

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна.

13 - 4946



Л.Г. Макаров

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

РОТОРНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ  
С ТРАНСПОРТЕРОМ-ДИЭЛЕКТРИКОМ

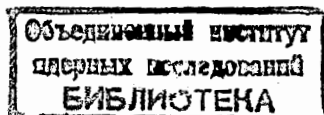
1970

13 - 4946

Л.Г. Макаров

**РОТОРНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ  
С ТРАНСПОРТЕРОМ-ДИЭЛЕКТРИКОМ**

(Некоторые характеристики и краткое описание  
конструкций трех моделей генераторов )



## Вступление

Роторные электростатические генераторы (РЭГи) находят широкое применение в качестве удобных источников высокого напряжения при проведении физических экспериментов с заряженными частицами и в некоторых технологических процессах в промышленном производстве. От таких источников питают ускорительные трубки, электростатические сепараторы, различные поворотные пластины, а в промышленности – в частности, установки электростатической покраски.

Электростатические генераторы являются древнейшими машинами по преобразованию механической энергии в электрическую. Пока это единственный известный тип машины, которая может выдавать "чистый" постоянный ток. Однако до настоящего времени не имеется простой и общепризнанной теории РЭГов, которая смогла бы объяснить все явления, происходящие в них. Указанное обстоятельство сдерживает разработку и серийное изготовление генераторов промышленностью. В ряде научных учреждений Союза и за рубежом ведутся их разработки и изготавливаются единичные модели, исходя из конкретных нужд и возможностей.

В настоящем сообщении в краткой форме изложены некоторые материалы по устройству трех моделей роторных электростатических генераторов, которые разработаны и изготовлены в ЛВЭ ОИЯИ, и приведены некоторые их характеристики.

## Устройство генераторов

Принципиальная схема двухполюсного РЭГа с переносчиком зарядов (ротором) из диэлектрика показана на рис. 1. Внешний источник напряжения (источник возбуждения) (9) на зарядном устройстве между индуктором (11) и заземленным ионизатором (10) создает электрическое поле.

Заряды, образовавшиеся за счет этого поля в зоне ионизатора (10), наносятся на вращающийся ротор (1) и переносятся последним к разрядному устройству. Разрядное устройство состоит из индуктора (3) и ионизатора (4), которые соединены между собой и с нагрузкой. Прирост потенциала зарядов, нанесенных на единичную площадку ротора, происходит в результате уменьшения емкости этой единичной площадки относительно земли при перемещении ротора от точки 10 к точке 4. В зоне ионизатора (4) заряды, перенесенные ротором и получившие прирост потенциала, нейтрализуются за счет зарядов обратного знака, прошедших через нагрузку. В данном случае нагрузка состоит из двух делителей и конденсаторной батареи. Сопротивление (5) служит для измерения выходного напряжения и снятия сигнала для системы стабилизации (8), а сопротивление (6) выполняет роль предполагаемого потребителя. Конденсаторная батарея (7) предназначена для сглаживания медленных колебаний выходного напряжения. Для выравнивания потенциала вдоль ротора служит статор (2).

По конструктивному виду ротора модели генераторов разделены на 2 вида: типа РЭГ-Д (ротор имеет форму диска) и типа РЭГ-Ц (ротор имеет форму цилиндра). Конструкция РЭГ-Д-125 показана на рис. 2. Станина генератора (7) выполнена из оргстекла и крепится к металлическому поддону, который является частью бака. Бак, в который заключен генератор, герметически закрывается крышкой (4). На крышке крепятся ввод напряжения возбуждения (3) и кабельный вывод высокого напряжения (1). Ротор (6) жестко закреплен на стальном валу (2) и приводится во вращение в подшипниках качения посредством эластичной муфты (12) электродвигателем (10). Статор (5) крепится к станине генератора четырьмя

шпильками из текстолита. Зарядное устройство (ионизатор (8), индуктор (8а)) и разрядное устройство (ионизатор (14), индуктор (14а)) вставлены в пазы в станине и закреплены в них. Ионизаторы обоих устройств имеют винты, которые позволяют регулировать положение ионизаторов относительно плоскости ротора. Заполнение бака газом и контроль за давлением осуществляется через газоподвод (13). Напряжение для электродвигателя подается через ввод (9), а охлаждается двигатель притоком воды через медный змеевик (11).

На рис. 3 схематически показана конструкция генератора с ротором в виде цилиндра - модель РЭГ-Ц-300.

Основным рабочим органом РЭГов является ротор. Роторы изготовлены по специальной технологии из стеклохолста на эпоксидной основе. Такие роторы отличаются высокой прочностью при сравнительно небольшой их толщине и малом весе. Относительный коэффициент диэлектрической проницаемости материала ротора равен приблизительно шести единицам. Во всех моделях генераторов использованы типовые асинхронные электродвигатели. Некоторые конструктивные и электрические характеристики РЭГов сведены в таблицу.

### Снятие характеристик

Снятие характеристик короткого замыкания (к.з.) и нагрузочных характеристик РЭГов производилось согласно схеме рис. 1. При методе к.з. использованы приборы, указанные на рис. 1:

- а)  $I_3$  - амперметр для замера тока, поступающего в генератор,
- б)  $I_B$  - амперметр для замера тока в цепи возбуждения,
- в)  $I_r$  - амперметр для замера выходного тока генератора,
- г)  $кв_1$  - вольтметр для замера напряжения возбуждения.

При снятии нагрузочных характеристик к делителю (5) подключался вольтметр  $кв_2$ , по которому определялось выходное напряжение генератора  $U_2$ . Сопротивление (6), конденсаторы (7) и система стабилизации (8) на время испытаний отключались. При снятии характеристик к.з. отключалось также сопротивление (5), а амперметр  $I_r$  подключался непосредственно к высоковольтному выводу.

На рис. 4 приведены характеристики к.э. РЭГ-Д-125 в зависимости от напряжения возбуждения ( $U_1$ ) при давлении в баке азота 5 и 8 атм. На этом же рисунке показана нагрузочная характеристика при давлении азота 8 атм. По кривым 1, 2 и 3 рис. 4 видно, что генератор (ротор) при некотором напряжении возбуждения (при давлении азота 5 атм,  $U_1 = 28$  кв) "насыщается", т.е. при дальнейшем увеличении  $U_1$  ток  $I_3$  продолжает расти, а ток  $I_Г$  после некоторого незначительного спада остается постоянным. Ток  $I_В$  в данном случае есть разница между током  $I_3$  и током  $I_Г$ . До момента "насыщения" ротора визуально наблюдаются коронирующие полосы только со стороны ионизаторов. После начала "насыщения" появляются слабые коронирующие полосы, которые увеличиваются с увеличением напряжения возбуждения со стороны индуктора. Порог "насыщения" ротора зависит от величины давления газа. Это подтверждается кривой 3 рис. 4. При давлении азота 8 атм и при полном возможном  $U_1 = 40$  кв ток  $I_В$  отсутствовал.

При выходном напряжении  $U_2 = 142$  кв между зарядным и разрядным устройством на поверхности ротора возникают разряды. Это указывает, очевидно, на то, что статер работает не вполне удовлетворительно.  $U_2 = 142$  кв следует считать предельным напряжением для РЭГ-Д-125 при давлении азота 8 атм. Рабочее напряжение для модели РЭГ-125 принято равным 125 кв.

На рис. 5 даны характеристики модели генератора РЭГ-Д-300 при давлении 8 атм в зависимости от  $U_1$ . В РЭГ-Д-300 при давлении азота ниже 3 атм также проявляется "насыщение ротора".

На рис. 6 приведены характеристики генераторов РЭГ-Ц-300 в зависимости от  $U_1$  при давлении азота в баке генератора 8 атм.

В РЭГах наблюдается некоторое явление, именуемое "реакцией якоря". "Реакция якоря" проявляется в том, что существует несовпадение величины тока  $I_Г$ , снятого при методе к.э., с током генератора, замеренным при нагрузке, для одной и той же величины  $U_1$ . Наличие "реакции якоря" обусловлено появлением паразитных емкостей с ростом  $U_2$  и, возможно, другими обстоятельствами.

Модели РЭГов испытаны при заполнении баков сухим газообразным азотом и сухим воздухом. Явно уловимых различий в характеристиках к.э. при воздушном и азотном заполнении не обнаружено. Однако азотное заполнение предпочтительнее. Ионы азота более подвижны, чем ионы воздуха, и азот менее агрессивен по сравнению с воздухом. На рис. 7 показан общий вид генератора модели РЭГ-Д-300.

### Заключение

1. Метод получения постоянного тока высокого напряжения с помощью РЭГов имеет ряд преимуществ по сравнению с другими известными методами. Эти преимущества следующие:

а) сравнительно небольшие материальные затраты на изготовление генераторов из широкодоступных материалов;

б) возможность получения высокого выходного напряжения с хорошей стабилизацией (не хуже 0,1%) при небольших габаритах генератора;

в) высокая транспортабельность генератора;

г) надежность, безопасность и простота эксплуатации генератора.

2. Из краткого анализа характеристик к.э. и нагрузочных характеристик следует, что для увеличения выходных параметров генератора ( $I_Г$ ,  $U_2$ ) необходимо увеличивать "активную" поверхность ротора.

Описанные генераторы в основном предназначены для работы на емкостную нагрузку. Поэтому рабочие токи и развиваемые генератором мощности малы. Если с генератора снимается мощность больше предельной, то это приводит к появлению разрядов по ротору. Подъем напряжения с 2-3 - часовой тренировкой уменьшает количество таких пробоев и позволяет несколько увеличить выходную мощность по сравнению с указанной в таблице.

3. Разработанные и изготовленные в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ модели РЭГов имеют ряд конструктивных отличий от подобных известных устройств:



а) общая компоновка узлов генератора такова, что он имеет малые габариты. Генераторы заполняются наименее опасным и наиболее доступным газом — азотом при давлении 7–8 ати. Это обстоятельство значительно упростило конструкцию бака генератора и привело к уменьшению общих затрат металла;

б) подбор материалов и конструкция ротора, который сочетает в себе удовлетворительные диэлектрические, механические и термические свойства, позволяет обеспечить при сравнительно простой технологии его изготовления достаточный для развития высоких напряжений перенос зарядов;

в) выбранное расположение подшипников, в которых вращается ротор, делая 3000 об/мин., обеспечивает минимальный зазор между ротором и статором, сохраняет равномерным этот зазор и уменьшает вибрации ротора;

г) ионизаторы обеспечивают достаточную ионизацию газа для создания тока при сравнительно небольших давлениях газа в баке; кроме того, конструкция ионизаторов позволяет регулировать зазор при вращении ротора, когда открыт бак генератора; указанные обстоятельства позволяют использовать для возбуждения генераторов источники с небольшим напряжением и почти с нулевым током.

4. Между индукторными пластинами ток проводимости статора по закону Ома создает равномерное тангенциальное поле. Удельное сопротивление материала статора должно быть в определенном отношении к удельному сопротивлению ротора: меньше приблизительно в 1000 раз. Задача подбора материала для статора не нашла должного и полного разрешения в процессе разработки описанных моделей РЭГов. Возможно поэтому мала развиваемая мощность генераторов и велики паразитные емкости при достижении высоких напряжений.

Для изготовления статоров использовались стеклоэпоксид, органическое стекло, а также применялись обмазки из различных полупроводящих лаков. Предпочтение получили статоры из оргстекла и стеклоэпоксида без обмазок.

Автор выражает благодарность за полезные советы и помощь в работе Н.И. Павлову, Л.Н. Беляеву, В.П. Саранцеву, Н.И. Малашкевичу, а также Р.Е. Кашунину, А.П. Кошееву, В.Ф. Орлову, И.М. Семенову, М.А. Невзорову, А.С. Филиппову и Н.К. Соболеву за помощь в конструировании, сборке, наладке и проведении испытаний описанных моделей генераторов.

#### Л и т е р а т у р а

1. К.А. Андриянов, Н.П. Богородицкий, Ю.В. Корицкий, Б.М. Тареев. Справочник по электротехническим материалам. Том 1, ГЭИ, 1958 г. и том 2, ГЭИ, 1960 г.
2. А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев, Н.И. Воробьев, А.Ф. Калганов, И.И. Каляцкий, В.Д. Кучин, Г.А. Месяц, С.Ф. Покровский, К.К. Сончик, А.Т. Чепиков. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения, ГЭИ, 1960.
3. Е.Г. Комар. Ускорители заряженных частиц. Атомиздат, 1964.
4. Электрофизическая аппаратура. Сборник статей. Выпуск 2, Атомиздат, 1964.
5. О.Б. Брон. Электромагнитное поле как вид материи. ГЭИ, 1962.
6. К.И. Черник. Эпоксидные компаунды и их применение. Судпромгиз, 1959.
7. Н.И. Батурин. Литая изоляция высокого напряжения. ГЭИ, 1963.
8. В.В. Михайлов. Расчет и конструирование высоковольтной аппаратуры. ГЭИ, 1955.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 февраля 1970 года.

Таблица

## 1. Конструктивные характеристики

№№ пп	Наименование характеристик	РЭГ-Д125	РЭГ-Д300	РЭГ-Ц300	Прим.
1. Основные габариты:					
а)	высота без высоковольтного вывода, см	62,0	87,5	108,5	
б)	наибольший диаметр бака, см	34,0	50,0	50,0	
2. Вес генератора с высоковольтным выводом, кг					
3.	Общий объем, л	23,8	78,95	82,0	
4.	Газовый объем, л	13,0	54,5	60,6	
5.	Вид ротора	диск	диск	цилиндр	
6.	Диаметр ротора, мм	270/160	400/290	300	
7.	Толщина ротора, мм	3,5	3,1	2,3	
8.	Материал статора	орг.стек.	орг.стек.	стек.эпокс.	
9.	Длина индуктора, мм	45,0	50,0	72,0	
10.	Ширина индуктора, мм	30,0	30,0	32,0	
11.	Длина коронирующей полосы, мм	45,0	45,0	72,0	
12.	Зазор между ротором и статором, мм	0,5	0,7	0,5	
13.	Зазор между ротором и ионизатором, мм	0,35	0,7	0,25	
14.	"Активная" площадь ротора, см <sup>2</sup>	150,0	225,0	425,0	

## 2. Электрические характеристики

1.	Максимально допустимое напряжение $U_2$ , кв	142,0	315,0	320,0
2.	Рабочее напряжение $U_2$ , кв	125,0	300,0	300,0
3.	Максимальный ток к.э. при $U_1 = 40$ кв, $P = 8$ вати, мка	140,0	300,0	700,0
4.	Развиваемая мощность, вт	12,0	30,0	60,0
5.	Рабочий ток при рабочем $U_2$ , мка	100,0	100,0	200,0

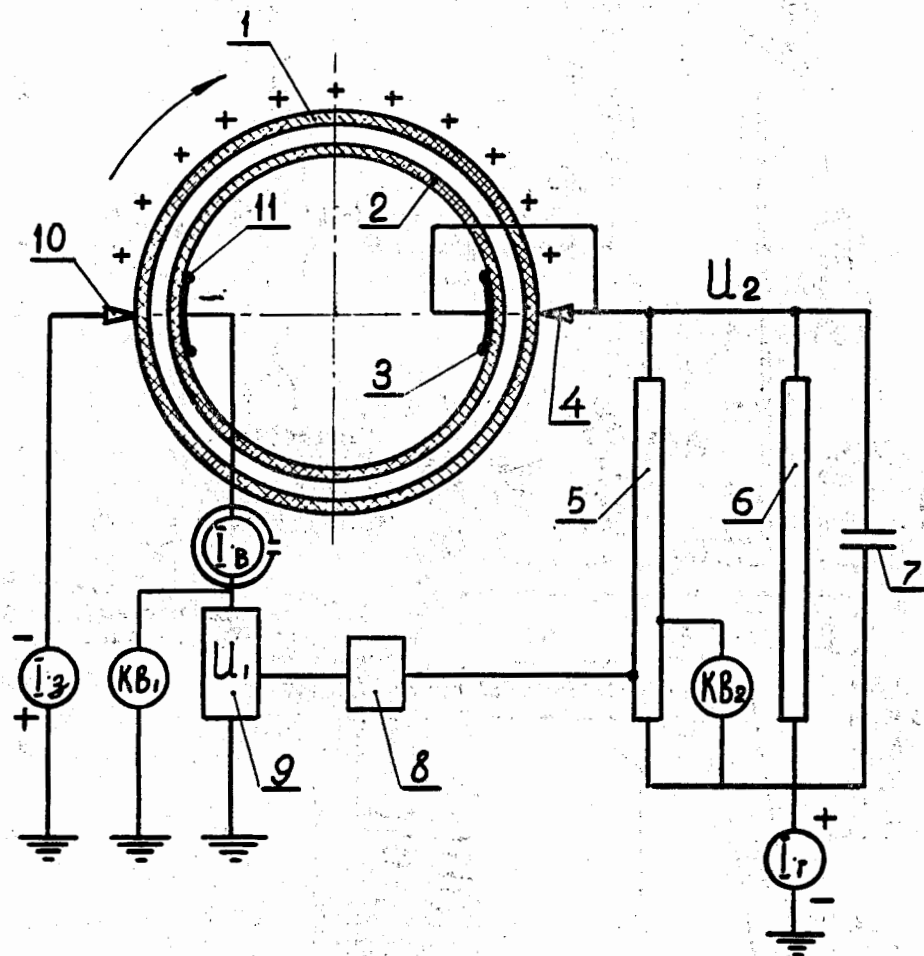


Рис.1. Принципиальная схема двухполюсного РЭГа с переносчиком зарядов из диэлектрика.

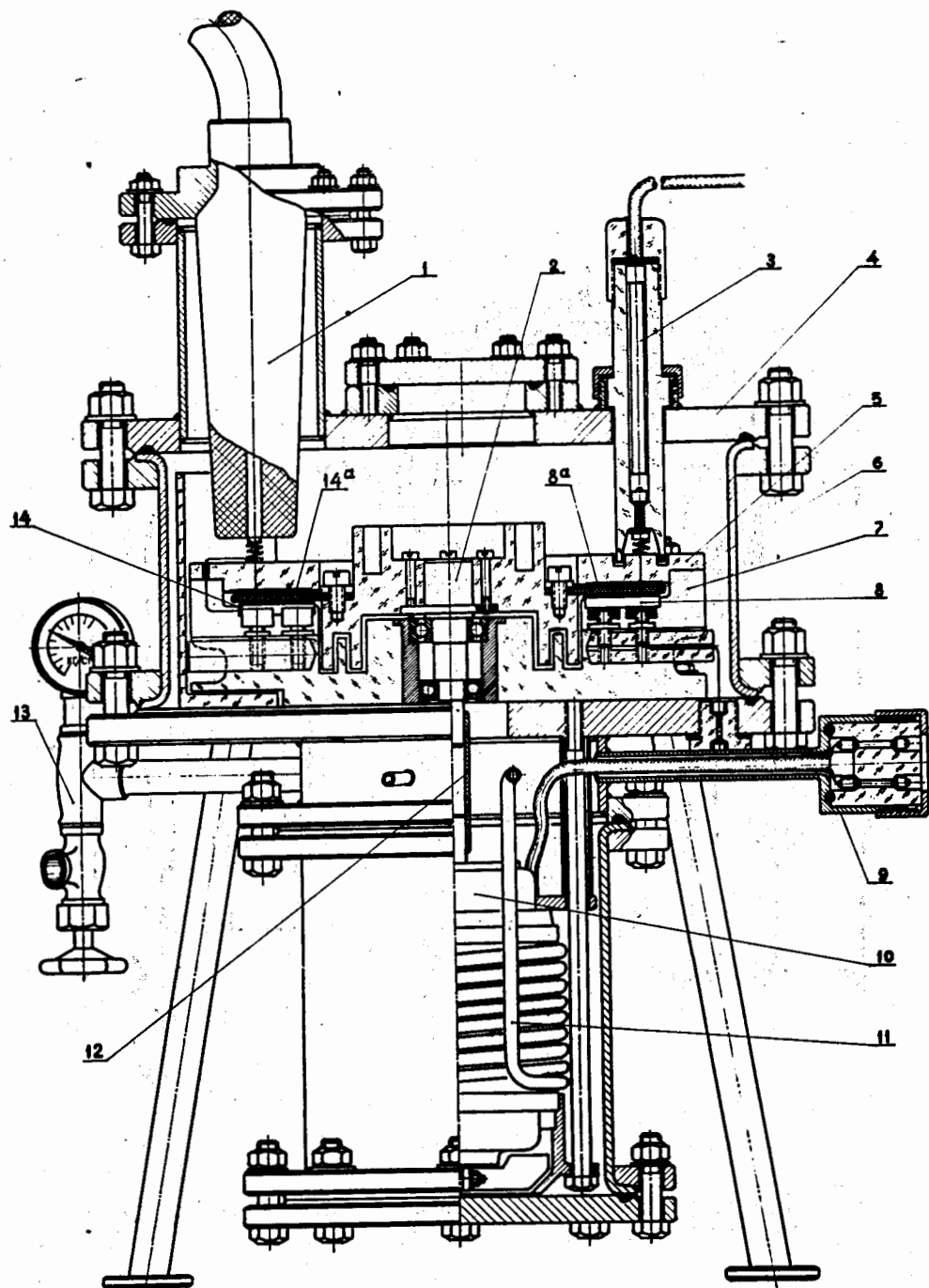


Рис.2. Конструктивные элементы модели РЭГ-Д-125.

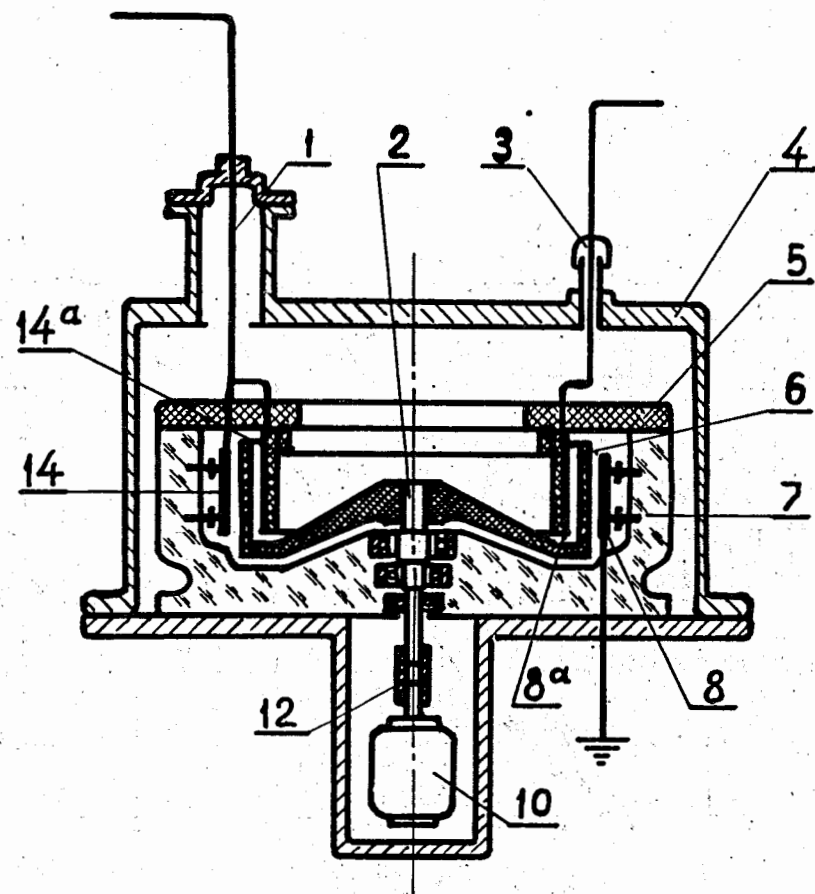


Рис.3. Конструктивные элементы модели РЭГ-Ц-300. 1 - кабельный вывод высокого напряжения; 2 - стальной вал; 3 - ввод напряжения возбуждения; 4 - металлический бак; 5 - статор; 6 - цилиндрический ротор; 7 - станина генератора; 8 - ионизатор возбуждения; 8а - индуктор возбуждения; 10 - электродвигатель; 12 - эластичная муфта; 14 - разрядный ионизатор; 14а - разрядный индуктор.



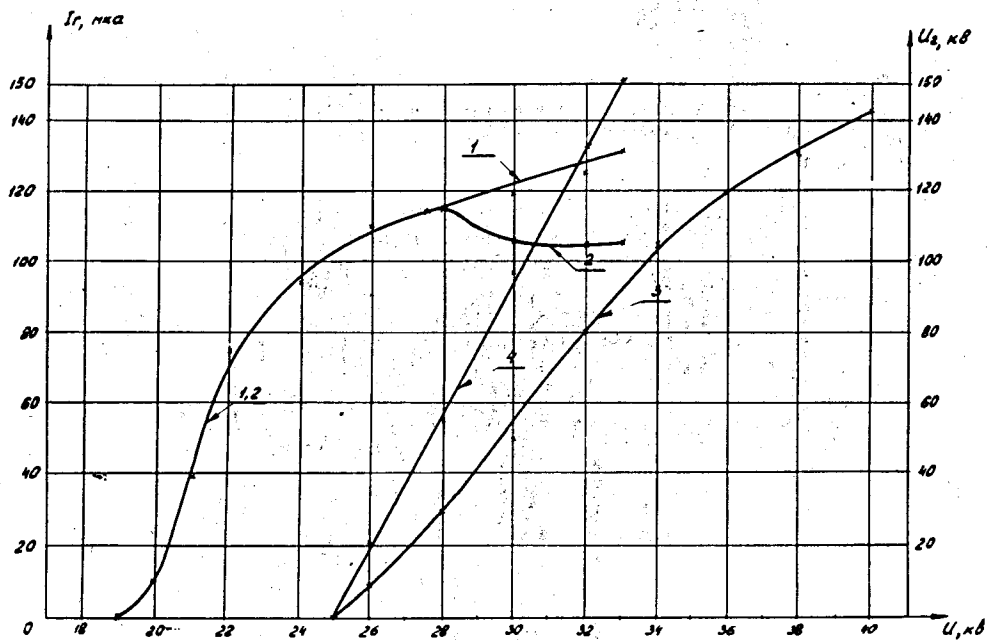


Рис.4. Характеристики короткого замыкания и нагрузочная характеристика модели РЭГ-Д-125. 1 - зависимость тока  $I_3$  от напряжения возбуждения при давлении (Р) в баке 5 ати; 2 - зависимость тока  $I_r$  от напряжения возбуждения при давлении в баке 5 ати; 3 - зависимость тока  $I_r$  от напряжения возбуждения при давлении в баке 8 ати; 4 - зависимость выходного напряжения ( $U_2$ ) от напряжения возбуждения при давлении в баке 8 ати и при  $R_{нагр.} = 2000$  мом.

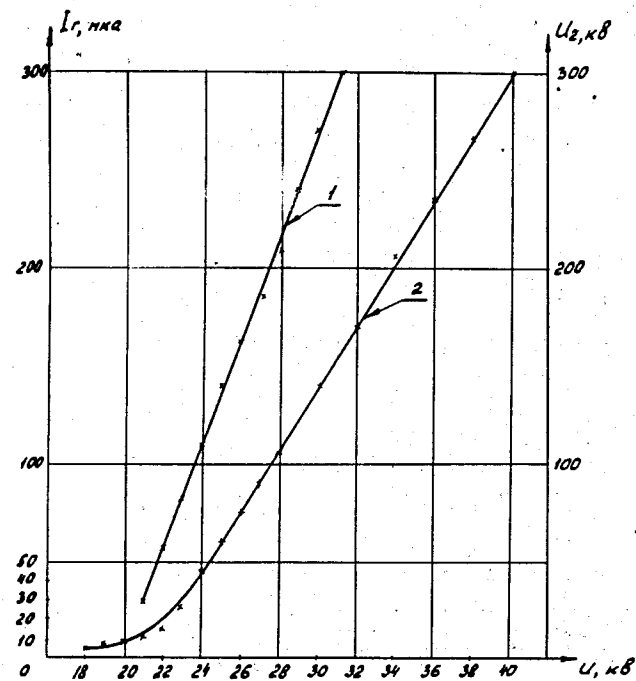


Рис.5. Нагрузочная характеристика и характеристика короткого замыкания модели РЭГ-Д-300 при давлении в баке 8 ати. 1 - зависимость выходного напряжения ( $U$ ) от напряжения возбуждения при  $R_{нагр.} = 3000$  мом; 2 - зависимость тока  $I_r$  от напряжения возбуждения.

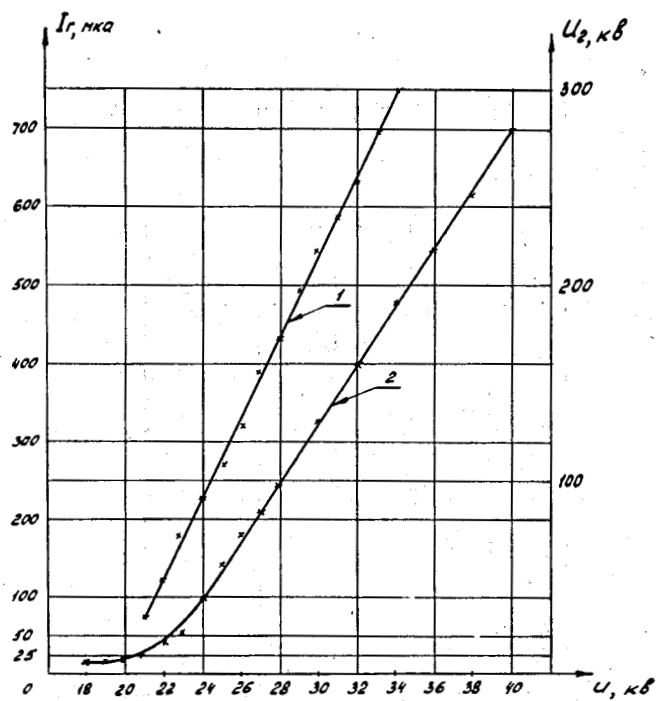


Рис.6. Нагрузочная характеристика и характеристика короткого замыкания модели РЭГ-Ц-300 при давлении в баке 8 атм. 1 - зависимость выходного напряжения ( $U_2$ ) от напряжения возбуждения при  $R_{нагр.} = 1500$  мом; 2 - зависимость тока  $I_G$  от напряжения возбуждения.

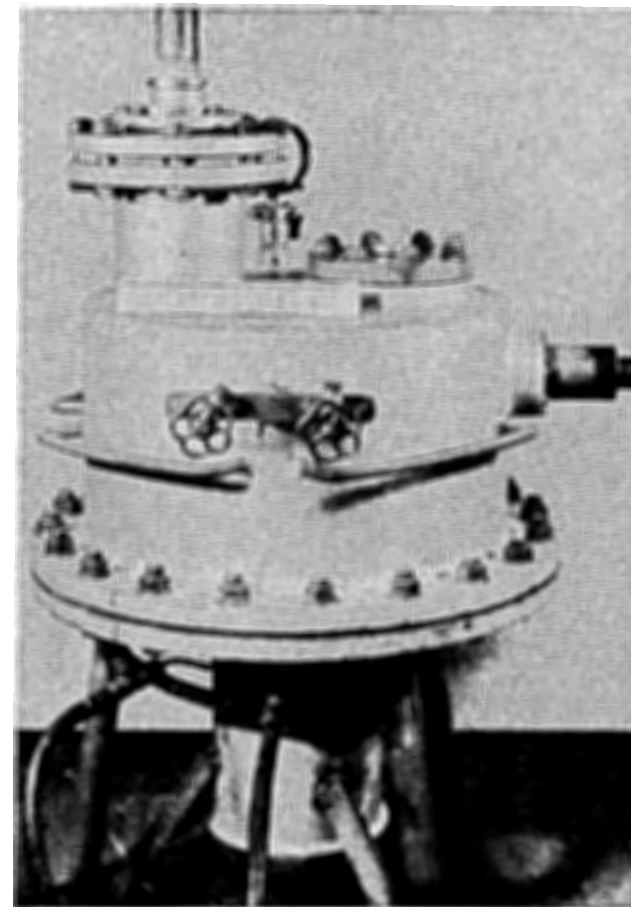


Рис.7. Общий вид генератора модели РЭГ-Д-300 с кабельным выводом высокого напряжения с и с боковым вводом напряжения возбуждения.