

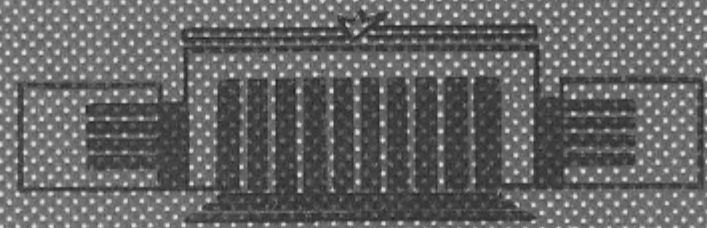
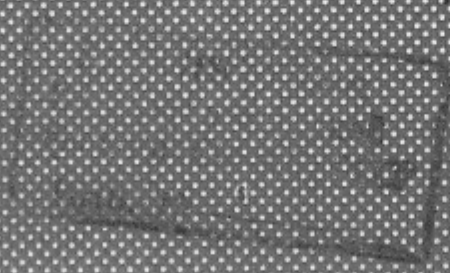
В. 19

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

С.Б.Вассерман, И.В.Казарезов, Е.Н.Кокин,
В.М.Радченко

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ЁМКОСТНОЙ
ИМПУЛЬСНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ

ПРЕПРИНТ 80 - 219



Новосибирск

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ЕМКОСТНОЙ ИМПУЛЬСНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ

С.Б.Вассерман, И.В.Казарезов, Е.Н.Кокин, В.М.Радченко

А Н Н О Т А Ц И Я

Описан емкостной импульсный накопитель энергии с емкостью 1150 пФ на напряжение 2 МВ, собранный из ситалловых конденсаторов типа К15-10-0.01/40. Приводятся методика отбора конденсаторов, результаты их испытаний, схема накопителя и опыт длительной его эксплуатации. Описываемый емкостной накопитель энергии является одним из основных элементов высоковольтного импульсного ускорителя электронов ЭЛИТ-3А с рабочими параметрами:

Энергия ускоренных электронов	- 1.7 МэВ
Ток в импульсе	- 50 А
Длительность импульса	- 12 мксек
Энергия в импульсе	- 1 кДж
Частота следования	- 1 Гц

К лету 1980 г. общая наработка составила $30 \cdot 10^6$ импульсов. С тем же накопителем планируется, если это будет необходимо, довести энергию электронов в импульсе до $1,5 \pm 2$ кДж.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ЕМКОСТНОЙ ИМПУЛЬСНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ

С.Б.Вассерман, И.В.Казарезов, Е.Н.Кокин, В.М.Радченко

Для ВЧ-генератора к позитронному источнику комплекса ВЭШ-4 [1] потребовался генератор электронного пучка с энергией до 2 МэВ, током до 100 А и длительностью 10 мксек. Для этой цели был разработан импульсный ускоритель электронов ЭЛИТ-3А [2] с генератором высокого напряжения на основе трансформатора Тесла. Для указанных параметров ускорителя при выбранном режиме работы контуров трансформатора Тесла в соответствии с [3] емкость вторичного контура должна быть равной 1300 пФ, а резонансная частота вторичного контура - 12 кГц.

Выбор типа конденсаторов

В ранее разработанных в ИЯФ ускорителях типа ЭЛИТ емкость вторичного контура складывалась из емкостей конструктивных элементов с газовой изоляцией и не превышала 100-150 пФ при рабочем напряжении 1+2 МВ. Для ускорителя ЭЛИТ-3А емкость с газовой изоляцией при рабочих градиентах до 200 кВ/см должна была бы иметь площадь высоковольтного электрода $\sim 15 \text{ м}^2$, что неприемлемо из-за больших габаритов. По разным причинам не подошли и жидкие диэлектрики с высоким ϵ .

Успехи в области разработки новых типов твердой изоляции позволили рассмотреть возможность создания накопителя на конденсаторах с твердым диэлектриком, выпускаемых отечественной промышленностью. Выбор типа конденсаторов производился с учетом следующих требований:

- переменная полярность напряжения с частотой колебаний ~ 10 кГц;

- броски тока с фронтами 50-100 нсек и общей амплитудой до 10 кА при пробоях в ускорительной трубке или по газовой изоляции;

- относительно малые габариты накопителя;
- большая наработка на отказ;
- частота следования - 1 Гц;
- рабочая среда - сжатый газ (SF_6) при давлении до 12 атм.

Поэтому выбранные элементы накопителя при высокой надежности работы в указанном режиме должны обладать высоким значением удельной запасаемой энергии, малыми потерями на рабочей частоте, достаточной динамической устойчивостью конструкции и возможностью простой компоновки в батарее.

В настоящее время отечественной промышленностью освоен выпуск конденсаторов из новых неорганических диэлектриков - сикондов [4], в достаточной мере отвечающих перечисленным требованиям. Сиконды отличаются от обычных ситаллов высоким значением ϵ и соединяют в себе лучшие свойства стекла и керамики [4,5]:

- высокая электрическая и механическая прочность;
- повышенная термостойкость;
- низкие значения $\operatorname{tg} \delta$ и высокое значение ϵ .

По удельной запасаемой энергии сикондовые конденсаторы превосходят прежние разработки в 3-6 раз.

Указанные конденсаторы уже начали применяться в высоковольтных ускорителях, однако, в других режимах работы. В ускорителях типа ЭЛВ [6] конденсаторы К15-10-0,01/40 работают при постоянном напряжении. В инжекторе для бетатрона [7] конденсаторы работают под воздействием импульсного напряжения (используется также трансформатор Тесла), однако используемые конденсаторы типа К15-10; 4,7 нФ, 50 кВ работают при напряжениях, составляющих только 1/3 от номинального.

Характеристики конденсаторов К15-10 в импульсном режиме

В соответствии с ТУ конденсаторы предназначены для работы при постоянном напряжении; при работе в импульсном режиме рабочее напряжение должно составлять 60% от номинального. Однако, работа конденсаторов в импульсном режиме, по видимому, изучена мало, и поэтому конденсаторы были подверг-

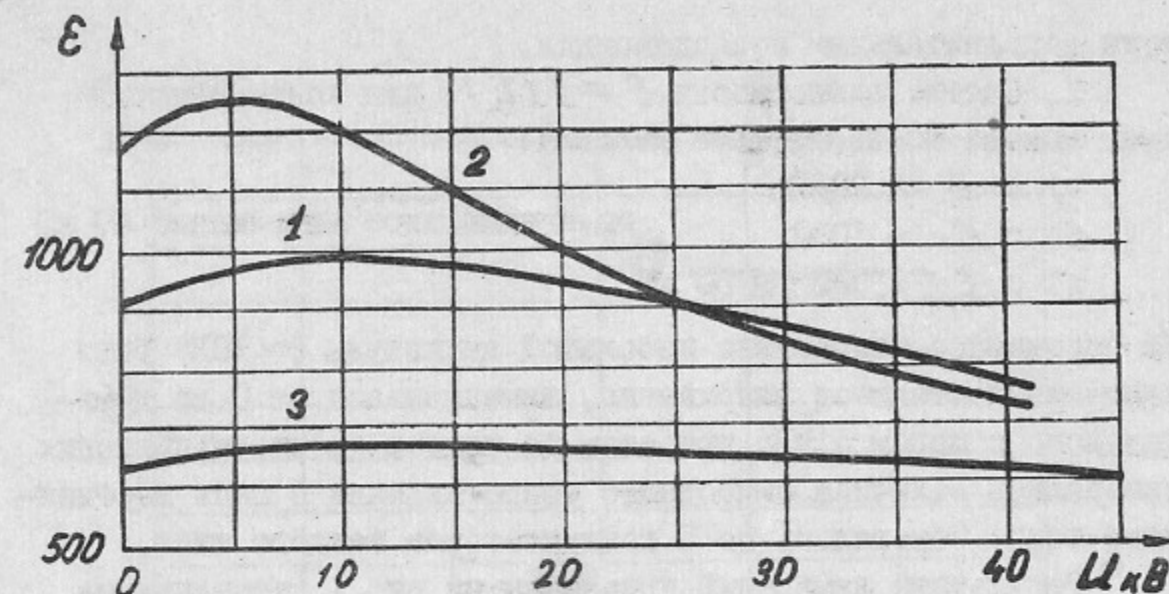


Рис.1. Зависимость ϵ от U для конденсаторов с $\epsilon = 1000$ (1), 2000 (2) и 500 (3).

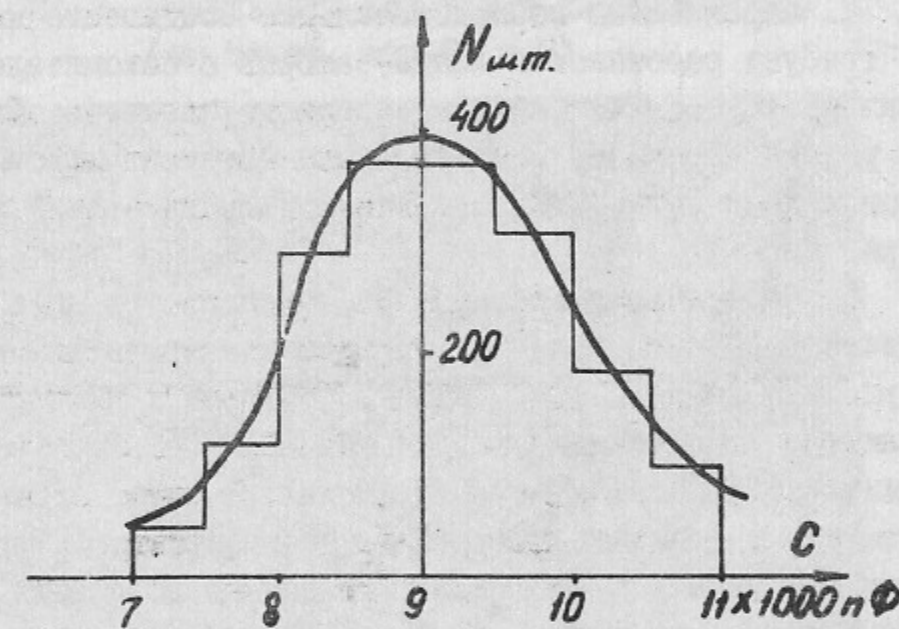


Рис.2. Распределение по величинам емкостей партии конденсаторов типа К15-10-0,01/40 в кол. 1800 шт.

нуты дополнительным исследованиям.

I. Снятие зависимости $\varepsilon = f(E)$ для конденсаторов трех типов (по паспортным данным):

- а) с $\varepsilon = 2000$
- б) с $\varepsilon = 1000$ на номинальное напряжение 40 кВ
- в) с $\varepsilon = 500$ на 50 кВ

На переменное напряжение небольшой амплитуды ($\sim 10В$) было наложено постоянное напряжение, изменявшееся от 0 до номинального с шагом 5 кВ, при этом на каждом уровне напряжения измерялась величина емкостного сопротивления в цепи переменного тока. Обмерялось по 5 конденсаторов каждого типа.

Результаты измерений приведены на рис.1 (усредненные характеристики). На основании результатов измерений было решено остановиться на конденсаторах с $\varepsilon_{пасп} = 1000$, так как конденсаторы с повышенным $\varepsilon_{пасп}$ при номинальных напряжениях теряют это качество.

2. Параллельно-последовательное соединение конденсаторов требует расстановки конденсаторов в накопителе с учетом величины емкости и знания ее среднего значения. Для получения распределения по емкостям была обмерена партия конденсаторов в количестве 1800 шт. Результаты измерений приведены на рис.2.

3. Партия конденсаторов без предварительного отбора в количестве 20 шт. была подвергнута электрическим испытаниям импульсным напряжением, близком по форме к эксплуатационному. Амплитуда напряжения равнялась 40 кВ, т.е. соответствовала номинальному постоянному напряжению. В схеме испытаний конденсаторы составляли емкость C_2 трансформатора Тесла, в котором возбуждались затухающие связанные колебания с длительностью полуволны равной 40 мксек. Испытания велись в элегазе при $P = 8$ атм. Частота следования - 5 Гц. На рис.3 приведена зависимость числа конденсаторов, выдержавших испытания, от числа импульсов. Средняя напряженность в диэлектрике при испытании конденсаторов составила $\sim 6,5$ кВ/мм, что существенно ниже пробивной напряженности для ситаллов [8]. В работе [9] показано, что при отсутствии значительного нагрева пробой неорганических диэлектриков при воздействиях переменных или импульсных напряжений происходит из-за деструкции

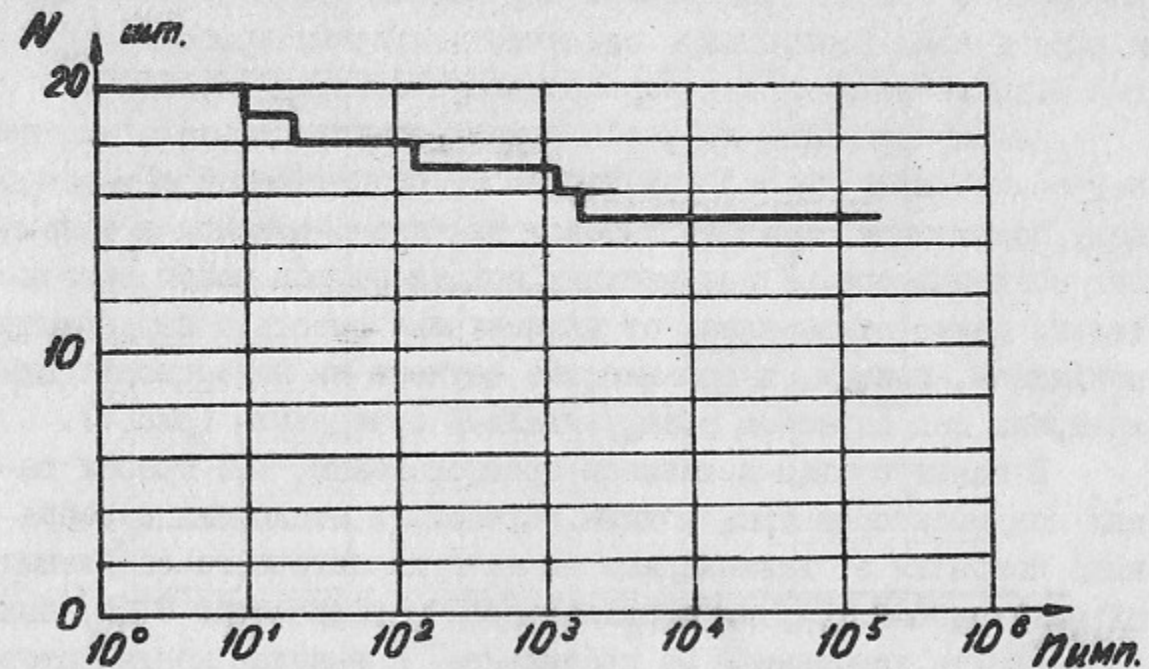


Рис.3. Результаты испытаний конденсаторов (см. текст, стр.6, п.3)

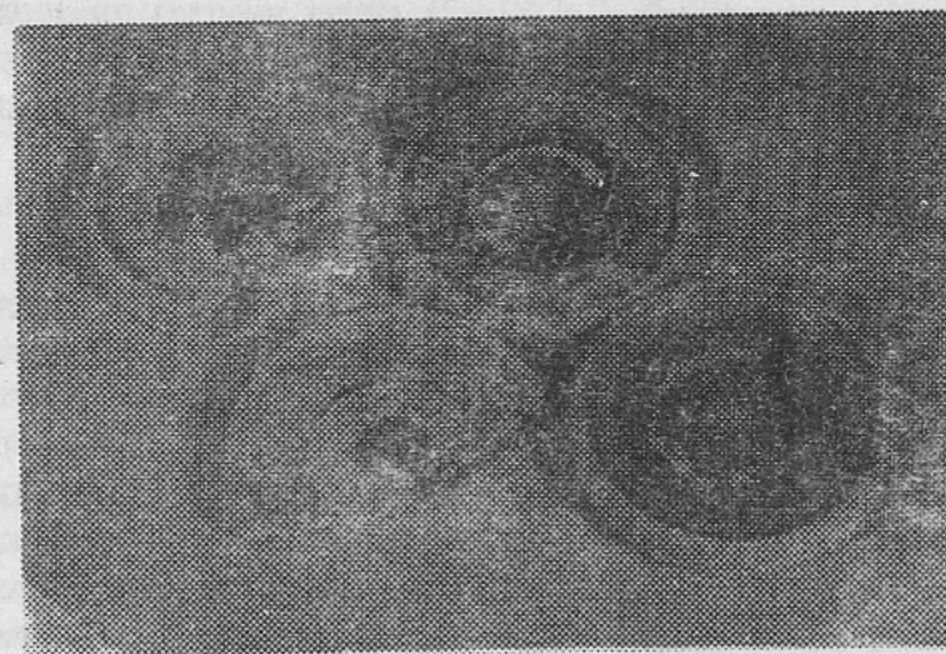


Рис.4. Вид разрушенных конденсаторов.

некоторого объема диэлектрика при каждом частичном разряде в поре и последовательном развитии частичных пробоев при каждой вспышке ионизации в поре (последовательный пробой).

Анализ вышедших из строя конденсаторов показал, что пробой обычно наступает в районе шайбы, припаяваемой к серебряному покрытию и служащей выводом для присоединения и крепления конденсатора. У разрушенных конденсаторов шайбы сравнительно легко открывались от диэлектрика вместе с серебряным покрытием, причем, в большинстве случаев на поверхности диэлектрика под серебром обнаруживались почернения (рис.4).

В связи с этим появилось предположение, что пробой таких конденсаторов происходил вследствие отслоения серебряного покрытия от диэлектрика из-за недостаточного сцепления их между собой. Партия конденсаторов в количестве 8 шт. была подвергнута испытаниям на растяжение. К выводам конденсаторов прикладывалось растягивающее усилие и фиксировалась нагрузка, вызывающая отрыв вывода. На рис.5 приведена зависимость числа конденсаторов, выдержавших испытания, от величины нагрузки. У трех конденсаторов ($P_{разр} < 28$ кг) отрыв выводов произошел из-за отслоения серебряного покрытия от диэлектрика; у остальных 5^{шт} выводы отрывались или по месту спая шайбы с покрытием, или же покрытие вырывалось вместе с диэлектриком.

Отслоение серебряного покрытия от диэлектрика может происходить в процессе припайки шайбы - вывода к покрытию. Если сцепление серебра с ситаллом недостаточно, при остывании места спая из-за разности коэффициентов линейного расширения медной шайбы ($20 \cdot 10^{-6}$) и ситалла ($10 \cdot 10^{-6}$) возникают внутренние напряжения, способные оторвать покрытие от ситалла, в результате чего в этом месте могут возникать частичные разряды. Отслоение серебра от ситалла может происходить и при приложении механических нагрузок в процессе крепления конденсаторов, а также - во время эксплуатации - за счет термоциклов, вибрации, или в результате быстрой подачи или сброса давления газа в пространство, окружающее конденсатор со скоростью, существенно превышающей скорость натекания газа в пространство под шайбой, если в пайке имеются неплотности.

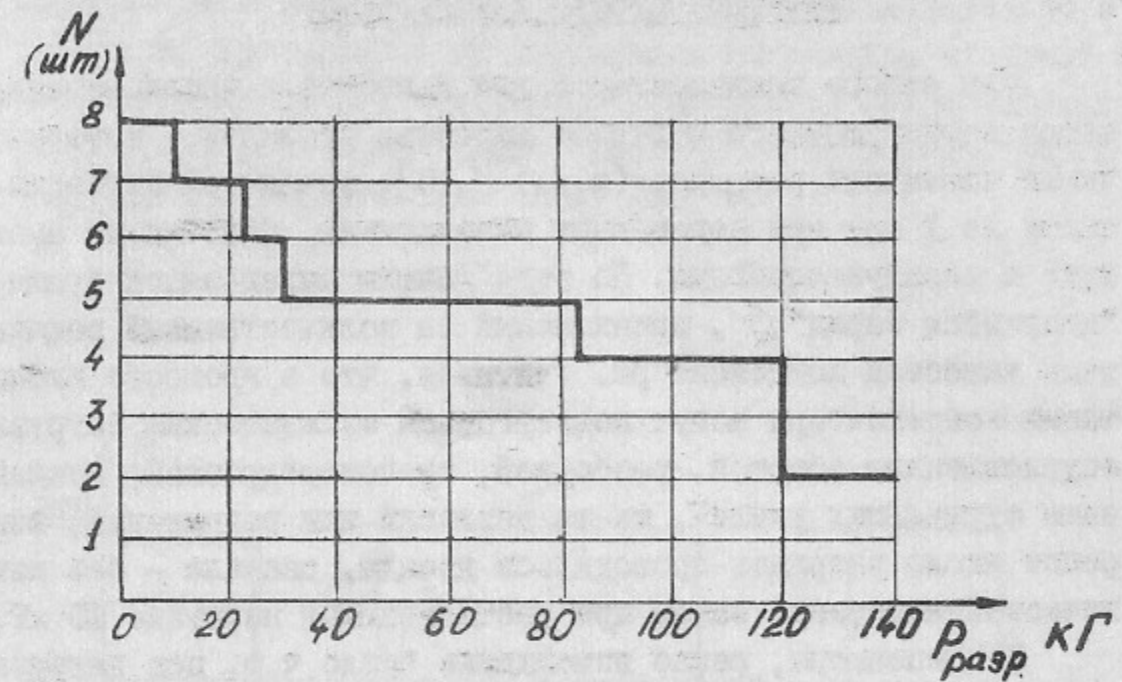


Рис.5. Результаты испытаний конденсаторов (см. текст, стр.8)

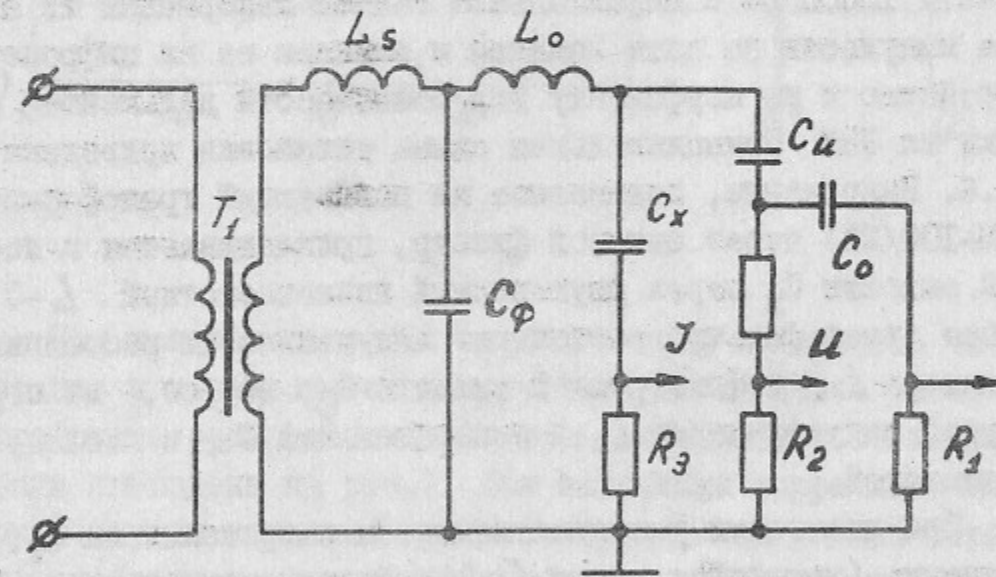


Рис.6. Принципиальная схема установки для измерения числа частичных разрядов

Методика отбора конденсаторов

При отборе конденсаторов для накопителя использовался метод неразрушающего контроля качества изоляции — измерение числа частичных разрядов (ч.р.) [10] различной интенсивности за 1 сек при переменных напряжениях, близких по амплитуде к эксплуатационным. По этим данным определялся суммарный "кажущийся заряд" Q , принимаемый за количественный показатель качества конденсатора. Учитывая, что в процессе эксплуатации конденсаторы могут подвергаться механическим нагрузкам, обусловленным сборкой, разборкой, транспортировкой, воздействием отрывающих усилий, из-за давлений или разрядов, измерение числа разрядов проводилось дважды, сначала — без механической нагрузки, затем при растягивающей нагрузке 10 кГ.

Конденсаторы, резко изменившие число ч.р. под нагрузкой, браковались. Первая партия конденсаторов обмерялась на установке "Корона-6", разработанной СИБНИИЭ [11] с чувствительностью 40 пК на емкости 10000 пФ. В дальнейшем для этих целей был разработан измеритель ч.р. с чувствительностью 10 пК на емкости 10000 пФ с параллельным съемом информации из анализатора импульсов по пяти каналам и записью ее на цифropечатное устройство и на перфоленту для возможности дальнейшей обработки на ЭВМ. Принципиальная схема установки приведена на рис.6. Напряжение, подаваемое на повышающий трансформатор T_I (ИОМ-100/2Б) через сетевой фильтр, прикладывается к исследуемой емкости C_X через двухзвенный низкочастотный $L-C$ фильтр. Первое звено фильтра состоит из индуктивности рассеяния трансформатора L_S и фильтрующей емкости C_Φ , второе — из ограничительной индуктивности L_0 и измерительной C_{II} и исследуемой C_X емкостей.

При частичных разрядах меняется напряжение на C_X ; это изменение (кажущийся заряд Q) отфильтрованное от $HЧ$ составляющей с помощью ВЧ-фильтра ($C_0 - R_1$), снимается с R_I и фиксируется с помощью регистрирующей аппаратуры.

Наряду с измерением ч.р. осуществляется измерение емкости ($C_X = I/\omega U$). Информация о напряжении снимается с части сопротивления R_2 , подсоединенного последовательно с C_{II} ,

информация о токе — с R_3 , включенного последовательно с C_X . Измерения проводились на переменном напряжении частотой 50 Гц и амплитудой 33 кВ. В качестве изолирующей среды использовалось трансформаторное масло. Испытаниям была подвергнута партия конденсаторов в количестве 1800 шт.

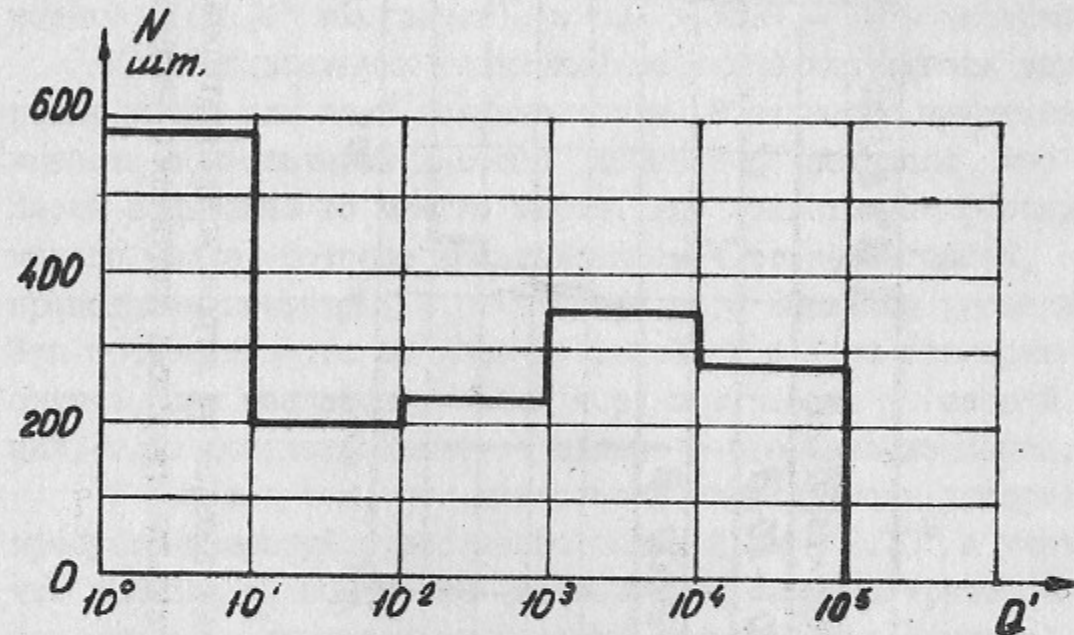


Рис.7.

При испытаниях у 170 конденсаторов изменилось число разрядов при приложении нагрузки, и они были забракованы. Гистограмма распределения числа конденсаторов от кажущегося заряда приведена на рис.7. Для выявления корреляции между сроком службы конденсатора и измеренным кажущимся зарядом были отобраны группы конденсаторов с различным кажущимся зарядом и подвергнуты электрическим испытаниям.

Было взято:

6 конденсаторов	с $Q' = 0$
7	с $Q' = 30-50$ ед
8	с $Q' = 50-1500$ ед
10	с $Q' = 3500-7000$ ед
5	с $Q' = 10000$ ед, где кажущийся заряд

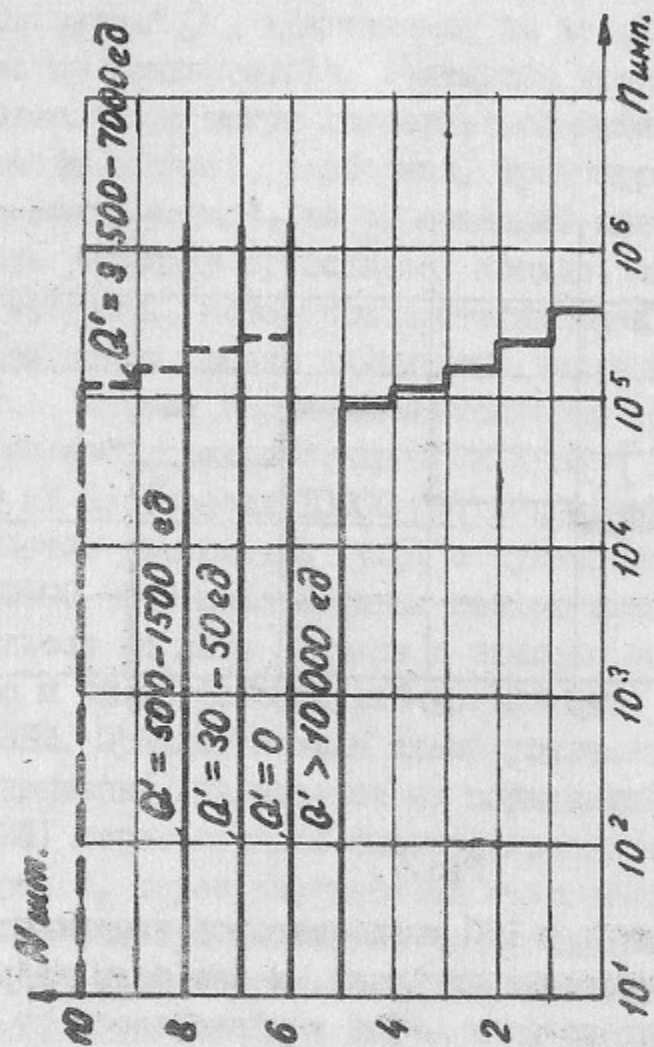


Рис.8. Кривые выхода из строя конденсаторов с различными уровнями частичных разрядов

брался в усл.един. $Q' = 1,25 \cdot 10^{10} Q$.

Все конденсаторы соединялись параллельно и присоединялись к испытательному трансформатору Тесла, образуя емкость его вторичного контура. Длительность полуволны связанных колебаний $T_{св}/2 = 44$ мксек. Частота следования импульсов - 17 Гц. Батарея конденсаторов помещалась в ванну с трансформаторным маслом. На рис.8 приведена зависимость числа конденсаторов с соответствующим кажущимся зарядом, выдержавших испытания, от числа импульсов. Конденсаторы с $Q' < 1500$ ед выдержали испытания полностью, ($2 \cdot 10^6$ импульсов), а с $Q' > 1500$ - лишь частично.

После длительных испытаний величина кажущегося заряда резко упала для всех конденсаторов. Разрушение конденсаторов, имевших до испытаний высокое значение Q' показало, что в процессе испытаний во многие места, где происходили разряды, попадало масло, которое под действием ч.р. разлагалось, образуя проводящие покрытия, в результате чего снизился уровень ч.р. Это обстоятельство не дало возможности в этом эксперименте судить, как меняется уровень ч.р. при работе в газовой изоляции, т.е. получить какие-то данные о старении изоляции.

В связи с тем, что длительная эксплуатация ускорителя требует наработки существенно большей, чем $2 \cdot 10^6$, и учитывая, что условия эксперимента (изолирующая среда - трансформаторное масло) отличаются от условий эксплуатации (элегаз), а также принимая во внимание высокие требования к надежности накопителя в целом, было принято решение использовать для накопителя конденсаторы с $Q' < 500$.

Как указывалось выше, пробой в испытанных конденсаторах обусловлены в основном частичными разрядами, возникающими под шайбой из-за отслоения покрытия от диэлектрика. Когда предприятие-изготовитель было поставлено в известность о результатах испытания конденсаторов, в технологию нанесения покрытий были внесены коррективы, позволившие улучшить качество сцепления покрытия с ситаллом и, соответственно, снизить уровень частичных разрядов.

Схема и особенности работы накопителя

Высоковольтный емкостной накопитель на 2 МВ состоит из

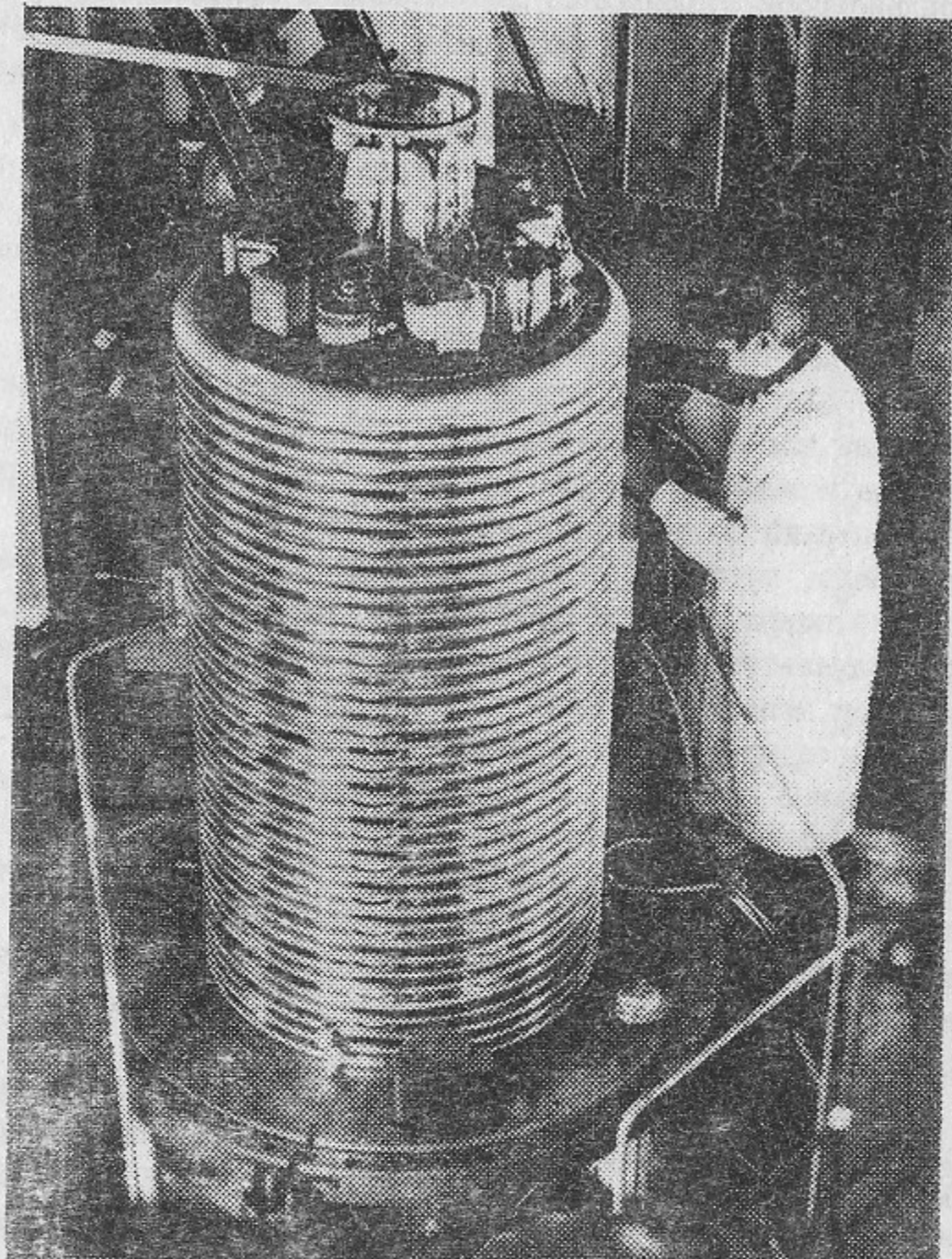


Рис.9. Высоковольтная колонна ускорителя ЭЛИТ-3А

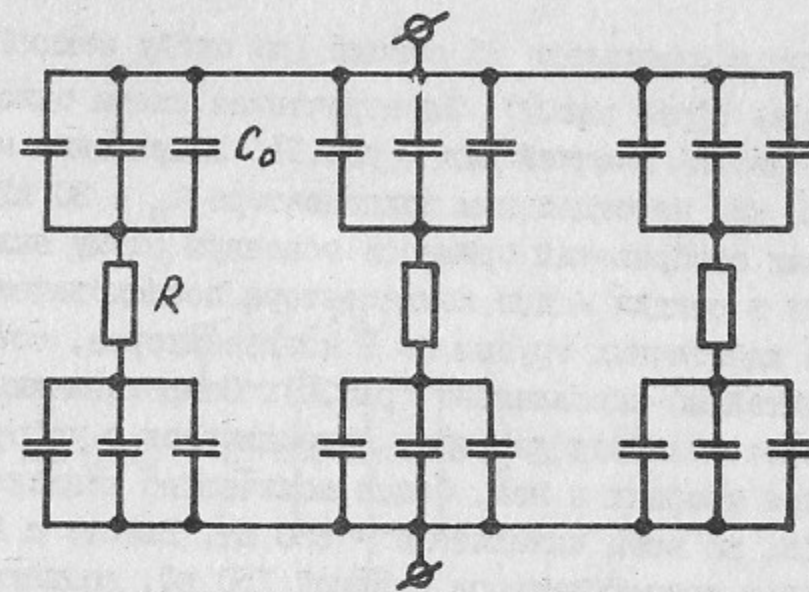


Рис.10. Электрическая схема одной секции накопителя

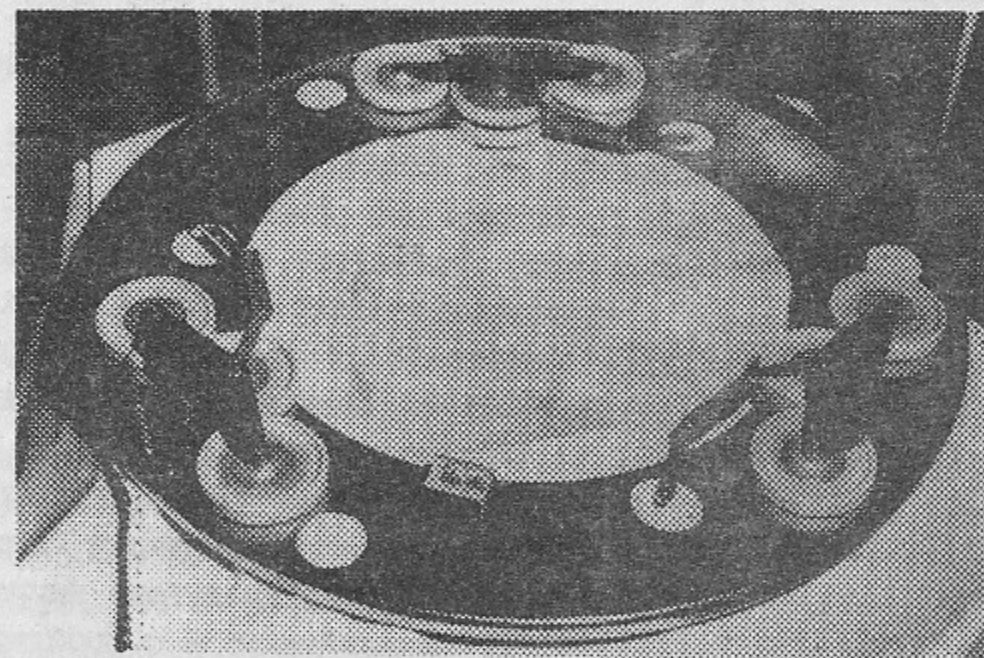


Рис.11. Элемент колонны

соединенных последовательно 35 секций (по числу секций ускорительной трубки) (фото рис.9). Электрическая схема одной секции приведена на рис.10, внешний вид - рис.11. Напряжение на секции составляет 60 кВ, на отдельном конденсаторе C_0 - 30 кВ. Из-за конструктивных соображений пришлось основную схему включения конденсаторов в секции - два конденсатора последовательно, разбить на 3 идентичных группы по 6 конденсаторов, соединенных последовательно-параллельно (рис.10). Сопротивления $R = 16,5$ Ом снижают величину энергии, выделяющейся в ускорительной трубке при пробоях в ней. Общее количество конденсаторов в секции - 18, во всем накопителе - 630 шт. Вместе с конструктивной емкостью трансформатора, равной 150 пФ, колонна образует требуемую емкость 1300 пФ. Для обеспечения равномерного распределения напряжения между секциями ускорительной трубки и на каждом конденсаторе последние подбирались так, чтобы суммарные емкости каждой тройки были одинаковы.

Несмотря на предварительную отбраковку по уровню ч.р. существует вероятность пробоя отдельных конденсаторов. Рассмотрим процесс, которые происходят в секции при пробое одного конденсатора. Можно различить две стадии процесса: 1. Пробой диэлектрика конденсатора под шайбами (на схеме рис.12 ключи K_1 и K_2 - замкнуты). 2. Отключение одного конденсатора из схемы (ключ K_1 - разомкнут) вследствие того, что диэлектрик разрушается, и между контактными шайбами, зазор которых конструктивно зафиксирован, восстанавливается электрическая прочность. При пробое по телу одного из конденсаторов происходит быстрый разряд двух оставшихся конденсаторов на пробитый с характерной частотой около 5 мГц (по оценкам). Времена разряда обусловлены собственными индуктивностями подводов и емкостями конденсаторов. При пробое в момент максимального напряжения на секции ($U_c = 2U_0$) на (последовательной с пробитой) тройке напряжение будет увеличиваться с величины U_0 до $1,5U_0$ с постоянной времени $\tau = 9/4RC_0$. Общее время заряда ($\sim 5\tau$) составляет $\sim 1,5$ мсек, что много меньше длительности рабочей полуволны напряжения. Предельно возможное перенапряжение на этой тройке, при глухо замкнутой последовательной тройке в рабочем режиме достигает также 1,5 кратного превышения от рабочего.

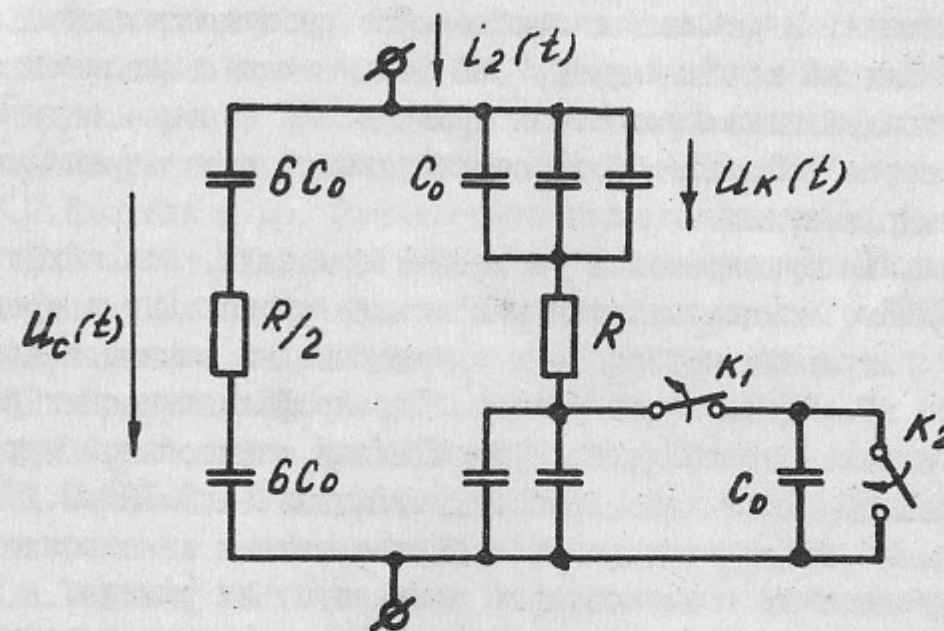


Рис.12.

В случае разрыва между контактными шайбами пробитого конденсатора напряжение на секции вследствие уменьшения емкости возрастет в целом в 1,07 раза, а на двух оставшихся конденсаторах тройки возрастет в 1,3 раза. Необходимо добавить, что экспериментально определенное число импульсов, в процессе которых происходит разрушение диэлектрика и отключение замкнутого конденсатора и, следовательно, число импульсов при которых конденсаторы последовательно присоединенной тройки испытывают наибольшее перенапряжение, составляет обычно 200-300 имп. Для регистрации пробоев конденсаторов в колонне в процессе работы ускорителя разработана методика принципиально аналогичная регистрации ч.р. в отдельном конденсаторе (подобие обеих систем - очевидно). Сигнал с фронтом порядка 10^{-7} сек выделяется на емкостном

делителе высокого напряжения ВЧ-фильтром с частотой среза 5 МГц и фиксируется на осциллографе с памятью.

Надежная работа накопителя возможна при условии, что выход из строя одного конденсатора и связанные с этим перенапряжения на других конденсаторах, не приводят к выходу из строя последних. В указанном выше режиме работы накопителя при напряжении на колонне до 1,7 МВ это условие выполняется. За время эксплуатации накопителя практически не было случаев выхода из строя конденсаторов, обусловленных рассмотренными выше перенапряжениями.

Длительная эксплуатация установки показала, что выход из строя одного конденсатора в накопителе происходит в среднем за 10^6 импульсов при рабочем напряжении на каждом конденсаторе ~ 25 кВ. Цикличность регламентно-профилактических работ на установке определяется сроком жизни электронной пушки, и составляет 500-1000 часов работы установки. ($1,8 \cdot 10^6 + 3 \cdot 10^6$ импульсов). Во время этих работ в случае выхода из строя одного или нескольких конденсаторов происходит их замена.

Как уже упоминалось выше, прямых экспериментов по выяснению динамики старения конденсаторов (изменения уровня ч.р. во времени) не проводилось. Однако по экспериментам на отдельных конденсаторах и в колонне в целом и по опыту ее эксплуатации на этот счет сложились определенные представления. Можно предполагать, что в данном случае в отличие от органических диэлектриков существует достаточно резкая граница в величине напряжения, ниже которой старения практически нет, а выше -- происходит быстрый лавинообразный рост уровня ч.р., заканчивающийся пробоем. Для получения более полной информации необходимы специальные эксперименты.

В заключение отметим, что конструирование высоковольтного накопителя, как и ускорителя ЭЛИТ-3А в целом, проводилось КБ под руководством Г.С.Крайнова. В разработке накопителя и отдельных экспериментах участвовали Б.И.Ястреба, И.И.Глазков и Ю.Г.Бамбуров.

Л и т е р а т у р а :

1. Г.И.Будкер и др. Источник позитронов для накопителя ВЭПП-4. Доклад на У Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1976.
2. С.Б.Вассерман и др. Высоковольтный импульсный генератор электронного пучка ЭЛИТ-3А, препринт ИЯФ 79-III, 1979.
3. С.Б.Вассерман, Трансформатор в высоковольтных ускорителях заряженных частиц. Препринт ИЯФ 77-III, 1977.
4. Г.П.Блохина и др. Электронная промышленность № 4, 1972.
5. Г.П.Блохина и др. Диэлектрики. Межведомственный научный сборник. Из-во Киевского университета, вып.2, 1972.
6. А.А.Авдиенко и др. Промышленные ускорители электронов типа ЭЛВ. Препринт ИЯФ 76-108, Новосибирск, 1976.
7. А.И.Павловский и др. ПТЭ, № 5, 20, 1976.
8. М.Д.Машкевич. Электрические свойства неорганических диэлектриков в диапазоне СВЧ. "Советское радио", Москва, 1969.
9. В.А.Гедзюн, А.И.Семенова. Электронная техника, сер.5, 1972, I (26), 3.
10. Г.С.Кучинский. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л., "Энергия", 1979.
11. В.П.Вдовико. Методы исследования электрического старения твердой и комбинированной изоляции. В кн. Электрофизические проблемы применения твердых и комбинированных диэлектриков в технике высоких напряжений. Новосибирск, Наука, 1974, 94.

Работа поступила - 16 декабря 1980 г.

Ответственный за выпуск - С.Г. Попов
Подписано к печати 22.XII-1980г. МН 13644
Усл. I, I печ.л., 0,9 учетно-изд.л.
Тираж 200 экз. Бесплатно
Заказ № 219.

Отпечатано на ротапинтере ИЯФ СО АН СССР