

Г. 19

8

И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И Я Ф 74 - II

В.А.Гапонов, А.И.Грищенко, С.С.Жуковский,

В.С.Николаев, Р.А.Салимов, Е.П.Семенов

ВЫПРЯМИТЕЛЬ НА НАПРЯЖЕНИЕ 500 кВ

И ТОК НАГРУЗКИ 10 А

Новосибирск

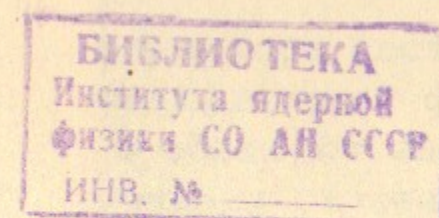
1974

ВЫПРЯМИТЕЛЬ НА НАПРЯЖЕНИЕ 500 кВ
И ТОК НАГРУЗКИ 10 А

В.А.Гапонов, А.И.Грищенко, С.С.Жуковский,
В.С.Николаев, Р.А.Салимов, Е.П.Семенов

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе описаны конструкция, режимы и результаты высоковольтных и нагрузочных испытаний экспериментального 5-ти мегаваттного выпрямителя на напряжение 500 кВ, ток нагрузки 10А, время включения 10 сек. Приведена схема питания и описана защита выпрямителя при аварийных режимах.



1. Введение

В экспериментальной практике находят широкое применение источники высоких напряжений (ИВН) до 1 МВ и выше (трансформаторы, резонансные трансформаторы, трансформаторы с изолированным сердечником, каскадные генераторы и т.д.).

При всем разнообразии принципов действия и конструкций мощность на выходе упоминаемых источников высокого напряжения в длительном режиме, как правило, не превышает нескольких десятков кВт.

Создание достаточно компактных источников с постоянным напряжением на выходе сотни киловольт, работающих в непрерывном или квазинепрерывном режимах и имеющих выходную мощность единицы мегаватт и выше, не только открывает большие возможности в различных прикладных областях науки, но и имеет самостоятельное значение в области высоковольтной техники.

П. Конструкция выпрямителя

Выпрямитель представляет собой 3-х фазный высоковольтный трансформатор с встроенным выпрямителем на полупроводниковых диодах, питаемый от промышленной сети переменного тока частоты 50 Гц, напряжением 6,3 кВ (10 кВ) (Рис.1). Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применена двенадцатифазная схема выпрямления, представляющая собой ряд последовательно соединенных со стороны выпрямленного тока вентильных секций, собранных на основе диодов В-10 (ВК-2-10) (Рис.2).

Магнитопровод трансформатора состоит из 2-х треугольных ярем и 3-х сердечников цилиндрической формы, которые размещаются по вершинам ярем и образуют замкнутый для магнитного потока контур. Ярма и сердечники склеены из листов электротехнической стали Э-320 толщиной 0,5 мм эпоксидным компаундом.

Первичная обмотка W_1 на рабочее напряжение 6,3 кВ (либо 10 кВ) состоит из 3-х фазных катушек с внутренними экранами из меди, намотанных в один слой медной шиной $5,1 \times 10 \text{ мм}^2$.

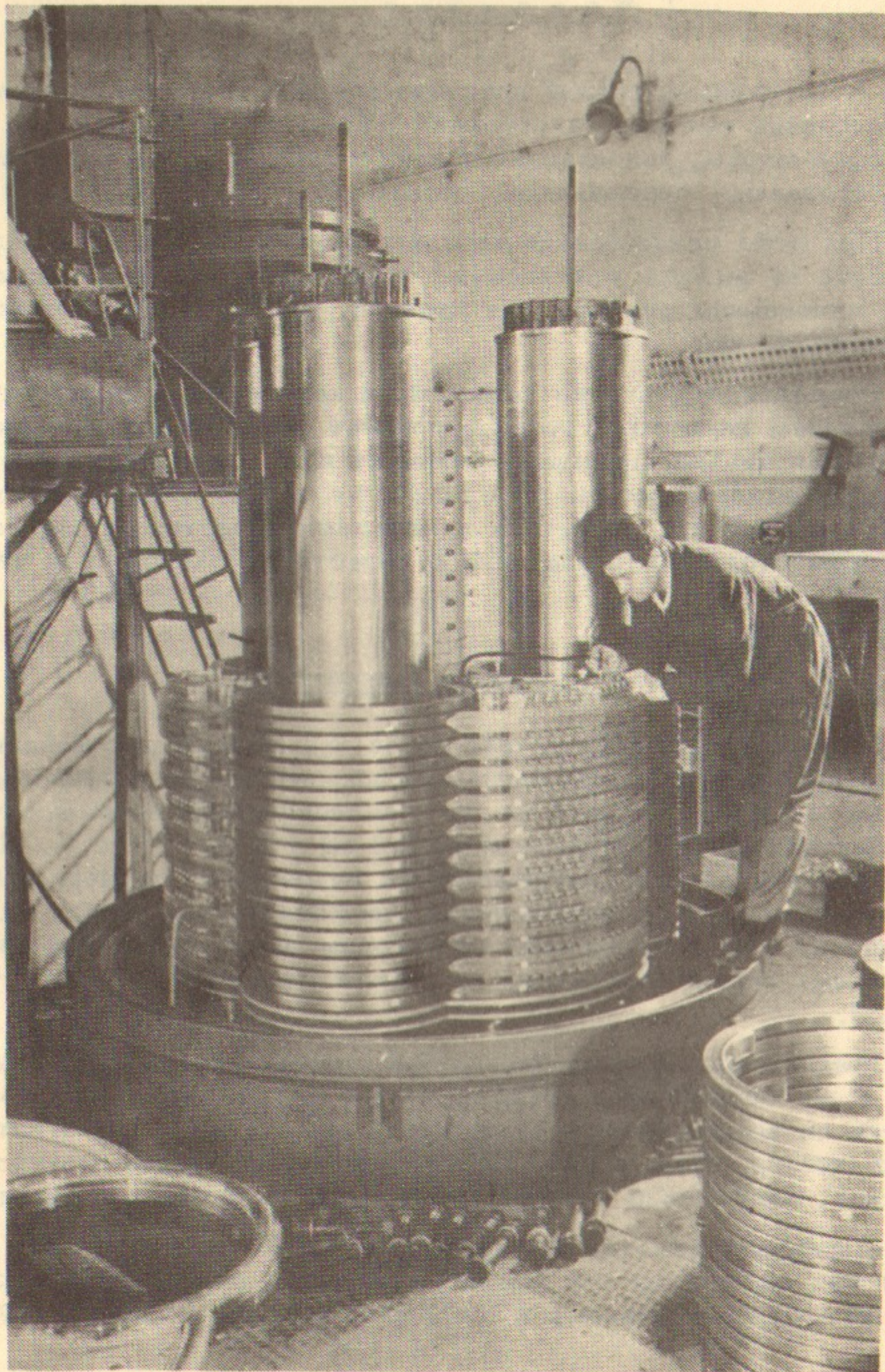


Рис.1. Трансформатор-выпрямитель в процессе сборки.

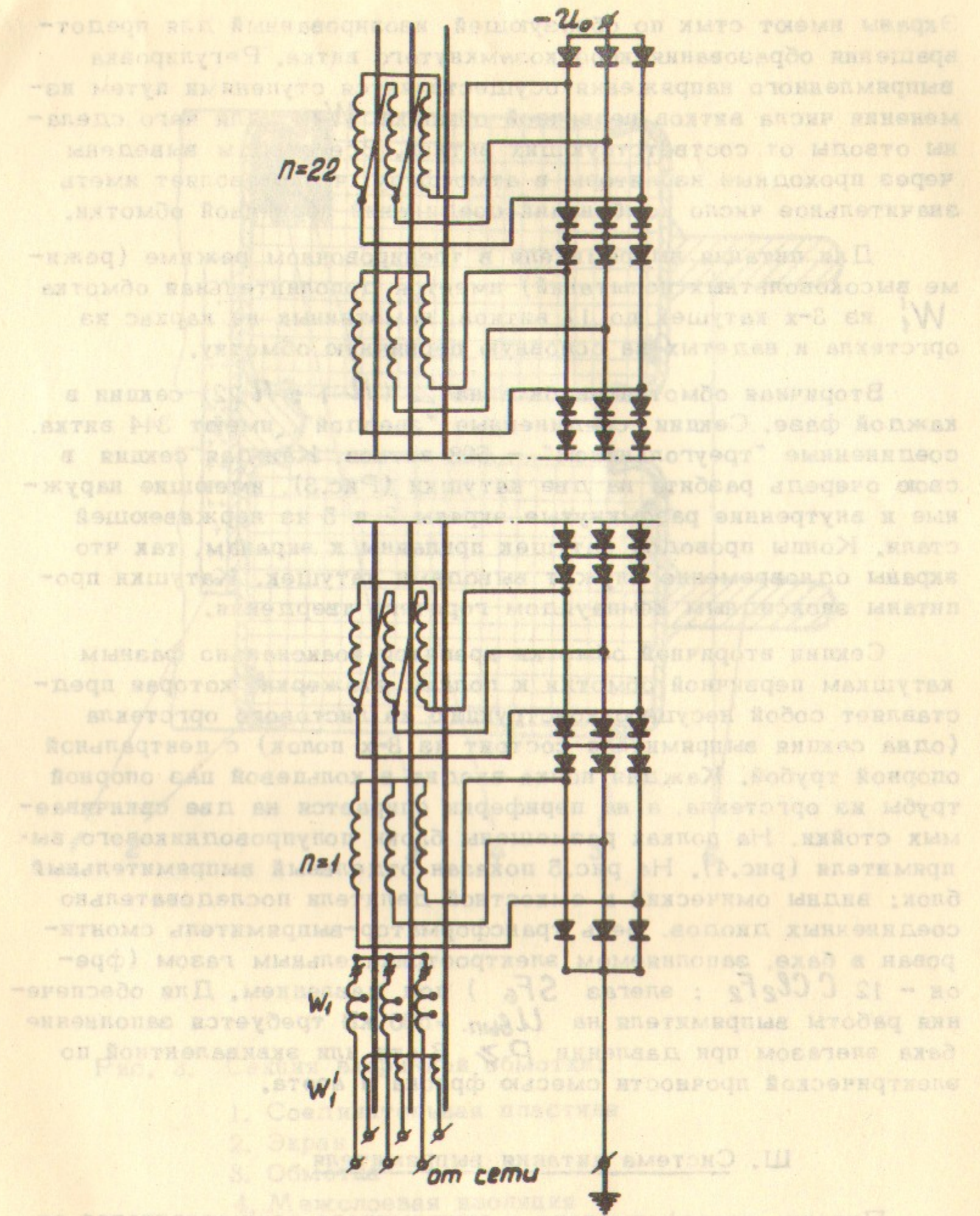


Рис.2. Электрическая схема трансформатора - выпрямителя.

Экраны имеют стык по образующей, изолированный для предотвращения образования короткозамкнутого витка. Регулировка выпрямленного напряжения осуществляется ступенями путем изменения числа витков первичной обмотки W_1 , для чего сделаны отводы от соответствующих витков. Все отводы выведены через проходные изоляторы в атмосферу, что позволяет иметь значительное число комбинаций соединений первичной обмотки.

Для питания выпрямителя в тренировочном режиме (режиме высоковольтных испытаний) имеется дополнительная обмотка W'_1 из 3-х катушек по 11 витков, намотанных на каркас из оргстекла и надетых на основную первичную обмотку.

Вторичная обмотка разбита на 22 ($N_1 \div N_{22}$) секции в каждой фазе. Секции, соединенные "звездой", имеют 344 витка, соединенные "треугольником" - 598 витков. Каждая секция в свою очередь разбита на две катушки (Рис.3), имеющие наружные и внутренние разомкнутые экраны 2 и 5 из нержавеющей стали. Концы проводов катушек припаяны к экранам, так что экраны одновременно служат выводами катушек. Катушки пропитаны эпоксидным компаундом горячего твердения.

Секции вторичной обмотки крепятся коаксиально фазным катушкам первичной обмотки к полкам этажерки, которая представляет собой несущую конструкцию из листового оргстекла (одна секция выпрямителя состоит из 3-х полок) с центральной опорной трубой. Каждая полка входит в кольцевой паз опорной трубы из оргстекла, а на периферии опирается на две свинчиваемых стойки. На полках размещены блоки полупроводникового выпрямителя (рис.4). На рис.5 показан отдельный выпрямительный блок; видны омический и емкостной делители последовательно соединенных диодов. Весь трансформатор-выпрямитель смонтирован в баке, заполняемом электроотрицательным газом (фреон - $12\text{ CCl}_2\text{F}_2$; элегаз SF_6) под давлением. Для обеспечения работы выпрямителя на $U_{\text{вып.}} = 500\text{ кВ}$ требуется заполнение бака элегазом при давлении $P \geq 6$ ати или эквивалентной по электрической прочности смесью фреона и азота.

Ш. Система питания выпрямителя

Питание трансформатора - выпрямителя осуществляется от сети 6,3 кВ или 10 кВ (рис.6). Для ограничения выпрямленного тока в режиме короткого замыкания нагрузки выпрямителя в

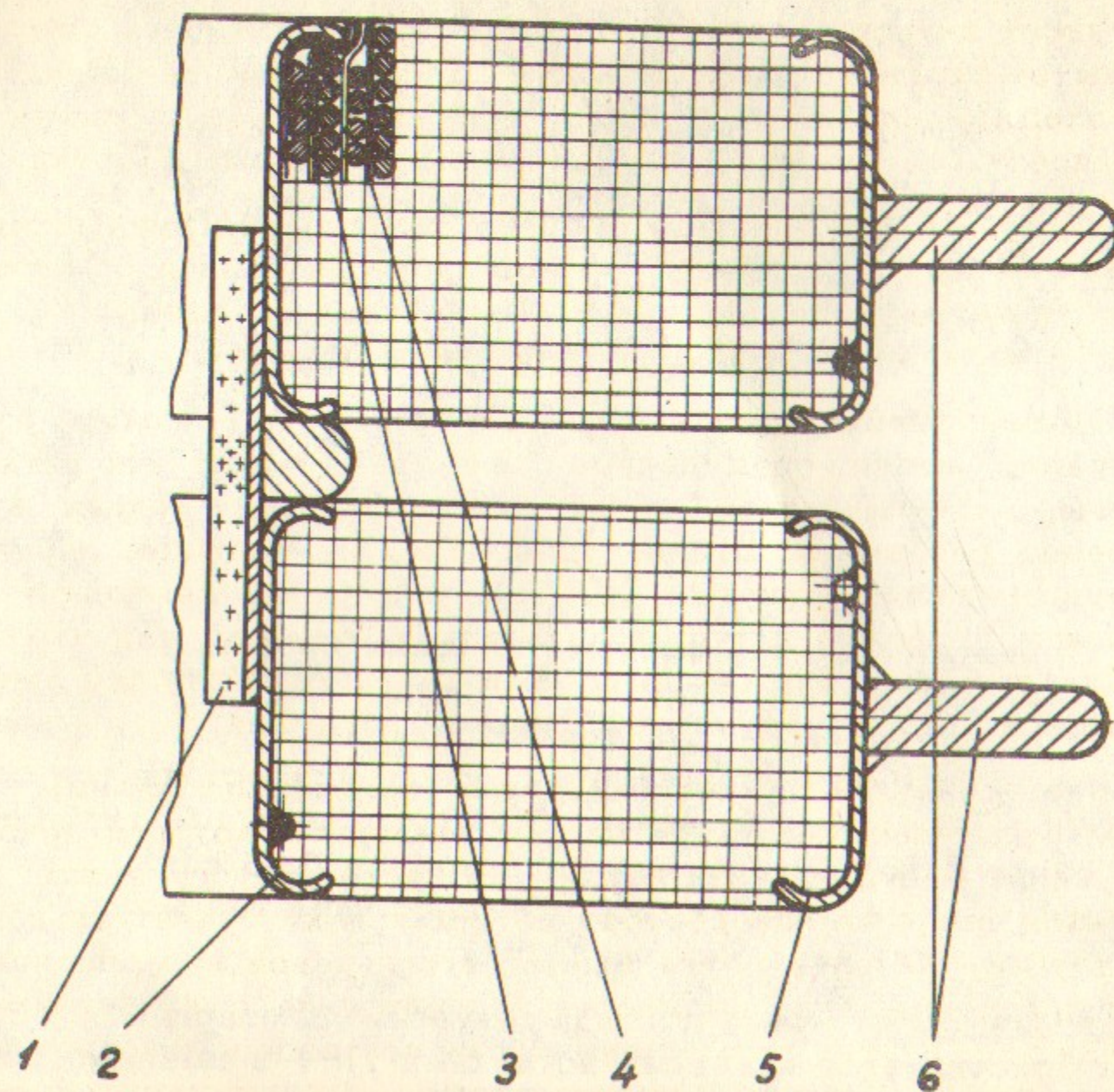


Рис. 3. Секция вторичной обмотки:

1. Соединительная пластина
2. Экран
3. Обмотка
4. Межслоевая изоляция
5. Экран
6. Крепящий кронштейн

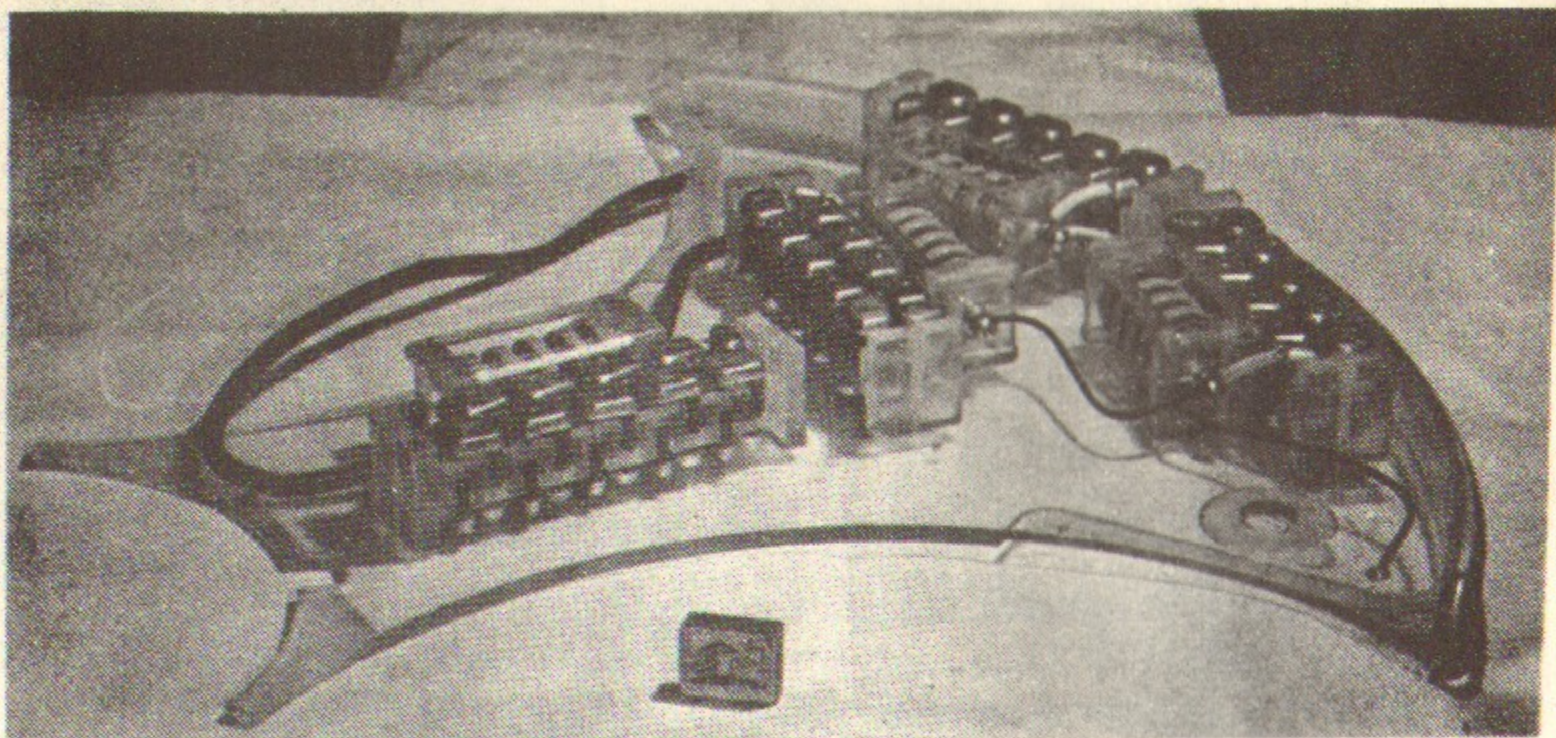


Рис.4. Полка этажерки с выпрямительными блоками

системе питания применены реакторы Р. Подача и снятие напряжения с первичных обмоток трансформатора осуществляется двумя высоковольтными выключателями (МВ с временем отключения 0,15 сек и ВНВ - с временем отключения 0,05 сек). Для работы с напряжением $U_{вып} \leq 300$ кВ трансформатор может запитываться от сети 380 в (см.таблицу 1).

Защита выпрямителя и трансформатора при аварийных режимах осуществляется плавкими вставками ПР1 и выключателями МВ и ВНВ, срабатывающими от токовых реле, установленных в цепи выпрямленного тока и цепях первичной обмотки. Для ограничения возможных перенапряжений на фазных катушках первичной обмотки трансформатора применены полупроводниковые диодные ограничители напряжения ОН, подключаемые к определенным виткам первичной обмотки трансформатора, соответствующим их пороговому напряжению.

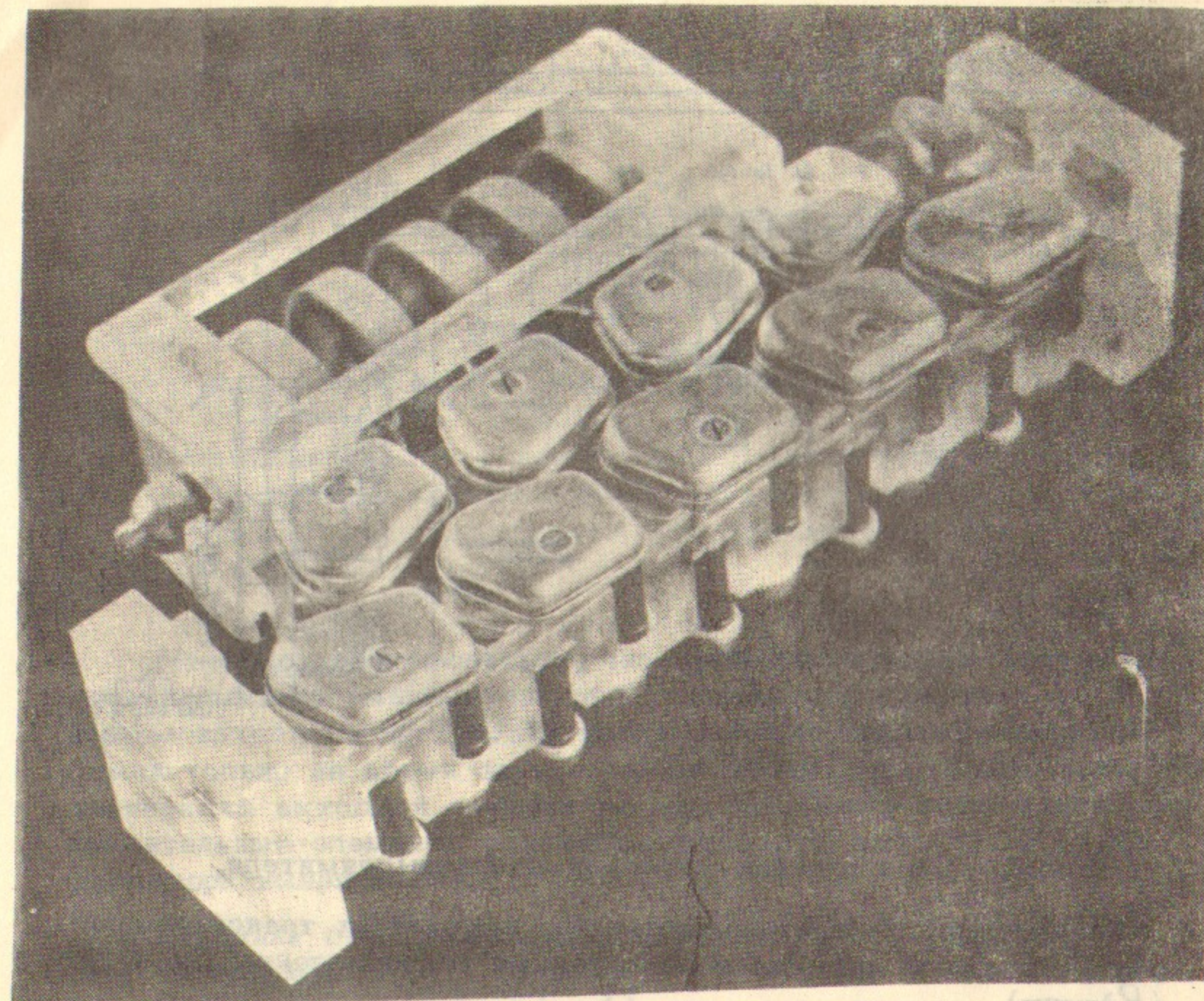


Рис. 5. Выпрямительный блок

Подъем напряжения выпрямителя на холостом ходу производится через регулировочный трансформатор РТТ от сети 380 В с защитой по уровню тока короны. При превышении током короны определенного уровня производится отключение питания выпрямителя контактором К.

Выходное напряжение выпрямителя контролируется по прибору с делителя напряжения R_2, γ_1 . Первичные напряжения трансформатора контролируются через измерительный трансформатор Тр2, ток выпрямителя - с резистора R_1 .

При работе часто возникает необходимость производить включение трансформатора-выпрямителя без нагрузки, т.е. на холостом ходу. При этом без принятия специальных мер при включениях без нагрузки на выходе выпрямителя и на элементах трансформатора возникают недопустимые перенапряжения.

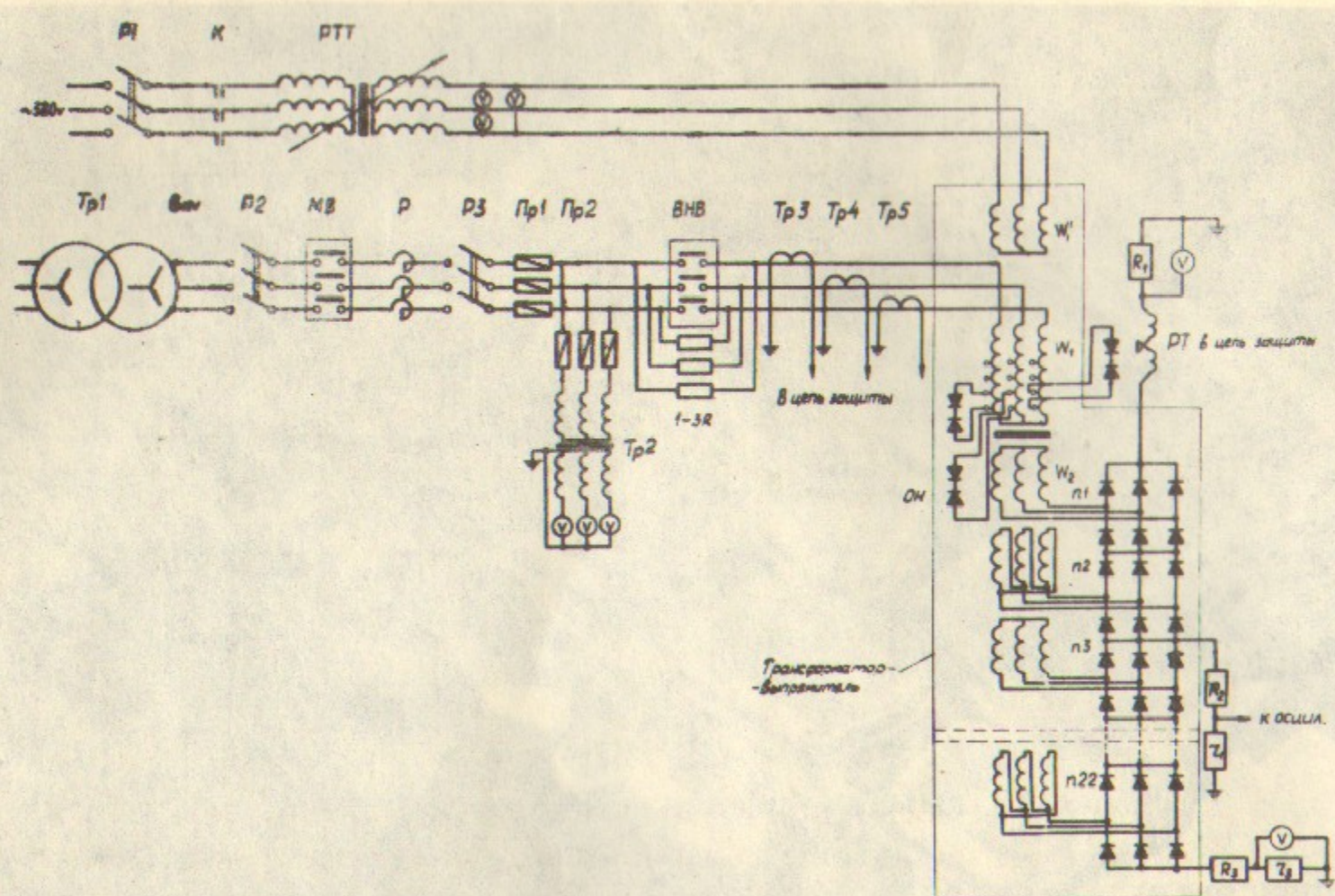


Рис.6. Схема питания трансформатора-выпрямителя.

Для снятия перенапряжений при включениях трансформатора-выпрямителя применены демпферные сопротивления $1-3 R$ ($R_{демф}$).

Оценка величины демпферных сопротивлений

Простейшая схема замещения трансформатора-выпрямителя приведена на рис.7, где

$R_{демф}$ - демпферные сопротивления

$L_{пит}$ - индуктивность системы питания

L_s - индуктивность рассеяния трансформатора

L_H - индуктивность намагничивания трансформатора

C - пересчитанная в первичную обмотку выходная емкость выпрямителя.

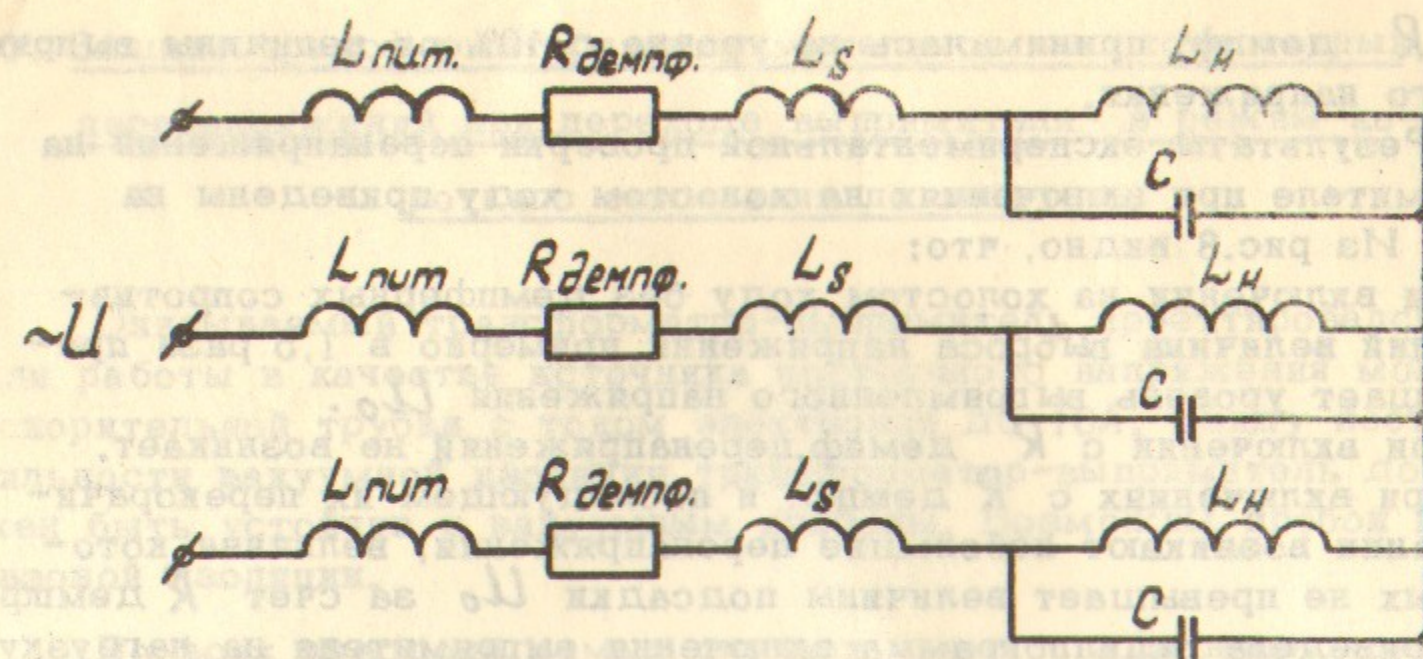


Рис. 7.

Необходимо оговориться, что приводимая схема замещения трансформатора-выпрямителя при условии, что емкость C в основном находится на стороне выпрямленного напряжения, имеет смысл только на время заряда выходной емкости. После процесса зарядки выходной емкости до максимального напряжения выпрямительные элементы отключают выходную емкость от трансформатора-выпрямителя.

Величина демпферных сопротивлений может быть определена из неравенств

$$[\omega_p(L_s + L_{пит}) = \sqrt{\frac{L_s + L_{пит}}{C}} \leq R_{демф} \leq \omega L_H$$

где ω - частота питающей сети

ω_p - частота последовательного резонансного контура, образованного суммарной индуктивностью $L_s + L_{пит}$ и емкостью C . При этом предполагается, что $\frac{L_s}{L_H} \ll 1$. Приведенные неравенства соответствуют требованию малой подсадки выпрямленного напряжения за счет введения демпферных сопротивлений и низкой добротности последовательного резонансного контура $(L_s + L_{пит})C$.

В таблице 2 приведены величины $R_{демф}$ в зависимости от подключаемых витков первичной обмотки трансформатора. Для данного выпрямителя подсадка напряжения на выходе за

счет R демпф. принималась на уровне $\sim 10\%$ от величины выпрямленного напряжения.

Результаты экспериментальной проверки перенапряжений на выпрямителе при включениях на холостом ходу приведены на рис.8. Из рис.8 видно, что:

- I. При включении на холостом ходу без демпферных сопротивлений величина выброса напряжения примерно в 1,5 раза превышает уровень выпрямленного напряжения U_0 .
 - II. При включении с R демпф. перенапряжений не возникает.
 - III. При включениях с R демпф. и последующем их перекорачивании возникают небольшие перенапряжения, величина которых не превышает величины подсадки U_0 за счет R демпф.
- IV. Приведена осциллограмма включения выпрямителя на нагрузку с демпферными сопротивлениями в цепи питания с последующим перекорачиванием их.

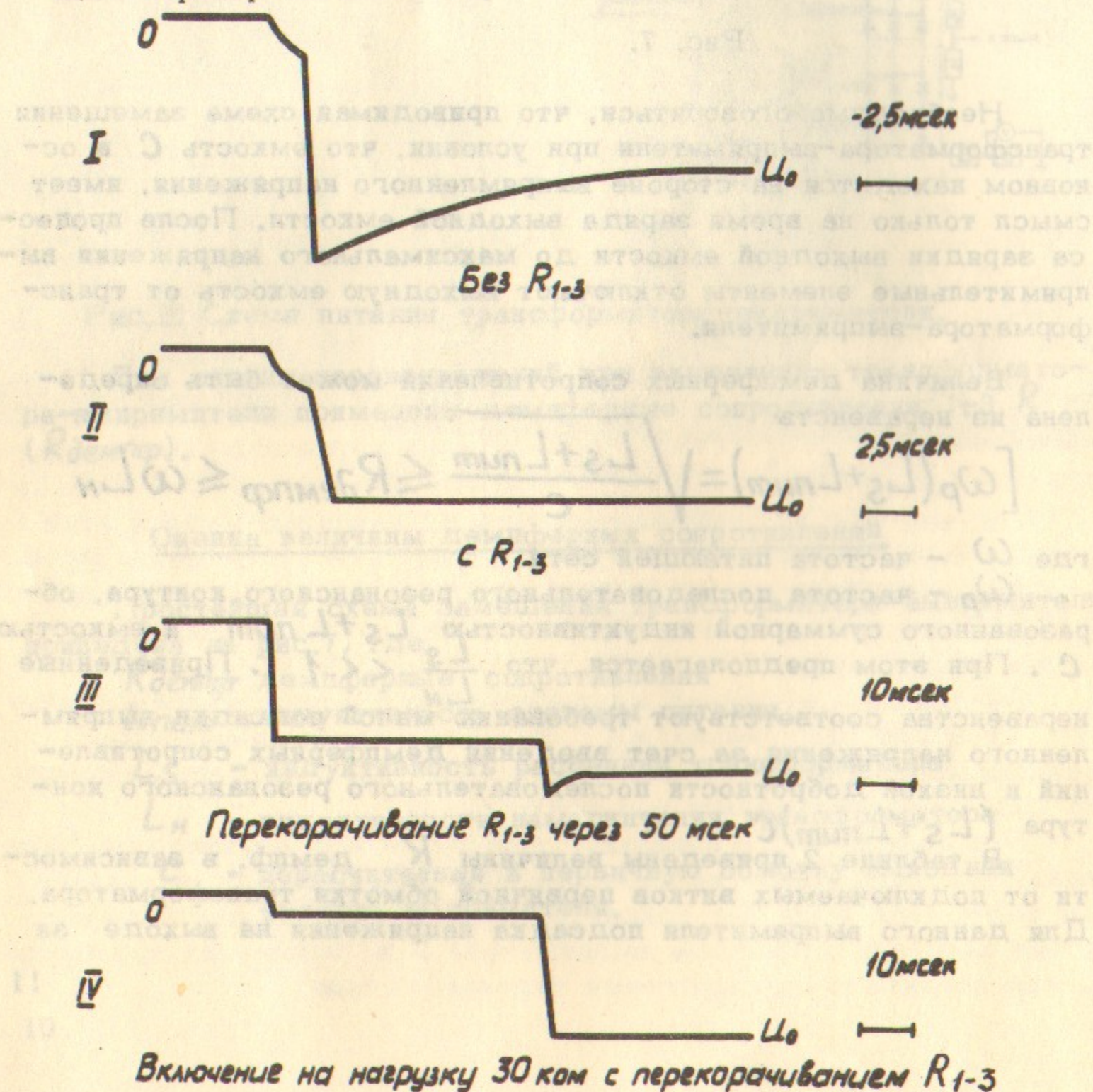


Рис.8 Осциллограммы выпрямленного напряжения при включениях выпрямителя.

IV. Защита трансформатора-выпрямителя от высокочастотных перенапряжений при переходе выпрямителя в режим короткого замыкания по нагрузке

Описываемый трансформатор-выпрямитель проектировался для работы в качестве источника постоянного напряжения мощной ускорительной трубки с током электронов до 10А. Ввиду нестабильности вакуумной изоляции трансформатор-выпрямитель должен быть устойчив к вакуумным пробоям. Возможны пробои по газовой изоляции.

Во всех предполагаемых случаях время спада напряжения на выходе выпрямителя до нуля очень мало (десятки нсек), и на катушках вторичной обмотки выпрямителя возникают недопустимые перенапряжения.

Если обеспечить достаточно плавный спад напряжения на выходе выпрямителя, то перенапряжений на элементах выпрямителя не возникает. Для плавного спада напряжения на выходе выпрямителя при переходе его в режим короткого замыкания по нагрузке нами был применен дроссель по выпрямленному напряжению.

Параметры дросселя определялись из условия аperiodического разряда выходной емкости выпрямителя на недобротную индуктивность дросселя. Величина индуктивности дросселя $L_{др}$ определялась из условия $2\pi \sqrt{L_{др} \cdot C_{вых}} \gg T$, где

$L_{др}$ - индуктивность дросселя

$C_{вых}$ - выходная емкость выпрямителя

T - период собственных колебаний катушки вторичной обмотки выпрямителя.

Необходимое затухание в дросселе (добротность $Q \approx 1$) достигается за счет соответствующих короткозамкнутых витков на элементах длины дросселя.

Изоляция дросселя рассчитывалась из того условия, что дроссель должен кратковременно выдерживать двойное выпрямленное напряжение.

Была проверена устойчивость выпрямителя при пробоях газовой изоляции по полному напряжению.

Для этой цели были устроены газовые пробой с выхода дросселя на выдвижной шток при различных межэлектродных зазорах и давлениях газа (фреон) (рис.9). С описанным дросселем трансформатор-выпрямитель успешно выдержал около 20 пробоев на уровне напряжений 300-400 кВ. На рис.9 приведены полученные экспериментальные данные по электрической прочности газового зазора в зависимости от давления газа (фреон-12) и межэлектродного зазора для примененной геометрии и материалов электродов.

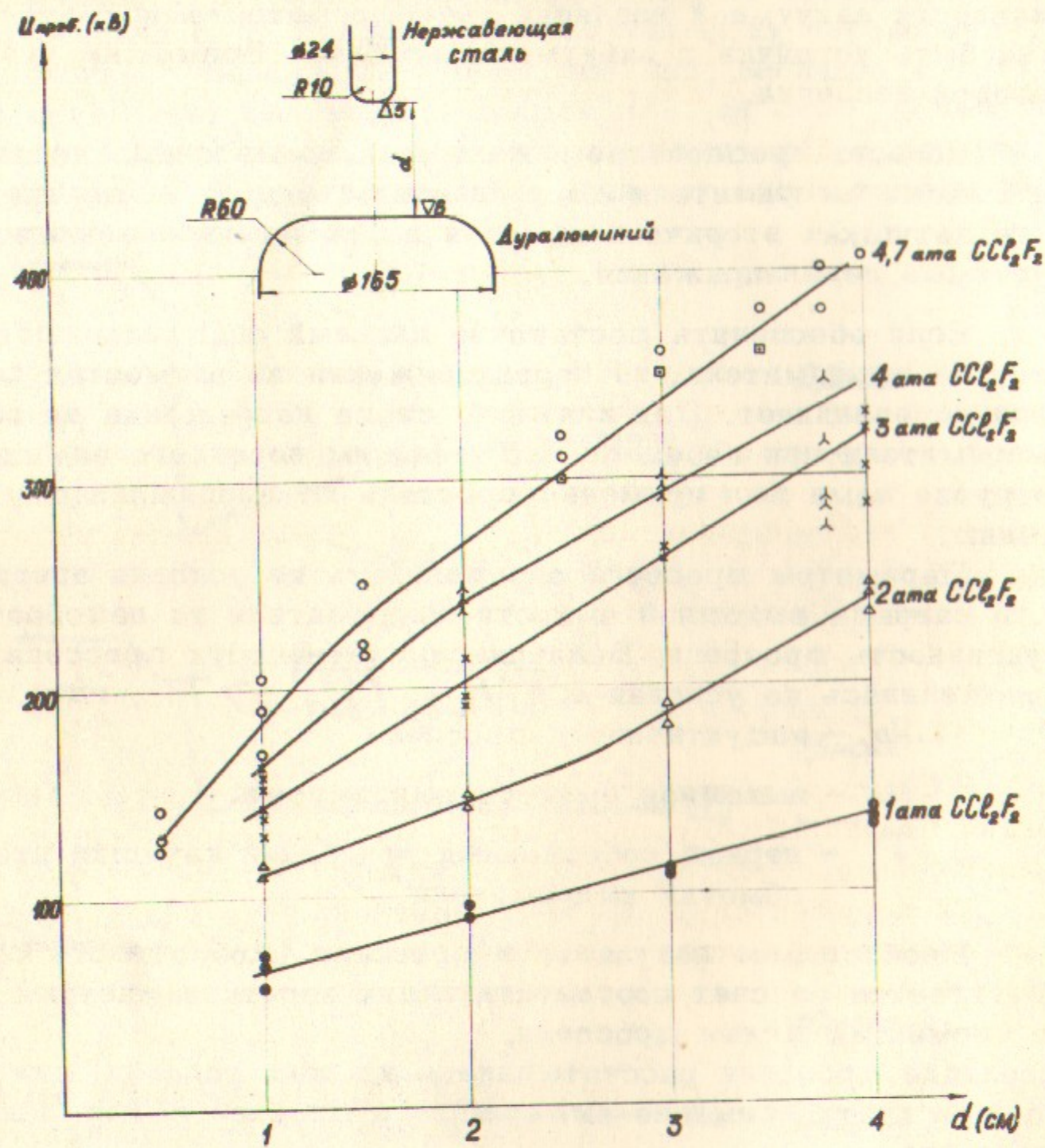


Рис.9. Величина пробивного напряжения высоковольтного зазора в зависимости от давления газа (фреона-12) и величины зазора.

У. Определение допустимых режимов работы трансформатора-выпрямителя

Для испытаний выпрямителя на активную нагрузку выпрямленное напряжение выводилось в атмосферу через проходной изолятор. Нагрузкой служили 100 последовательно соединенных резисторов БРП-0,5 на рассеиваемую энергию 50 МДж. Бак с выпрямителем, проходной изолятор и нагрузка показаны на рис.10.

- Проверка работы выпрямителя проведена в двух режимах:
- $U_{\text{выпр.}} = 500 \text{ кВ}; \Delta t = 10 \text{ сек}$ - холостой ход; количество включений - 5.
 - $U_{\text{выпр.}} = 270 \text{ кВ}$
 $= 300 \text{ кВ}$
 $= 350 \text{ кВ}$
 $= 400 \text{ кВ}$
- $I_{\text{нагр.}} = 10 \text{ А} \quad \Delta t = 10 \text{ сек}$

Количество включений - 2-3 на каждый режим по напряжению. Данная конструкция проходного изолятора и активной нагрузки не позволяла поднимать напряжение более 400 кВ. Наблюдалось резкое увеличение тока короны со всей конструкции, находящейся в атмосфере, при $U_{\text{выпр.}} \geq 425 \text{ кВ}$ относительно земли.

При напряжении 500 кВ ток короны внутри бака выпрямителя не превышал 100 мкА. Превышение током короны уровня 100 мкА считалось недопустимым в виду опасности пробоев по полному напряжению.

В режиме короткого замыкания выпрямителя по нагрузке на секции вторичной обмотки трансформатора-выпрямителя действуют значительные силы, стремящиеся стянуть секции по высоте.

Экспериментально было установлено, что разрушение трансформатора-выпрямителя (наиболее слабым элементом являются полки этажерки, на которых крепятся секции вторичной обмотки) наступает при выпрямленном токе, большем 32А.

Учитывая большой выпрямленный ток короткого замыкания собственно трансформатора-выпрямителя, который существенно выше тока разрушения (см.табл.3), необходимо ограничить установившиеся ток короткого замыкания на стороне выпрямленного тока на уровне 16А. Таким образом, ударный выпрямленный ток короткого замыкания будет ограничен на уровне 32А. С этой

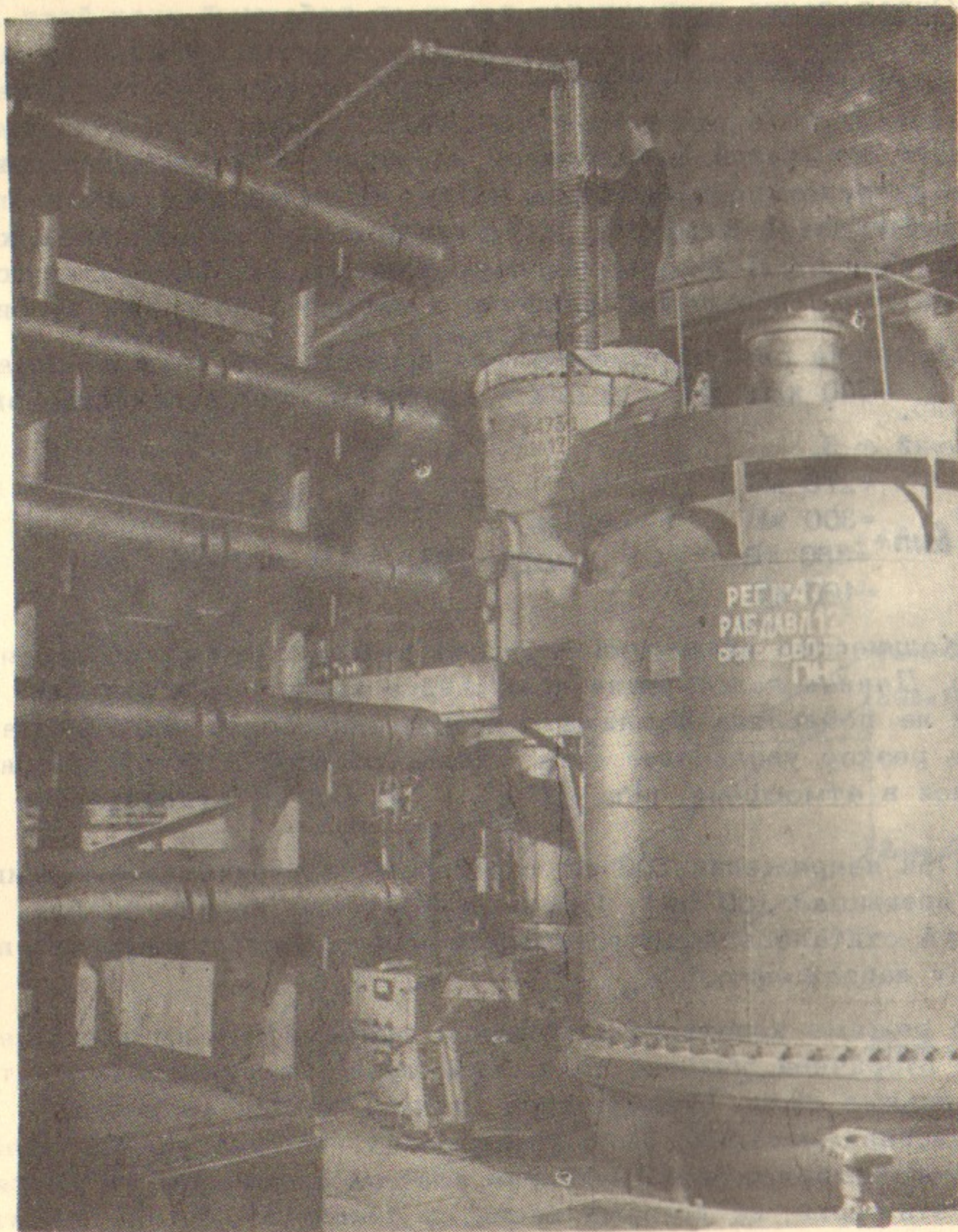


Рис.10. Общий вид выпрямителя с проходным изолятором и активной нагрузкой.

целью в цепь питания трансформатора-выпрямителя ставятся ограничивающие реакторы R , величина которых зависит от используемых отводов первичной обмотки трансформатора.

В настоящее время проводится укрепление полок этажерки для увеличения допустимого выпрямленного тока короткого замыкания трансформатора-выпрямителя.

Высоковольтные и нагрузочные испытания экспериментального 5-мегаваттного выпрямителя показали, что выпрямитель может эксплуатироваться при напряжениях $U_{\text{вып}} \leq 500 \text{ кВ}$ и мощности до 5 МВт.

В заключение авторы выражают благодарность всем инженерам, конструкторам, техникам и лаборантам, принимавшим участие в проектировании, изготовлении, сборке, наладке и испытаниях описанной установки.

Таблица 1

№ №	Количество витков первичной обмотки	Схема соединения	Напряжение питающей сети	Напряжение выпрямленного холостого хода
1	20	Y	380 В	200 кВ
		Δ	380 В	345 кВ
2	28	Y	380 В	145 кВ
		Δ	380 В	250 кВ
3	30	Y	380 В	135 кВ
		Δ	380 В	230 кВ
4	36	Y	380 В	110 кВ
		Δ	380 В	190 кВ
5	48	Y	380 В	85 кВ
		Δ	380 В	145 кВ
6	58	Y	380 В	70 кВ
		Δ	380 В	120 кВ
7	66	Y	380 В	60 кВ
		Δ	380 В	100 кВ
8	114	Y	6,3 кВ	580 кВ
9	134	Y	6,3 кВ	495 кВ
10	162	Y	6,3 кВ	415 кВ
11	192	Y	6,3 кВ	350 кВ
12	228	Y	6,3 кВ	290 кВ

Зависимость выпрямленного напряжения холостого хода от напряжения питающей сети и схемы соединения первичной обмотки.

Таблица 2

Схема соединения первичной обмотки	λ	λ	λ	λ	λ	λ/Δ	λ/Δ	λ/Δ	λ/Δ	λ/Δ	λ/Δ	λ/Δ
Витки первичной обмотки	228	192	162	134	114	66	58	48	36	30	28	20
Величина демпфирующей сопротивлений (Ом)	200	140	100	70	50	16,5/5,5	13/4	9,5/3	5/2	3,5/1	3/1	2/0,5

Величина демпферных сопротивлений в зависимости от витков и схемы соединений первичной обмотки.

Таблица 3

Витки первичной обмотки, соед. Y	Напряжение первичной обмотки линейное	Первичный ток (а)	Активн. мощность первичн.	Выпрямленный ток
114	330 (В) (6,3 кВ)	370 (а) (7050 а)	71 кВт (26 мВт)	8,7 а (165 а)
228	370 (В) (6,3 кВ)	116 (а) (1980 а)	23 кВт (6,7 мВт)	5,6 а (95,5 а)

Результаты опыта короткого замыкания нагрузки выпрямителя. В скобках указаны величины, полученные пересчетом на первичное напряжение 6,3 кВ.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50

51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
141	142	143	144	145	146	147	148	149	150

Ответственный за выпуск С.Н.РОДИОНОВ
 Подписано к печати 29.3-1974г. МН 08156
 Усл. I, Печ.л., тираж 150 экз. Бесплатно.
 Заказ № 11

Отпечатано на ротапинтере в ИЯФ СО АН СССР, тв