

50760 5997



ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

ИТЭФ- 84

А.С.АРЕФЬЕВ, В.Г.ГУДКИН, В.А.ЕРГАКОВ,  
В.А.КОРОЛЕВ, В.Н.КОСТРОМИН, И.И.КРЮЧКОВ,  
В.А.ЛАПИКОВ, А.Г.ЛЯПИН, Ю.Н.СЕМЕНОВ,  
Ю.В.ТРЕБУХОВСКИЙ, В.А.ФОМКИН

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ РОТОРНЫЙ  
ГЕНЕРАТОР ЭРГ — 350/3

МОСКВА 1975

---

А.С.Арефьев, В.Г.Гудкин, В.А.Ергаков,  
В.А.Королев, В.Н.Костромин, И.И.Крычков,  
В.А.Лышков, А.Г.Ляпин, Ю.Н.Семенов,  
Ю.В.Требуховский, В.А.Фомкин

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ РОТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР ЭРГ-350/3

Москва 1975

реш. - Приводится конструкция электростатического роторного генератора ЭРГ-350/3 с жестким цилиндрическим ротором и промежуточным возбудителем. Описываются материалы, использованные при создании ЭРГ. Приведены схемы стабилизации генераторов и блока защиты. Генератор работает как источник постоянного напряжения положительной или отрицательной полярности с напряжением до 350 кВ при токе нагрузки до 3 мА.

Формирование относительно чистых пучков вторичных частиц на современных ускорителях с помощью электростатических сепараторов невозможно без использования высокостабильных ( $10^{-3} + 10^{-4}$ ) источников постоянного напряжения отрицательной и положительной полярности с напряжением  $\sim 300$  кВ и током порядка нескольких миллиампер.

Для эффективной и надежной работы таких сепараторов крайне желательно иметь источники, обладающие малой выходной емкостью, позволяющей свести к минимуму разрядные токи между электродами и, следовательно, уменьшить разрушение поверхностного слоя дефлекторов. Кроме того, источники высокого напряжения должны быть нечувствительны к перегрузкам и коротким замыканиям, быстро восстанавливать заданное напряжение после разрядов на нагрузку, иметь относительно небольшие габариты и быть достаточно безопасными в эксплуатации.

Перечисленные требования к источникам являются достаточно общими не только для питания электростатических сепараторов, но и для других физических и промышленных установок (ускорительные трубки, электронные микроскопы, установки электронно-ионной технологии)

Источниками высокого напряжения, наиболее полно удовлетворяющими указанным требованиям, являются в настоящее время электростатические роторные генераторы (ЭРГ). Известно несколько принципиальных схем ЭРГ, разработанных в разных лабораториях [1,2,3,4]. Однако, различие в свойствах используемых в этих приборах изоляционных и полупроводящих материалов, отсутствие теории, позволяющей рассчитать такой источник, и различие в требованиях, предъявляемых к генераторам, делают изготовление ЭРГ-ов на напряжения выше 200 кВ достаточно сложной задачей.

Взяв за основу ЭРГ серии **KS** французской фирмы "**SAMES**" [5], нами на базе отечественных материалов был разработан изготовлен и испытан электростатический роторный генератор на напряжение 350 кВ с номинальным током нагрузки 3 миллиампера, положительной и отрицательной полярности. Генератор ЭРГ-350/3 имеет ряд конструктивных особенностей, позволяющих, по нашему мнению, улучшить эксплуатационные характеристики ЭРГ.

#### Принципиальная схема ЭРГ-350/3 и расчет его основных параметров

Принципиальная схема ЭРГ-350/3 с жестким ротором и диэлектрическим транспортером представлена на рис. I. В принятых габаритах заданные выходные параметры обеспечиваются при двухполюсном исполнении машины. Однако для проведения ряда экспериментов, в первую очередь, для отыскания оптимальных выходных параметров в конструкции предусмотрен вариант четырехполюсного исполнения. Для возбуждения ЭРГ-350/3 может быть использован либо каскадный генератор на

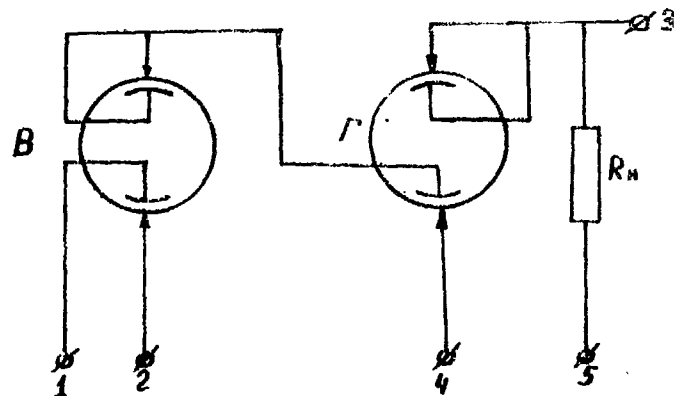


Рис.1. Принципиальная схема двухполюсного ЭРГ-350/3 с промежуточным ЭРГ - возбудителем.

50 кВ, состоящий из высоковольтного трансформатора, схемы выпрямления и умножения напряжения, либо каскадный генератор на напряжение 20-30 кВ с электростатическим возбудителем, представляющим вспомогательный ЭРГ небольших габаритов на напряжение 60-80 кВ.

Промежуточный возбудитель является электростатическим усилителем в схеме генератора. Он обеспечивает более удобную внешнюю характеристику для системы автоматического регулирования выходного напряжения ЭРГа по сравнению с каскадным генератором.

Исходя из этого соображения в ЭРГ-350/3 принята схема с промежуточным возбудителем в двухполюсном исполнении. Возбудитель получает питание от каскадного генератора через зажимы 1 и 2. Зажим 3 служит для съема высокого напряжения. Разъемы 4 и 5 предназначены для подключения схемы стабилизации.

Принцип работы ЭРГ"а: с помощью внешнего источника напряжения на зарядном устройстве между индуктором и ионизатором создается электрическое поле. Заряды, образованные за счет этого поля в зоне ионизатора, наносятся на вращающийся ротор и переносятся к разрядному устройству, состоящему из индуктора и ионизатора, соединенных между собой и с нагрузкой  $R_n$ . Прирост потенциала зарядов, нанесенных на единичную площадку ротора, происходит за счет уменьшения емкости этой площадки относительно земли при перемещении ротора от зарядного устройства к разрядному. Для выравнивания потенциала вдоль ротора служит полупроводящий статор со строго заданными значениями удельных поверхностного и объемного сопротивлений  $\rho_s$  и  $\rho_v$ .

Создание ЭРГ включает в себя решение целого комплекса вопросов, в том числе расчет конструкции, максимально отвечающей физическим принципам; правильный выбор и использование изоляционных материалов; технология изготовления деталей сложной конфигурации из эпоксидных смол, разработка схем управления и стабилизации.

Отсутствие строгой математической теории генераторов приводит

к тому, что расчеты параметров ЭРГ носят приближенный характер и дают только основные данные для конструирования, которые потом уточняются при испытании макета генератора.

Исходными данными для расчета ЭРГ являются номинальный ток нагрузки  $I_n$ , выходное напряжение  $U_n$  и напряжение возбуждения  $U_i$ . Для идеальной машины  $I_n$  равен току короткого замыкания  $I_{к.з.}$ . В действительности  $I_n$  несколько меньше  $I_{к.з.}$ .

В общем случае

$$I_n = K \cdot p \cdot b \cdot v, \text{ где}$$

$K$  - коэффициент, учитывающий плотность тока на транспорте и влияние полей генератора на переносимый ротором заряд, кулон/м<sup>2</sup>

$p$  - число пар полюсов генератора,

$b$  - длина ротора, м.,

$v$  - линейная скорость ротора, м/сек.

Коэффициент  $K$  определен расчетом по экспериментальным данным, полученным на работающих генераторах французской фирмы "SAMES" тип KS-250-7, а также на отечественных ЭРГ-150/08.

В генераторе принята стаканообразная конструкция ротора с соотношением длины его ( $b$ ) к диаметру ( $d$ ):

$$b = 1,5d$$

Тогда основная расчетная формула для диаметра ротора имеет вид:

$$d = \left( \frac{I_n}{K p \frac{b}{1,5}} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,255 \mu$$

при следующих значениях параметров:

$$I_n = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ а}$$

$$K = 23 \cdot 10^{-5} \text{ Кулон/м}^2$$

Исходя из напряжения перекрытия по статору

$$E_z = \frac{\sum U}{\frac{\pi d_c}{2p} - c}, \text{ где}$$

$E_z$  - усредненная напряженность электрического поля по статору, кВ/см



$\Sigma U$  - суммарное напряжение ( $\Sigma U = U_n + U_0$ ), прикладываемое к статору, кв.

$C$  - ширина ламели (размер индуктора), см,

$d_c$  - диаметр статора, см.

Принимая  $E_T = 12$  кв/см,  $d_c = 24,9$  см,  $p = 1$ ,  $C = 3$  см, получим

$$\Sigma U = 430 \text{ кв}$$

Основные расчетные параметры ЭРГ:

диаметр ротора 255 мм,

длина ротора 380 мм,

диаметр статора 248,5 мм,

длина статора 350 мм,

скорость вращения ротора 3000 об/мин.

Напряжение возбуждения ЭРГ, требуемое для получения  $U_n$ , оценивалось из соотношения

$$U_1 = 2E_n \left( d_1 + \frac{d_2}{\epsilon} \right) + 2U_0,$$

где

$E_n$  - напряженность электрического поля в зазоре между транспортером и индуктором зарядного полюса,

$d_1$  - величина зазора между ротором и статором,

$d_2$  - толщина стенки ротора,

$\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость материала ротора,

$U_0$  - остаточное напряжение, необходимое для ионизации газа.

Толщина стенки ротора должна быть минимальной, чтобы уменьшить напряжение возбуждения генератора. В то же время эта величина должна обеспечить достаточную механическую жесткость ротора, чтобы центробежные силы при вращении ротора не вызвали его деформации.

В расчетном случае принято  $d_1 = 0,5$  мм,  $d_2 = 3$  мм,  $\epsilon = 4,5$ ,

$E_n = 18,6$  кв/мм, соответствующее плотности 50 ед.СГС. Для зазора 0,25 мм, давления в генераторе 15 атм водорода и толщине лезвия

ионизатора 0,03 мм величина  $2U_0 \approx 10$  кВ и отсюда напряжение возбуждения  $U_1 \approx 44$  кВ, что является величиной вполне допустимой.

### Блок-схема ЭРГ-350/3

На рис.2 приведена блок-схема высоковольтного источника напряжения ЭРГ 350/3. На общей платформе размещен бак высокого давления, внутри которого находится собственно генератор в атмосфере водорода при давлении 15 атм. Генератор выполнен в двух вариантах - с внутренним возбудителем, находящемся на одной оси с основным генератором и (второй вариант) - с выносным возбудителем - промышленным ЭРГ-80/0,35, смонтированным в блоке стабилизации и защиты генератора. На той же платформе размещается стойка с блоками электроники и управления ЭРГ. Дистанционный пульт управления позволяет работать с генератором на расстоянии до 200 метров.

Блок емкостного делителя (рис.23), являющийся элементом схемы стабилизации генератора, выделен в отдельную конструкцию открытого типа и соединяется с баком ЭРГ неэкранированным высоковольтным кабелем и низковольтными цепями управления. Конструктивно блок емкостного делителя, включает в себя:

- а) емкость  $C_{\Sigma} = 200$  пФ выполненного в виде отрезка кабеля типа КПВ-300,
- б) емкость  $C_r =$  пФ, состоящую из четырех последовательно соединенных конденсаторов типа ИМ 110х0,011, ( $C_r = 2750$  пФ)
- в) ограничивающее сопротивление  $R_{с4} = 1,5 \text{ мом}$
- г) электростатические экраны, к которым крепятся кабели от ЭРГа и нагрузки.

### Конструкция ЭРГ

На рис.4 представлена конструкция ЭРГ-350/3. В атмосфере сжатого газа (водород) при давлении 15-17 атм кроме генератора и промежуточного возбудителя размещен асинхронный двигатель 1 типа

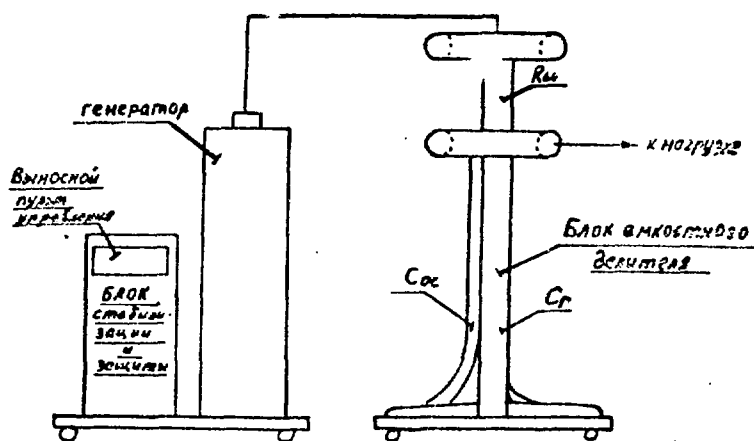


Рис.2. Блок схема ЗРТ-350/3.

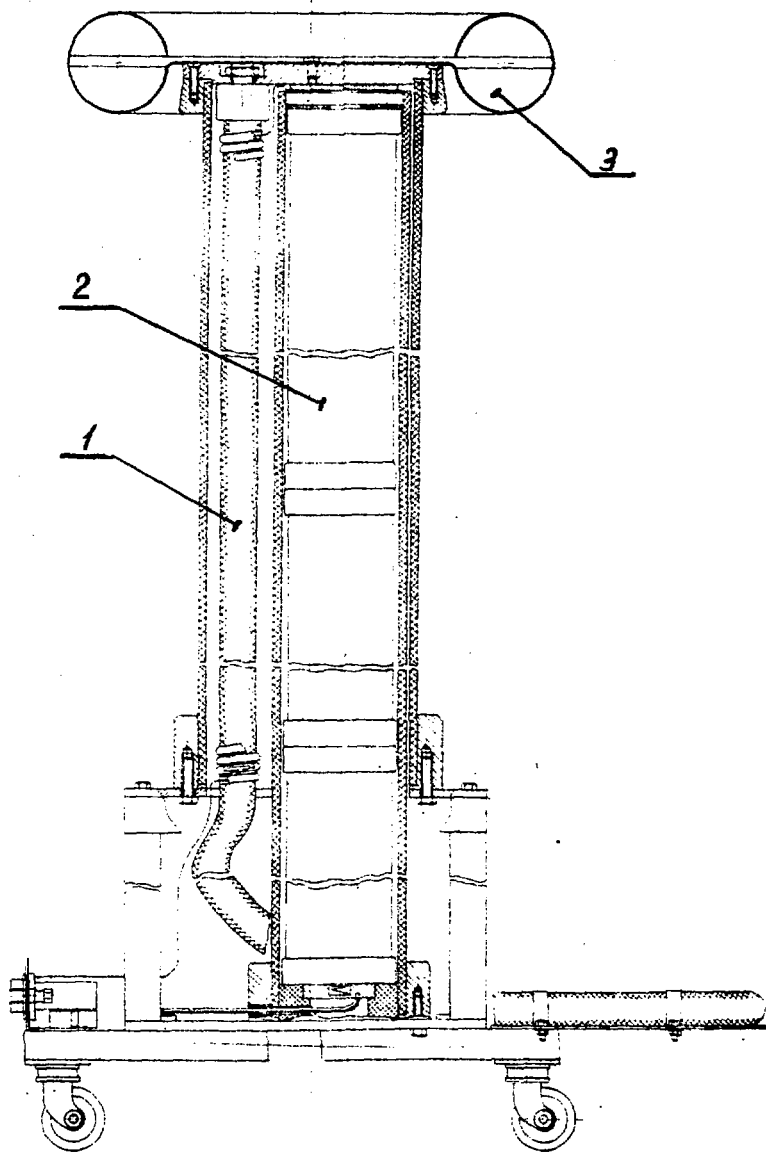


Рис.3. Блок емкостного делителя

- 1. Кабель КПВ-300
- 2. Конденсатор ИМ110х0,011
- 3. Электростатический экран

АОМ-2-32-2 - привод генератора, а также высоковольтное плечо делителя напряжения. Основным элементом генератора является цилиндрический транспортер зарядов - ротор 2, выполненный из эпоксидного компаунда. Ротор имеет вид тонкостенного стакана, в нижней его части находится ротор промежуточного возбуждителя 3, который составляет одно целое с ротором генератора. Ротор приводится во вращение с постоянной линейной скоростью  $v = 39$  м/сек.

Статор 4 предназначен для выравнивания электрического поля между полюсами генератора и представляет собой стеклянный цилиндр с объемным сопротивлением  $R_v \sim 3 \cdot 10^{10}$  ом см, на внутреннюю поверхность которого нанесены проводящие индукторы 5 с укрепленными на них контактными дисками. Вся внутренняя поверхность цилиндра залита эластичным компаундом [6]. Такая конструкция полностью исключает возникновение механических напряжений в слабо проводящем цилиндре. Зазор между стеклянным цилиндром и изоляционной основой статора с сохранением необходимой электрической прочности выполнен без заполнения специальными битумами. Статор промежуточного возбуждителя 6 расположен в днище изоляционного каркаса основного генератора [7,8].

Высоковольтное плечо делителя напряжения 7 представляет собой цилиндрическое основание, выполненное из эпоксидного компаунда, на котором по спирали расположены соединенные последовательно высоковольтные резисторы из литого микропровода типа С-5-24. (В опытном экземпляре генератора делитель собран из резисторов типа МЛТ). После установки сопротивлений делитель заливается эпоксидным компаундом. Вывод высокого напряжения из бака осуществляется проходным изолятором 8. В днище бака расположены проходные изоляторы 9 для питания электродвигателя и вводы напряжения возбуждения. Отвод тепла от двигателя генератора осуществляется радиатором спирального типа с проточной водой через медный змеевик 10, расположенный вокруг двигателя.

Величина напряжения возбуждения в значительной мере определяется качеством ионизатора. В конструкции ЭРГ-350/3 ионизатор II изготовлен из тонкой стальной ленты, выступающей над поверхностью щеткодержателя на 3 мм. Заточка выступающего края ионизатора до 5-10 мк значительно улучшает условия образования коронного разряда в генераторе и на 4-6 кВ снижает напряжение возбуждения. Большое влияние на величину  $U_1$  имеет зазор между ионизатором и ротором. Установлено, что увеличение зазора на 0,15 мм от  $d$  приводит к повышению напряжения возбуждения в среднем на 3,5-4 кВ.

#### Выбор материалов для ЭРГ

Проблема изоляционных материалов для ЭРГ-ов вследствие своеобразия электрофизических процессов, протекающих в генераторе, является более сложной, чем в других высоковольтных установках. Используемые материалы должны быть устойчивыми к действию искрового, коронного и тлеющего разрядов, выдерживать большие механические нагрузки и сохранять в процессе работы геометрические размеры с достаточной точностью.

В первую очередь эти требования относятся к материалу ротора и статора, которые являются наиболее ответственными деталями ЭРГа.

Самым подходящим материалом, используемым при изготовлении деталей ЭРГ'а, являются пластмассы на основе эпоксидных смол. Высокие изоляционные и механические свойства, незначительная усадка, сохранение основных характеристик при повышенных температурах, хорошие литевые качества эпоксидных компаундов позволяют получать сложные узлы и детали самого разнообразного профиля и назначения.

В таблице I приведены составы эпоксидных компаундов и режимы отверждения, примененные при изготовлении ЭРГ-350/3 /9/.

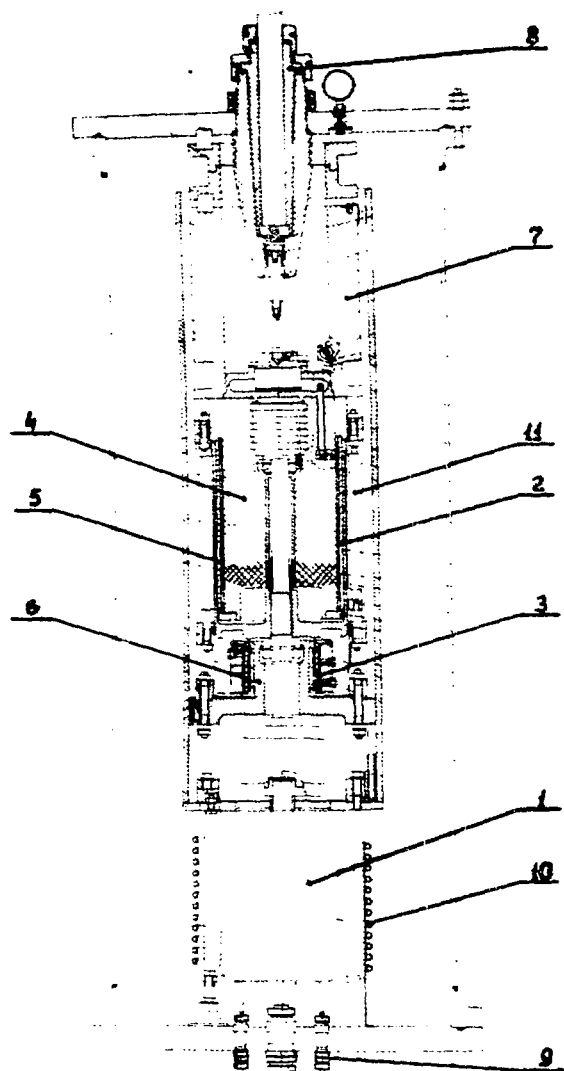


Рис.4. Чертеж двухполюсного генератора ЗРТ-350/3

I - асинхронный двигатель, 2 - ротор генератора, 3 - ротор возбудителя, 4 - статор, 5 - индуктор, 6 - статор возбудителя, 7 - высоковольтное плечо делителя напряжения, 8 - высоковольтный вывод, 9 - низковольтные выводы напряжения, 10 - змеевик водяного охлаждения, II - монитор.

Таблица I

№ компаунда	Наименование компонента	Весовой состав, в. ч.	Режим отверждения	
			t°C	час
1	ЭД-6	100	120	4
	ДЭГ-1	20	140	4
	Тальк	100	160	2
	МТГА	3,86К		
2	ЭД	100	120	3
	Тальк	80	140	3
	SiO <sub>2</sub>	50	160	3
	Эндик-ангидрид	3,81К	180	12
3	ЭД	100	120	3
	Тальк	80	140	3
	SiO <sub>2</sub>	50	160	3
	МТГА	3,86К	180	12

Примечание: 1. К-эпоксидное число смолы данной партии

2. МТГА - метилтетрагидрофталевый ангидрид.

3. Режимы отверждения даны для плоских образцов.

В случае изготовления крупногабаритных деталей температурный режим должен быть изменен в сторону меньших температур во избежание растрескивания отливок.



В таблице 2 приведены механические и электрические свойства компаундов, состав которых приведен в таблице 1:

Таблица 2

№ п/п	Наименование характеристик	№2 компаундов по таблице 1		
		1	2	3
1.	Удельное объемное сопротивление, ом см.	$10^{15}$	$10^{15}$	$10^{16}$
2.	Удельное поверхностное сопротивление, ом	$10^{13}$ - $10^{14}$	$10^{14}$	$10^{15}$
3.	Электрическая прочность, кв/мм	22	16-20	20
4.	Предел прочности на изгиб, кг/см <sup>2</sup>	1000	1200	900
5.	Предел прочности на сжатие, кг/см <sup>2</sup>	1700	2200	1800
6.	Теплостойкость по Мартенсу $t^{\circ}\text{C}$	90	180	160
7.	Усадка при отверждении, %	0,9-1,0	0,6-0,8	0,8-1,0
8.	Тангенс угла диэлектрических потерь, $\tan \delta = 1 \text{ мГц}$	-	$4 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$
9.	Диэлектрическая проницаемость при $f = 1 \text{ мГц}$	4,5	4,2	4,1

Для изготовления ротора ЭРГ использовался состав № 2 или № 3. В техническом отношении более удобным оказался состав № 3 хотя механические характеристики этого компаунда несколько ниже, чем у № 2.

Не менее важным элементом генератора является статор. Он состоит из полупроводящего стеклянного цилиндра и каркаса, который используется как несущая конструкция. Так как к статору предъявляются те же требования, что и к ротору, то, исходя из унификации исходных материалов, каркас статора изготавливается из компаунда № 2 или № 3.

Для герметизации промежутка стекло-статор использован эластичный компаунд состава:

ПДИ - ЗАК - 100 в.ч.

ДЭГ - I - 20 в.ч.

Отвердитель ММФ - 20 в.ч.

Режим отвержения  $80^{\circ}\text{C}$  в течение 10 часов. Заливка промешутка производится под вакуумом в специальной форме. Для изготовления индукторов использовался коллоидный раствор графита в воде.

Остальные изоляционные детали ЭРТ-350/3 (корпус генератора, вводы напряжения, каркас делителя и др.) изготовлены из эпоксидного компаунда № I.

#### Стабилизация генератора и схема защиты

На рис.5 приведена блок-схема электронной стабилизации и защиты ЭРТ-350/3 отрицательной полярности, обеспечивающая высокую степень стабильности выходного напряжения генератора ( $\sim 10^{-4}$ ) и защиту от перенапряжений на нагрузке. Возбуждение ЭРТ двухступенчатое, последовательное. Первая ступень - каскадный умножитель напряжения КУ (+24 кВ) служит для возбуждения второй ступени - генератора-возбудителя В и питания анодных цепей высоковольтных триодов в усилителях обратной связи  $У_1$  и  $У_2$ .

В схему введена стабилизация возбудителя В, состоящая из измерительной части (в нее входит  $R_{осв}$  и катодный повторитель КП) и усилителя  $У_1$ . Выходное напряжение В корректируется катодным повторителем в зависимости от нагрузки основного генератора. Это дополнительная стабилизирующая связь выхода генератора с его возбуждением.

Основная схема стабилизации ЭРТ-350/3 состоит из измерительной части (высоковольтный делитель  $R_{осг}$ ,  $R_{60}$ , низковольтного источника эталонного напряжения - ИЭН) и усилительной схемы  $У_2$ . На вход усилительного устройства  $У_2$  через соответствующие делители подаются потенциалы с эталонного источника и с выходного напряжения ЭРТ. Разность этих напряжений усилителем  $У_2$  преобразуется в изменение напряжения возбуждения, корректирующее выходное напряжение генератора.

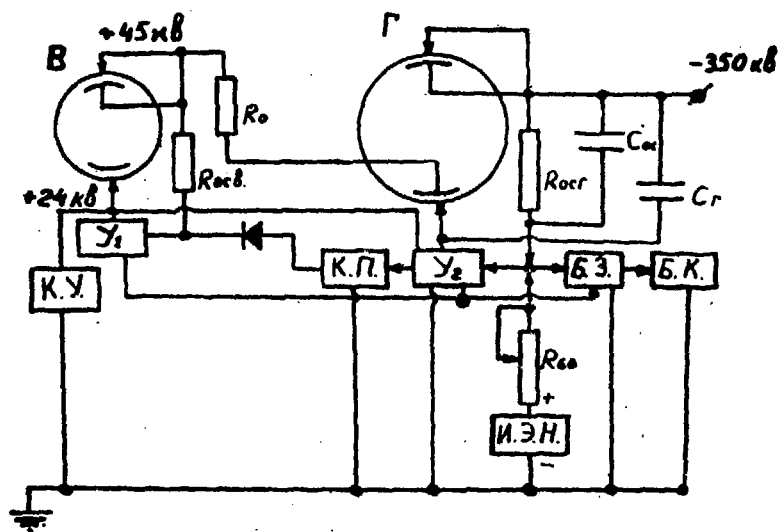


Рис.5. Блок-схема электронной стабилизации и защиты ЗРГ-350/3.

Для удобства эксплуатации ЭРТ в схеме предусмотрен блок защиты БЗ, состоящий из двух элементов. Первый — временная выдержка генератора после его включения — предотвращает включение ЭРТ в рабочий режим до прогрева электронных ламп. Второй — отключает генератор при пробоях на внешней нагрузке и при превышении номинальной нагрузки. Сигналы управления на БЗ поступают с  $У_1$  и  $У_2$ . Блок защиты управляет блоком коммутации БК питания каскадного умножителя КУ и электродвигателей ЭРТ-ов.

На рис. 6 и 7 представлены принципиальные схемы стабилизации и управления ЭРТ-350/3 отрицательной и положительной полярности соответственно.

При изготовлении измерительного блока важное значение имеет сведение к минимуму флуктуаций в отдельных узлах его цепей. При напряжениях на выходе ЭРТ свыше 50 киловольт эти флуктуации возникают не только за счёт термической нестабильности отдельных элементов цепи, но также за счёт коронирования на частях генератора, находящихся под высоким напряжением. В связи с этим высоковольтное плечо делителя напряжения  $R_{осг}$  размещено непосредственно в баке давления генератора.

Источники эталонного напряжения собраны на лампах  $\Lambda_{18}-\Lambda_{22}$  (отрицательная полярность) и на лампах  $\Pi_{23,24,26,27,28}$  (положительная полярность).

Для обеспечения лучшей стабильности ИЭН выпрямители этих источников питаются от феррорезонансных стабилизаторов, что позволяет поддерживать эталонное напряжение с точностью  $5 \cdot 10^{-5}$  при 5% колебании напряжения сети.

Для ЭРТ отрицательной полярности усилитель  $У_2$  состоит из трёх каскадов: усилителя с катодной связью на пентодах 6Х5П





( $\Pi_{14}\Pi_{15}$ ), усилителя на пентоде 6Ж5П ( $\Pi_{10}$ ) и двух проходных триодов на общий номинальный ток генератора 4 миллиампера. Потенциалы управляющих сеток и катодов ламп  $\Pi_5$   $\Pi_6$   $\Pi_{10}$   $\Pi_{14}$   $\Pi_{15}$  фиксируются делителем, составленным из газовых стабилитронов  $\Pi_9$   $\Pi_{11}$ , уменьшающих флуктуации напряжения питания и поддерживающих коэффициент усиления каждого каскада на необходимом уровне.

Более сложен усилитель  $У_2$  для ЭРГ положительной полярности (см. рис. 6). Он состоит из четырех каскадов: усилителя с катодной связью на пентодах 3Ж5П ( $\Pi_8$   $\Pi_{19}$ ), усилителя на пентоде 6Ж5П ( $\Pi_{15}$ ), усилителя на лампе ГП-5 ( $\Pi_{11}$ ) и проходных триодов ( $\Pi_6$   $\Pi_7$ ), которые смещены в область высоких отрицательных напряжений при помощи цепей, состоящих из источника напряжения - 12 кв, резисторов  $R_{12}$ ,  $R_{20}$ , стабилитрона  $\Pi_{10}$  (СТ307К), резистора  $R_{21}$  и источника напряжения +24 кв. Изменение тока в этой цепи приводит к изменению проводимости ламп  $\Pi_6$   $\Pi_7$  за счёт падения напряжения на резисторе  $R_{20}$ . Потенциалы сеток и катодов ламп стабилизированы делителем из газовых стабилитронов  $\Pi_{20}$   $\Pi_{21}$ . В силу того, что механически весьма трудно выдержать все геометрические размеры в рабочем зазоре ЭРГа (овальность ротора, несоосность ротора и статора и т.д.) ток ЭРГ-350/3 содержит низкочастотную переменную составляющую, которая при заданной скорости вращения ротора остается неизменной для любого режима генератора, т.е. не зависит от выходного напряжения.

Так как коэффициент усиления цепи обратной связи генератора  $\sim 10^6$ , то переменная составляющая сглаживается ёмкостью

$C_r \sim 2750$  пф. Необходимой является ёмкость  $C_{ос}$ , включенная параллельно  $R_{ос}$ , величина которой  $\sim 200$  пф много больше паразитной ёмкости высоковольтного плеча делителя напряжений. В то же время эта ёмкость не должна запасать значительного количества энергии.

Блок защиты включает в себя усилитель с катодной связью на двойном триоде 6Н3П ( $\Pi_{13}$ ) с фиксированным потенциалом катода ( $\Pi_{15}$  - СГ16П), электронное реле на тиратроне с холодным катодом МТХ-90 ( $\Pi_1$ ), исполнительное реле  $P_1$  и цепи управления тиратроном. Контроль за выдержкой при прогреве ламп осуществляется индикатором ИЗ.

При работе с генератором после нажатия кнопки "пуск" подается напряжение на выпрямительные схемы стабилизации и включаются двигатели ЭРГ. Через 5 секунд после включения за счёт прогрева  $\Pi_{16}$  на цепочку  $P_1 R_4 R_3 R_2 R_1$  подается потенциал + 145 вольт, загорается тиратрон и срабатывает реле  $P_1$ , отключая каскадный умножитель и двигатель ЭРГ (контакт  $P_1^2$ ). По окончании времени выдержки контакты реле  $P_2^4$  шунтируют резисторы  $R_1 R_2$  и гасят тиратрон. Ток через обмотку реле  $P_1$  не меняется и контакты НР остаются замкнутыми. Вторичным нажатием кнопки "пуск" обмотка реле  $P_1$  закорачивается, замыкаются контакты ИЗ, цепочка  $R_1 + R_4$  восстанавливается и схема защиты готова к работе.

При перенапряжениях на внешней нагрузке генератора сигнал перенапряжения усиливается лампой  $\Pi_{15}$  и зажигается тиратрон  $\Pi_1$ , который отключает ЭРГ. Тиратрон срабатывает также при превышении тока на нагрузке выше заданного, величина которого подбирается потенциометром  $R_{46}$ . Реле защиты реагирует и на неполадки в схеме стабилизации возбуждителя (см. цепочку  $D_5 R_5 R_{13}$ ). Схема защиты выполнена таким образом, что включение генератора и подъём напряжения возможен только в том случае, если потенциометр  $R_{60}$ , регулирующий выходное напряжение ЭРГа, находится в положении минимума.

Совместная работа возбуждителя и генератора осуществляет по следующей схеме: При крайне левом положении  $R_{60}$  проходные



триоды  $\Lambda_5$   $\Lambda_6$  заперты, разность потенциалов в зазоре между индуктором и ионизатором не превышает 3 кв и коронный разряд между ними не возникает. Триод  $\Lambda_2$  приоткрыт настолько, что напряжение на выходе возбуждателя не больше 28 кв. Вращение потенциометра  $R_{60}$  уменьшает отрицательное смещение на сетках ламп  $\Lambda_5$   $\Lambda_6$  и напряжение на анодах этих ламп падает с 24 до 10 кв. Между индуктором и ионизатором ЭРТ разность потенциалов увеличивается до 18 кв, закрывается коронный разряд, в результате которого на выходе генератора появляется напряжение  $\sim 2$  кв. При дальнейшем открывании триодов  $\Lambda_5$   $\Lambda_6$  ток коронного разряда увеличивается и соответственно растёт выходное напряжение ЭРТ. В зависимости от величины внешней нагрузки генератора напряжение возбуждения корректируется катодным повторителем  $\Lambda_4$  в диапазоне от 28 до 45 кв.

#### Нагрузочные характеристики генератора

На рис.8 и 9 приведены типовые основные рабочие характеристики генератора ЭРТ-350/3. Зависимость тока короткого замыкания  $I_{кз}$  от напряжения возбуждения  $U_I$ , при давлении в баке 12 атм водорода (характеристика короткого замыкания) и одна из внешних нагрузочных характеристик (зависимость выходного напряжения  $U_n$  от тока нагрузки  $I_n$ ). Область выходных напряжений генератора выше 350 кв не исследовалась. Стабильность выходного напряжения изучалась с помощью измерителя нестабильности типа В8-3. В длительном режиме генератор позволяет надежно работать с напряжением до 350 кв (точность плавной регулировки выходного напряжения 250 вольт) при токах нагрузки до 3 ма. Нестабильность выходного напряжения (с высоковольтным плечом делителя напряжения, собранным из резисторов, типа МЛТ) оказалось равной  $1 \cdot 10^{-3}$ . Использование высокостабильных проволочных резисторов типа С5-24 позволяет в дальнейшем обеспечить длительную нестабильность выходного напряжения генератора на уровне  $\sim 10^{-4}$ .

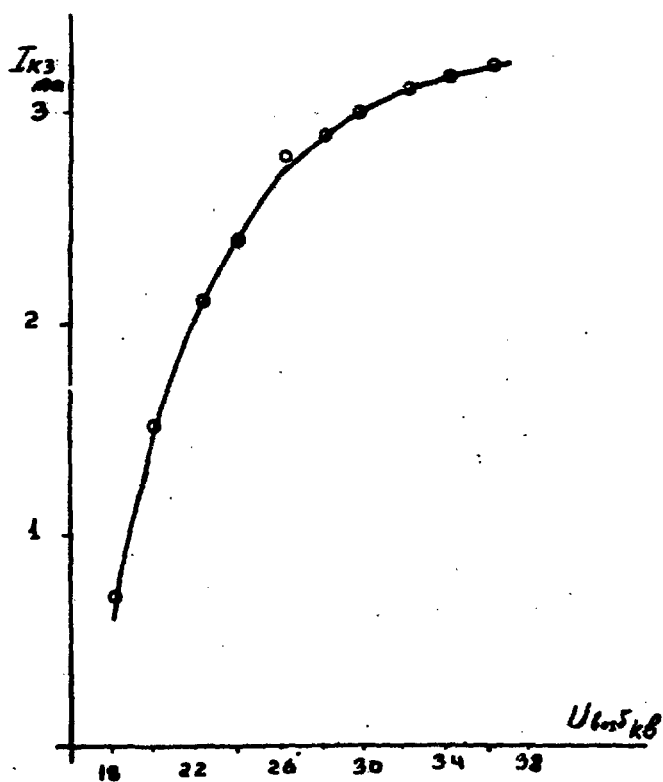


Рис. 8. Характеристика короткого замыкания ЭРГ-350 при давлении 12 атм водорода.

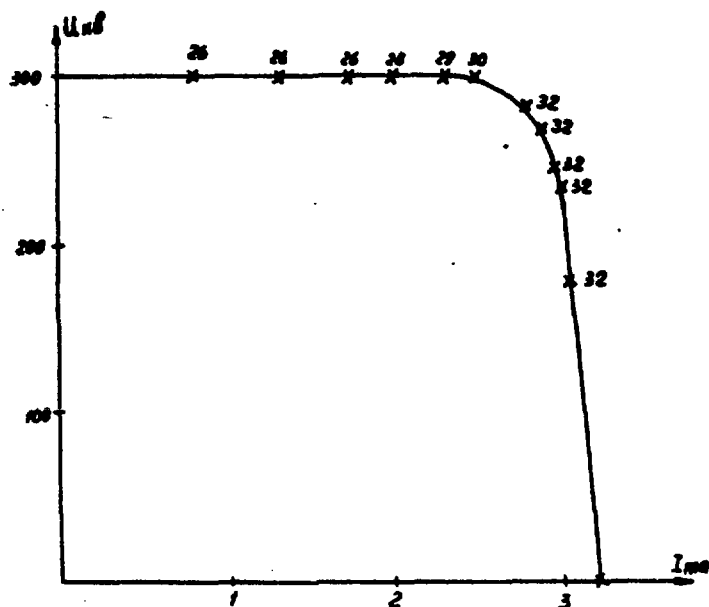


Рис. 9. Внешняя нагрузочная характеристика генератора ЗРГ-350 при  $R=12$  ати (водород). Цифры над точками - напряжение возбуждения.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ф е л и с и Н.И. Электростатический генератор с вращающимся цилиндром и водородной изоляцией. "Атомная энергия", 1961, II, № 2, с.140-152.
2. К а л г а н о в А.Ф. Электростатические генераторы как источники высокого напряжения в ускорителях прямого действия (обзор). В сб. "Электронные ускорители", Томск, 1961, с.30.
3. К а л г а н о в А.Ф. и др. Самовозбуждающийся роторный ЭСГ с заданной полярностью выходного напряжения. ПТЭ, 1951, № I, с.142-144.
4. Л е в и т о в В.И., Л я п и н А.Г. Электростатические генераторы с жестким ротором, ч.2. М., 1965.
5. Каталог фирмы " SAMES " Engineering , 1960, 4, № II, с.603.
6. Г у д к и н В.Г., О л е й н и к А.А.,  
С е м е н о в Ю.Н. Авторское свидетельство на изобретение № 266912 Оф."Бюлл.ОИПТЗ", 1970, № 12.
7. С е м е н о в Ю.Н. Авторское свидетельство на изобретение № 202290 Оф."Бюлл.ОИПТЗ", 1967, № 19.
8. В о р о н и н В.М., Г у д к и н В.Г.,  
С е м е н о в Ю.Н., Ш е р ш к о в В.И. Электростатический роторный генератор с промежуточным возбудителем. "Электронная техника", 1969, вып.4, 29. Серия "Технология и организация производства".
9. Г у д к и н В.Г., М а с е н ж а н а я Н.И.,  
Т е р е щ е н к о И.В. Применение эпоксидных компаундов в конструировании роторных электростатических генераторов. "Электронная техника", 1969, вып.4, 29. Серия "Технология и организация производства".

Работа поступила в ОНТИ 2/УІ-75г.

---

Подписано к печати І4/УІІ-75г. Т - І3ІІ6. Печ. л. І,75.  
Формат 70 x 108 І/І6. Тираж 300 экз. Заказ 84. Цена І0 коп.

---

Отдел научно-технической информации ИТЭФ, ІІ7259, Москва

Цена 10 коп.