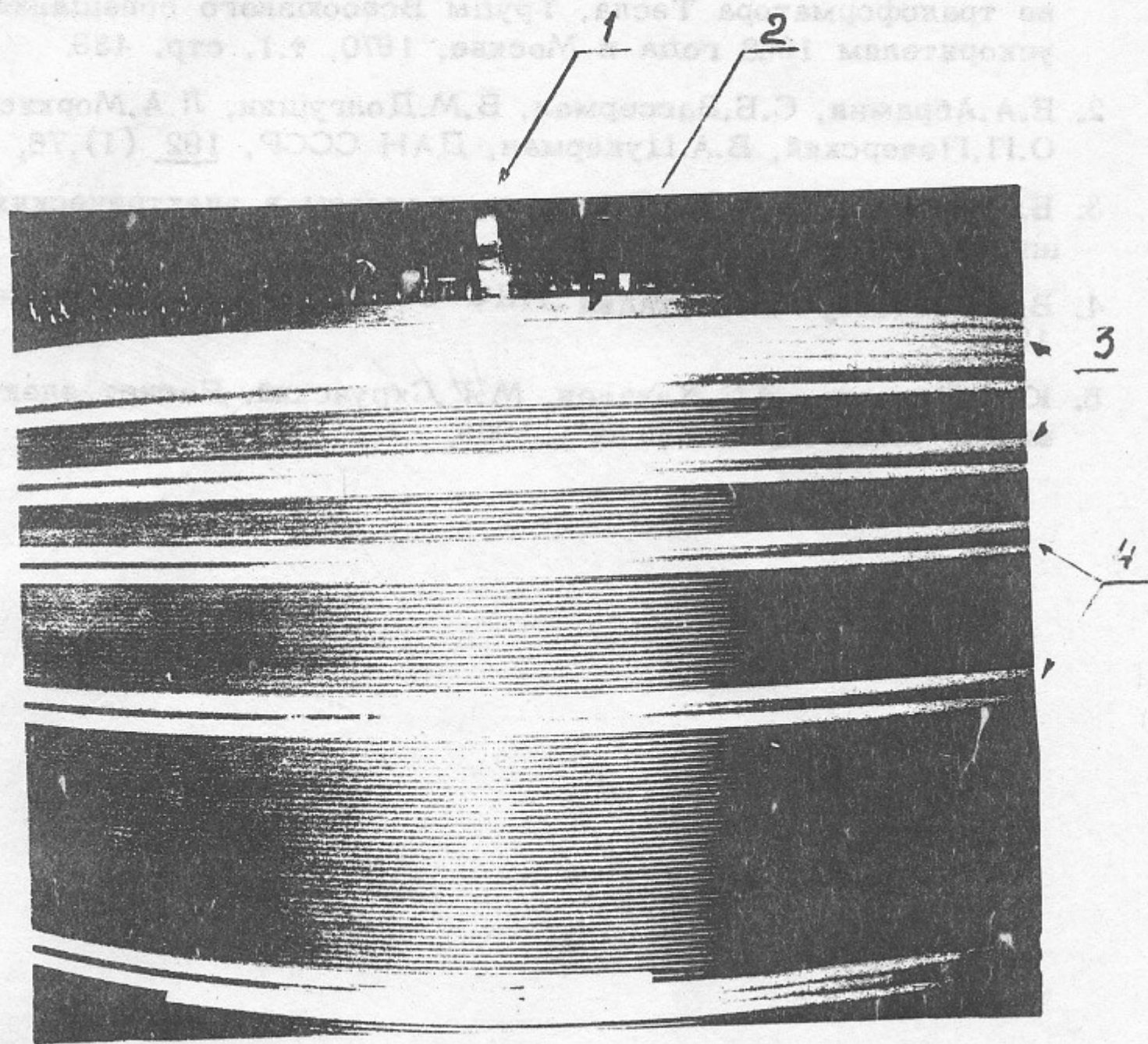


Рис.13. Фотография части вторичной обмотки ускорителя РИУС-5. 1-перемычка между последним витком и защитным электродом, 2-последний виток, 3-витки с усиленной изоляцией, 4-гольвые битки.



## Л и т е р а т у р а

1. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, Ускорители электронов на основе трансформатора Тесла, Труды Всесоюзного совещания по ускорителям 1968 года в Москве, 1970, т.1, стр. 439.
2. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, В.М.Долгушин, Л.А.Моркин, О.П.Печерский, В.А.Цукерман, ДАН СССР, 192 (1),76, 1970.
3. Б.Геллер, А.Веверка, Волновые процессы в электрических машинах, 1960.
4. В.А.Гапонов, Диссертация ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1967.
5. Ю.Я.Иоссель, Э.С.Качанов, М.Г.Струнский. Расчет электрической емкости, "Энергия", 1969.





1. В. А. Казарезов, В. М. Делгушин, Усиленные электроды на основе трансформатора Торо, Труды Всесоюзного съезда физиков-теоретиков 1970 года в Москве, 1970, т. I, стр. 434.
2. В. А. Абрамян, С. Б. Вассерман, В. М. Делгушин, И. А. Моркин, О. П. Петерский, В. А. Дуларман, ДАН СССР, 192 (1), 76, 1970.
3. Б. Г. Гаглер, А. Везерле, Волновые процессы в электрических машинах, 1960.
4. В. А. Галовин, Диссертация ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1971.
5. Ю. Я. Моссаев, Э. С. Качаев, М. Г. Струковский, Расчет электрической емкости, "Энергия", 1966.

---

Ответственный за выпуск И. В. КАЗАРЕЗОВ **МН 03618**

Подписано к печати **15** XI.1971г., заказ № **48**

**1,5** печ. л., тираж **250** экз., бесплатно. ПРЕПРИНТ

---

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР. вг