

С 3932  
А-676

АНИЩЕНКО Н.Г.  
Б2-13-4689

+

19159  
8 XI 20

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.  
Лаборатория Высоких Энергий, Криогенный отдел.

БЭ-13-4689

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СОЛЕНОИДОВ  
КРИОГЕННОГО ОТДЕЛА ОИЯИ.

Н.Г.Анищенко, Д.В. Приходько.

с.ф. 2587

28 августа 69

г.Дубна, 1969 г.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для сверхпроводящих соленоидов (СПС) требуются низковольтные источники питания: в установившемся режиме их напряжение должно покрывать падения напряжения лишь на коротком участке соединительного шинопровода и тросоводах в криостат; сопротивление же обмотки СПС равно нулю. Однако индуктивность обмоток (особенно в случае крупных систем) СПС достигает больших величин, что приводит к значительным индуктивным сопротивлениям СПС в переходных режимах закачки тока. Поэтому установленная мощность источников питания (при определенных рабочих токах) определяется в основном требованиями скорости закачки энергии в соленоиды. СПС для разрабатываемых источников являются особым видом нагрузки, до сих пор не встречавшимся в инженерной практике.

Основными требованиями к источникам постоянного тока для СПС можно считать следующие:

1) сведение к минимуму величины пульсаций в кривой выпрямленного напряжения, что необходимо ввиду наличия в сверхпроводнике потерь на переменном токе (это особенно важно для малоиндуктивных соленоидов);

2) высокая плавность изменения напряжения и тока (диапазон регулирования скорости роста тока должен быть достаточно широк, от 2 а/мин. и выше);

3) высокая стабильность во времени выпрямленного тока (не хуже 0,01%, что диктуется требованиями стабильности магнитного поля в рабочем объеме:

ж . В случае использования источников и для СПС, и для испытания коротких образцов сверхпроводников.

- 4) возможность включения источника питания на соленоид с нулевым значением выпрямленного напряжения;
- 5) небольшие габариты;
- 6) невысокая стоимость;
- 7) простота и безопасность эксплуатации.

Вопросы о потерях в сверхпроводниках при переменном токе (в данном случае с амплитудой и частотой пульсаций), а также при переходных процессах закачки и эвакуации энергии освещены частично в /1/ + /9/.

Для питания СПС необходима разработка специального источника, ибо выпускаемые промышленностью источники питания постоянного тока не удовлетворяют в достаточной степени всем перечисленным требованиям, а различные отечественные и зарубежные Лаборатории, конструирующие средние и большие СПС, в каждом конкретном случае решают вопрос запитки их по-разному /10/ + /15/ .

Для работы с СПС можно использовать следующие принципиально разные типы источников питания:

#### А. Электромашинные

Обычный мотор-генератор (МГ) с независимым возбуждением от специально разработанного маломощного источника постоянного тока, меняющегося по необходимому закону, - наиболее простое решение вопроса. Однако, такой источник не удовлетворяет условиям 1,5,7. Пульсации тока при работе, например, агрегата АНГ (5000а, 6 вольт) на безиндуктивную нагрузку, составляют около 2%. Кроме того, значительная постоянная времени обмотки возбуждения затрудняет процессы регулирования. Большие неудобства в эксплуатации мотор-генераторов происходят из-за наличия вращающихся частей и щеточно-коллекторного узла токосъема; велики габариты и вес агрегата, ни-

зок его к.п.д. (для указанного выше АИГ: вес агрегата - 1500 кг; удельная мощность генератора  $P_{ген}^н = 80$  кг/квт; КПД=70%/). Тем не менее, в настоящее время мотор-генератор является одним из наиболее распространенных источников питания для средних СПС.

Униполярные генераторы (УГ) постоянного тока не дают пульсаций напряжения; их стоимость на 25% ниже стоимости соответствующих выпрямительных установок (см. ниже), предназначенных, например, для электролиза. Целый ряд других преимуществ УГ перед соответствующими коллекторными машинами (МГ) перечислен в /16, стр.20/. Необходимо отметить, что именно в области низких напряжений (1-2 вольта) и больших токов (свыше 5000 ампер) УГ как раз и проявляют все свои преимущества перед МГ, которые по условиям коммутации не могут удовлетворительно работать при напряжениях порядка 1 вольта.

Некоторые примеры выполненных УГ приведены в /16, стр.14/.

В МАИ /16, стр.245/ работы по теории, расчету, созданию опытных образцов и экспериментальному исследованию УГ с жидкометаллическим токосъемом проводятся с 1959 года. Ниже указываются параметры одной из последних моделей УГ, испытанных в МАИ в 1964 году: мощность - 10 квт.; скорость вращения - 9000 об/мин; напряжение - 2,5 вольта; ток якоря - 4000 ампер, возбуждение - независимое (мощность 170 вт.); к.п.д. - 78%; общий вес - 107кг; габаритные размеры - (355x320x385)мм<sup>3</sup>; относительный вес - 10,7 кг/квт.

В одной из лабораторий ФТИ (г. Донецк) соленоид с полем 10 кгс и внутренним объемом  $\emptyset$  8 мм x 40 мм. запитывался с помощью УГ, созданного в ОКБ г. Донецка /18/.

Фирмой International Research & Development Co. Limited /17/ в течение нескольких лет разрабатывались варианты проектов УГ, предназначенных специально для питания больших магнитов, использующих стабилизированные сверхпроводники. Принципиальное отличие этих УГ от указанных в /16/ - применение твердых щеток для токосъема. В частности, для Culham Laboratory был сконструирован УГ на 20 000 ампер; 50 вольт; кпд. = 94,5%; размеры продольного сечения - 61x53 дюйма<sup>2</sup>.

Большим достоинством МГ и УГ является относительная простота совмещения функций источника питания и эвакуации энергии из СПС в одном и том же устройстве. Для этого достаточно произвести переполюсовку генератора.

Причем, в течение короткого времени эвакуации возможно допустить значительную перегрузку (с помощью форсировки возбуждения). При такой эвакуации происходит рекуперация запасенной СПС энергии в сеть переменного тока через генератор (перешедший в двигательный режим) и двигатель (теперь работающий в режиме асинхронного генератора). Известное ограничение в режиме рекуперации может представлять только величина допустимого увеличения числа оборотов вала агрегата, которое происходит при рекуперации.

Наконец, к электромашинному типу источников питания СПС можно отнести и получающие за последнее время все большее развитие различного типа сверхпроводящие генераторы тока (С.Г.) и насосы потока (топологические генераторы с движущимся магнитным полем). Они имеют то преимущество, что выполняются обычно в общем криостате в виде комбинации генератор-соленоид. Поскольку в контуре генератор-соленоид практически отсутствует активное сопротивление, напряжение этих источников может быть очень малым. В /12/ приведена обзорная статья "Насосы потока и сверхпроводящие соленоиды" о

проведенных разработках в

The Kamerlingh Onnes Laboratorium, Leiden, Nederland.

/13, стр.545/ и /14, стр.98/ приводятся данные Philips Research Laboratories о сверхпроводящих генераторах малых размеров и простой конструкции на токи порядка килоампер. (Соленоид с внутренним диаметром 70 мм, наружным - 120 мм и высотой - 125 мм из 49-жильного Nb-Zr кабеля "заряжается" до поля 35 кгс постоянным током от одного из таких генераторов за 25 минут). Размеры СП генераторов: на 1 мв и 2400 а - Ø 60 ммх40мм; на 5 мв и 2500 а - Ø96ммх80мм (последний развивает напряжение 1 вольт при токах до 500 а).. D. Van Houwelingen, A. L. Luiten, Z. Volger

/13, стр.550/ приводят такую классификацию применимости сверхпроводящих генераторов: 1) источники тока для измерений характеристик образцов стабилизированных сверхпроводников;

2) источники тока для СПС средних размеров;

3) регуляторы тока, подпитывающие крупные соленоиды после их зарядки (с энергией вплоть до  $10^8$  Дж.).

### Б. Полупроводниковые выпрямители.

Отечественная промышленность освоила выпуск серий германиевых и кремниевых неуправляемых вентилях, обычных и с контролируемым лавинообразованием, и тиристоров. Так, выпускаются серии кремниевых вентилях на средние токи до 300 ампер и обратные напряжения до 1000 вольт и германиевые вентилях до 800 ампер при обратном напряжении до 150 вольт. Прямое падение напряжения в таких вентилях составляет 0,5 + 1,0 вольта.

Можно сказать, что в области напряжений от 10 вольт (и до 2000 вольт) КПД выпрямителей на полупроводниковых вентилях значительно выше, чем у мотор-генераторов ( 98% против 85%). Не

менее важны и такие преимущества, как долговечность, предельная простота эксплуатации, отсутствие подвижных частей, бесшумность работы, устойчивость внешней характеристики.

По сравнению с ИГ выпускаемые промышленностью выпрямители (кремниевые агрегаты) имеют: меньшую (в 4 раза) необходимую для установки площадь; меньшие эксплуатационные расходы (из-за меньшего в 15 раз времени, необходимого для проведения текущих ремонтов и профилактики) /19, стр.7/.

### Г. Использование управляемых вентиляей (тиристоров).

Тиристорные выпрямители /19, стр.8,22/ обеспечивают глубокое изменение выходных параметров в любом требуемом диапазоне; обладают высоким быстродействием и точностью автоматического регулирования; позволяют переводить преобразователь в инверторный режим и тем самым обеспечить рекуперацию запасенной СПС энергии в сеть.

Видимо, можно считать, что для источников питания СПС до 1000 ампер, самым лучшим является вариант тиристорного выпрямителя. В этом отношении может быть полезен опыт Радиотехнического ин-та АН СССР, г. Москва, где для указанных целей принят именно этот вариант источника.

Некоторое представление о современном уровне развития в производстве тиристоров в СССР и за рубежом дает /21/, /22/, /25/

Однако, такие выпрямители на большие токи требуют применения большого числа вентиляей, соединенных в параллельные группы; при этом система управления становится сложной, что снижает надежность всей системы в целом. Поэтому в ряде случаев приходится отказаться от применения тиристоров и изыскивать пути, обеспечивающие возможность регулирования выпрямленного напряжения выпрямителей, оборудованных простыми диодами (неуправляемыми вентиляями).



## II. Использование неуправляемых вентиляей.

Структурная схема источника питания на неуправляемых вентилях включает всегда выпрямитель, понизительный трансформатор и регулятор, изменяющий в необходимых пределах подводимое к трансформатору переменное напряжение.

Регуляторами в таких схемах могут служить, например:

- а) трансформаторы с подвижными катушками (трансформаторы Норриса) /20, стр.80/ ;
- б) схемы на тиратронах /23/ .
- в) дроссели насыщения, подмагничиваемые постоянным током /24/;

При использовании дросселей насыщения регулирование осуществляется плавно, практически с любой необходимой скоростью, высокая стабильность выпрямленного тока (до  $\pm 0,01\%$ ) легко достижима с помощью обмоток гибкой обратной связи. Дроссель насыщения может быть выполнен наружной установки и установлен вне лаборатории, тогда источник питания становится весьма компактным, простым и безопасным в эксплуатации.

В ЛВЭ ОИЯИ уже имеется опыт наладки источников питания в управлении дросселями насыщения типа КВТМС (мощностью 320 и 560 ква, масляное исполнение).

## III. Другие источники.

Следует отдельно указать на описанные в /12/ , /26, стр.54/ /27, стр.86/ сверхпроводящие выпрямители. Их принцип состоит в том, что по токовводам в криостат, в область низких температур, подается небольшой переменный ток, здесь он трансформируется в большой переменный ток, а затем выпрямляется с помощью сверхпроводящих криотронов. Так же, как и сверхпроводящие генераторы, эти

источники питания помещаются под крышкой криостата, в области гелиевых температур. В качестве примеров можно привести выполненные Т.А. Buchhold ( General Electric Company ) , /13, стр.536/ в 1965 г. модели таких выпрямителей: 1000 а. при мощности 15 ватт и 625 ампер ( $\sim 30$  мв) при  $P \sim 20$  вт. Последняя модель имела кпд = 94%, с помощью неё СПС из  $Nt_3Sn$  успешно заряжался до 100 кгс.

II. Источники питания до 600 ампер, действующие в крио-  
генном отделе ЛВЭ.

За основу источников питания до 600 ампер приняты нерегулируемые селеновые выпрямители типа ВУ-12/600А, электрическая схема которых переделана таким образом, что автоматический ввод тока в соленоиды можно производить в широком диапазоне скоростей (от 2 а/мин). Обычно скорость ввода тока в соленоиды, обладающие значительной индуктивностью, выбирается по величине индуктивного отброса на концах обмотки СИС. В наших опытах эта величина 50+100 мв.

Паспортные данные ВУ-12/600А:

1) питание - 380/220 вольт, 50 гц;

2) потребляемые в номинальном режиме:

ток - 23 ампера;

мощность - 12 квт.

3) выпрямленные при номинальной нагрузке:

ток - 600 ампер;

напряжение - 6-9-12 вольт;

мощность - 7,2 квт.

4) вес выпрямителя - 165 кг, складнение принудительное воздушное.

Выпрямитель № I в качестве регулятора напряжения использует автотрансформатор с короткозамкнутой обмоткой (трансформатор Нориса) /20/ типа АТСК-25/0,5 /рис.1/, паспортные данные которого следующие:

мощность - 25 ква.

число фаз - 3;

сторона высокого напряжения - 380в; 57 а;

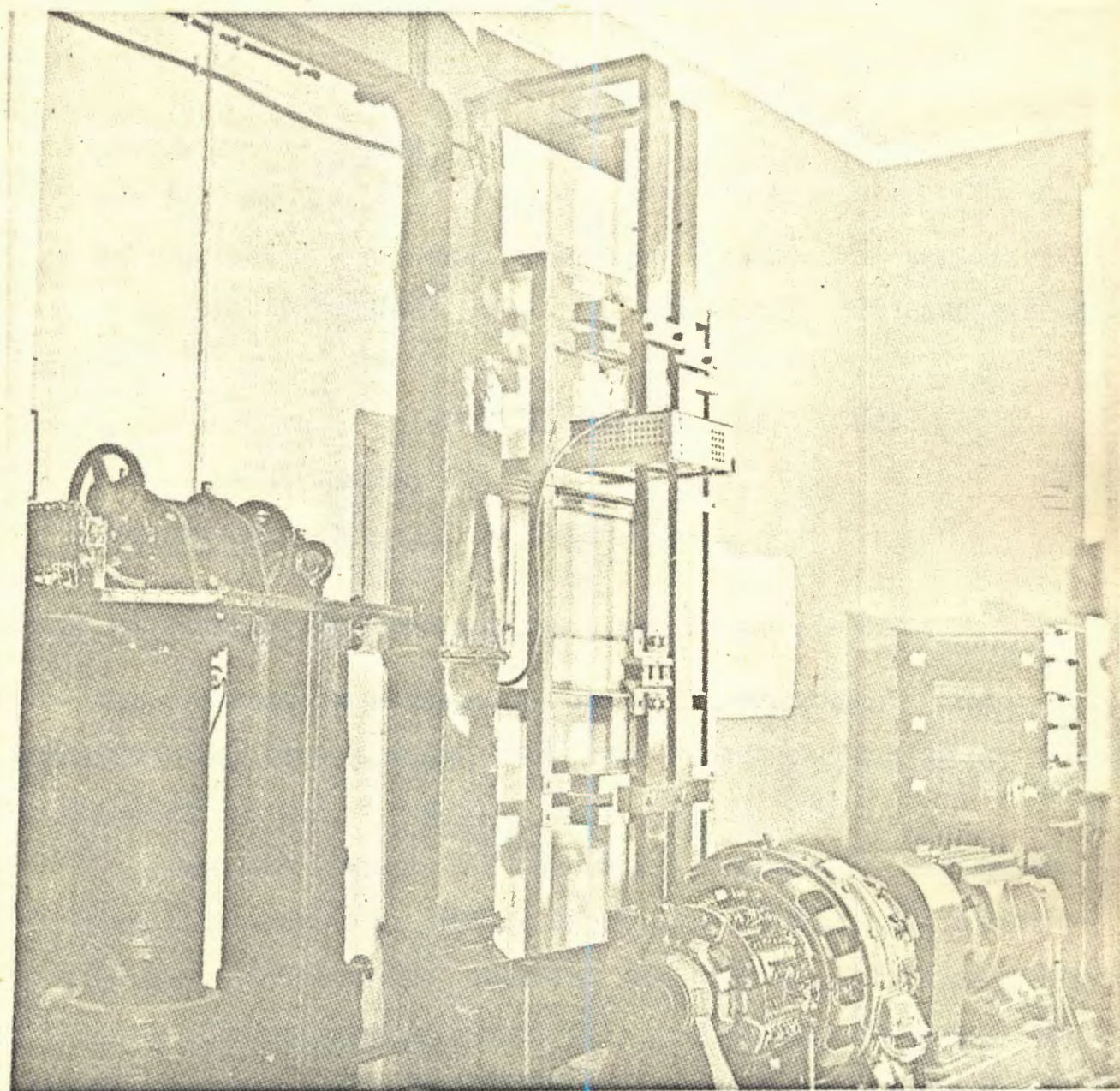


Рис. 1. Регулятор напряжения /АТСК/ для  
ВУ-12/600А № 1 и общий вид мотор-генератора АНГ

сторона низкого напряжения -  $38 + 380$  в; 38 а.

привод регулирующей короткозамкнутой обмотки - дистанцион-  
ный, моторный  
и ручной;

исполнение - сухое;

вес - 860 кг.

Выпрямитель № 2 работает совместно с трехфазным регулятором  
напряжения типа РНТ-220-12 со следующими паспортными  
данными:

питающая сеть - 127/220в, трехфазная, 50 гц;

ток - 24/32 ампера;

пределы регулирования -  $0 + 220$  вольт.

Данные по наладке выпрямителей приведены в таблице №1.

Разработанные и выполненные схемы дистанционного управления,  
регулирования, сигнализации, измерения выпрямителей и защиты СПС  
представлены на рис. 2, 3, 4, 5

В случае выпрямителя № I (рис. 3, 4) 3-х фазное напряжение  
380 вольт через контакты магнитного пускателя  $МН_2$  и предохра-  
нители (в шкафу выпрямителя) подается на АТСК-25/0,5. Регулируемое  
с помощью АТСК напряжение трансформируется и выпрямляется (транс-  
форматор выпрямителя имеет  $K_T \approx 35$ ; схема выпрямления трехфазная  
двухполупериодная, тип выпрямителя по новым техническим условиям  
ИЗОВТ42А7У). Для обеспечения включения выпрямителя на СПС  
с минимальным током предусмотрены блок-контакты положения АТСК в  
цепи магнитного пускателя  $МН_2$  (рис. 4).

Защита СПС (отключение выпрямителя при начале перехода его  
обмотки в нормальное состояние) осуществляется с помощью релейно-  
го блока, включающего в себя поляризованное реле РН-5 и промежу-

Таблица №1 Электрические параметры в отдельных участках  
схемы последовательно для выпрямленных токов 50, 150, 290, 440 и 500 ампер  
на нагрузку  $R_{дог} = 0,0117 \text{ ома}$ .

Т а б л и ц а № 1.

Выпрям- ленный ток	Выпрям- ленный напряж.	Нагрузка (ом)	Напряжение на первичн. стороне тр- ра выпрямит. и рег. (вольт) по клеммам рис. 7/29/	Напряжение на вторичн. стороне тр- ра выпрямит. и 2 (вольт) (линейные)	Потреб. из сети (квт.)	Мощности		КЭВ/кВт	КЭД выпр. Р вып Р рег	Амплитуд- ная пульса- ция в кривой выпрямлен. напряж. (вольт)	Токи в схеме рис. 7/29/ соответ- ственно по У1/2/24 фазные (а)
						передв. от регу- лятора к выпрям. Р рег. (квт)	постоян. тока, потреба на нагруз- ке R, Р вып. (квт)				
I		3	4	5	6	7	8	9	10	II	
50	0,58	0,0116	кв. 3-7 → кв. 7-12 → кв. 3-12 → кв. 3-0 → кв. 7-0 → кв. 12-0 →	34 34,5 30,5 17,5 22 17,5	1,02  I, 8 I, 8	0,066	0,029	45	0,2	2,1,5; I I, 5; I, 0; I 2, 1, 2; I, 2	
150	1,76	0,0117	-//-	61 62 58 32 36 31	1,77  3,4 3,1 3,1	0,64	0,264	41	0,37	3,2, 9; I, 6 I, 2, 2, 2, 2, 8 6, 5, 6; 6, 6	

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II
290	3,55	0,0122	97 99 95 53 57 51	5,2 5 5	3,69	1,96	1,73	52	0,35	5,6 5,8 4,8 5,2 4,2 5 II,7 I2,2 II,8
440	5,45	0,0124	I35 I36 I33 73 73 70	7,1 6,8 6,8	7,16	4,2	2,4	57	0,46	10,5 II,5 9,6 9,2 II 10,2 18,4 I8 17,8
500	6				8,87	4,8	3,0	62		I3,1 I3,9 I2 II,6 I3,5 I2,8 I9,6 20,2 20

х) Сопротивление кабелей КРПТ-3х 70+1х35 0,0012 ома

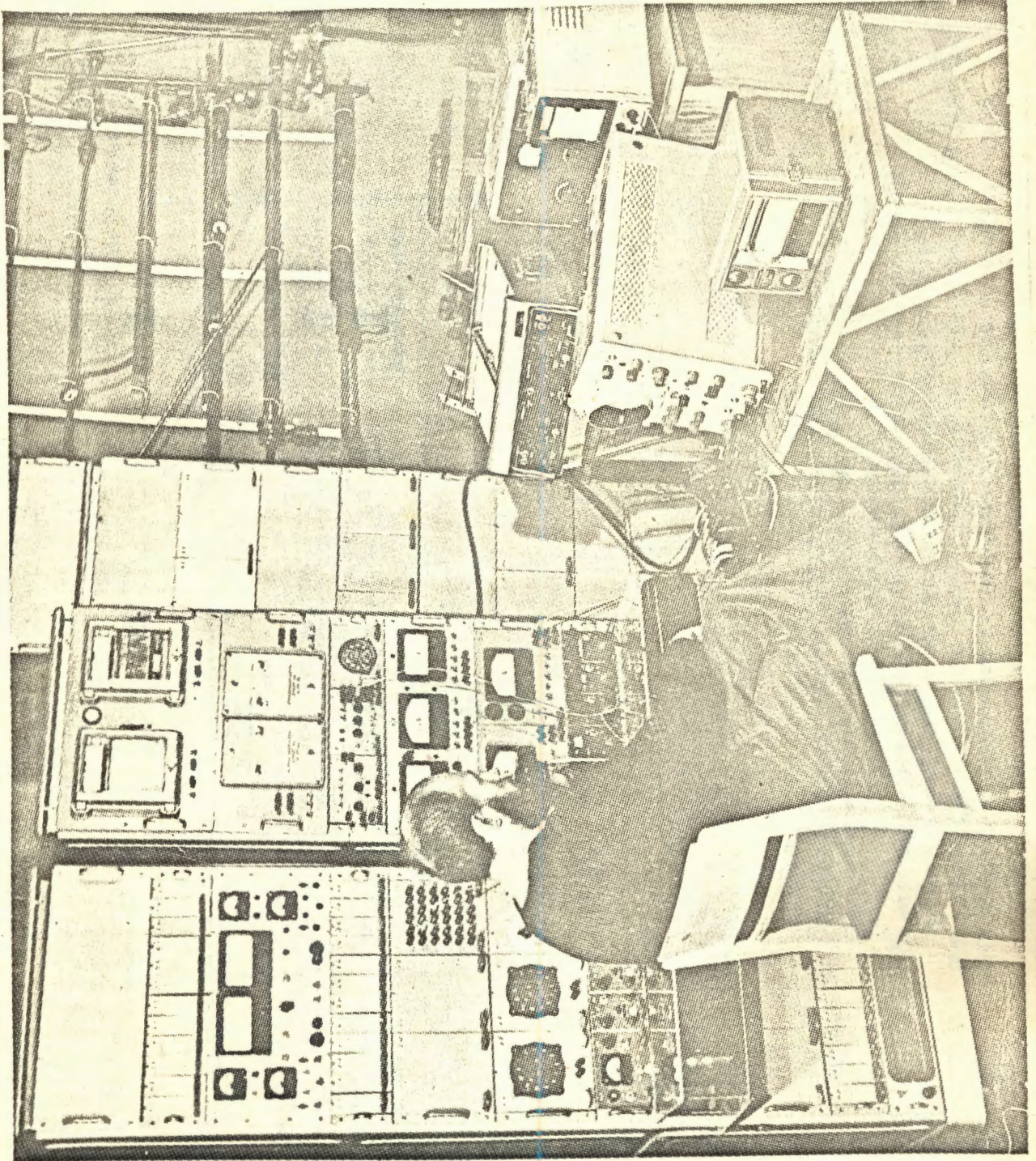


Рис. 2      Общий вид установки для снятия характеристик  
коротких образцов



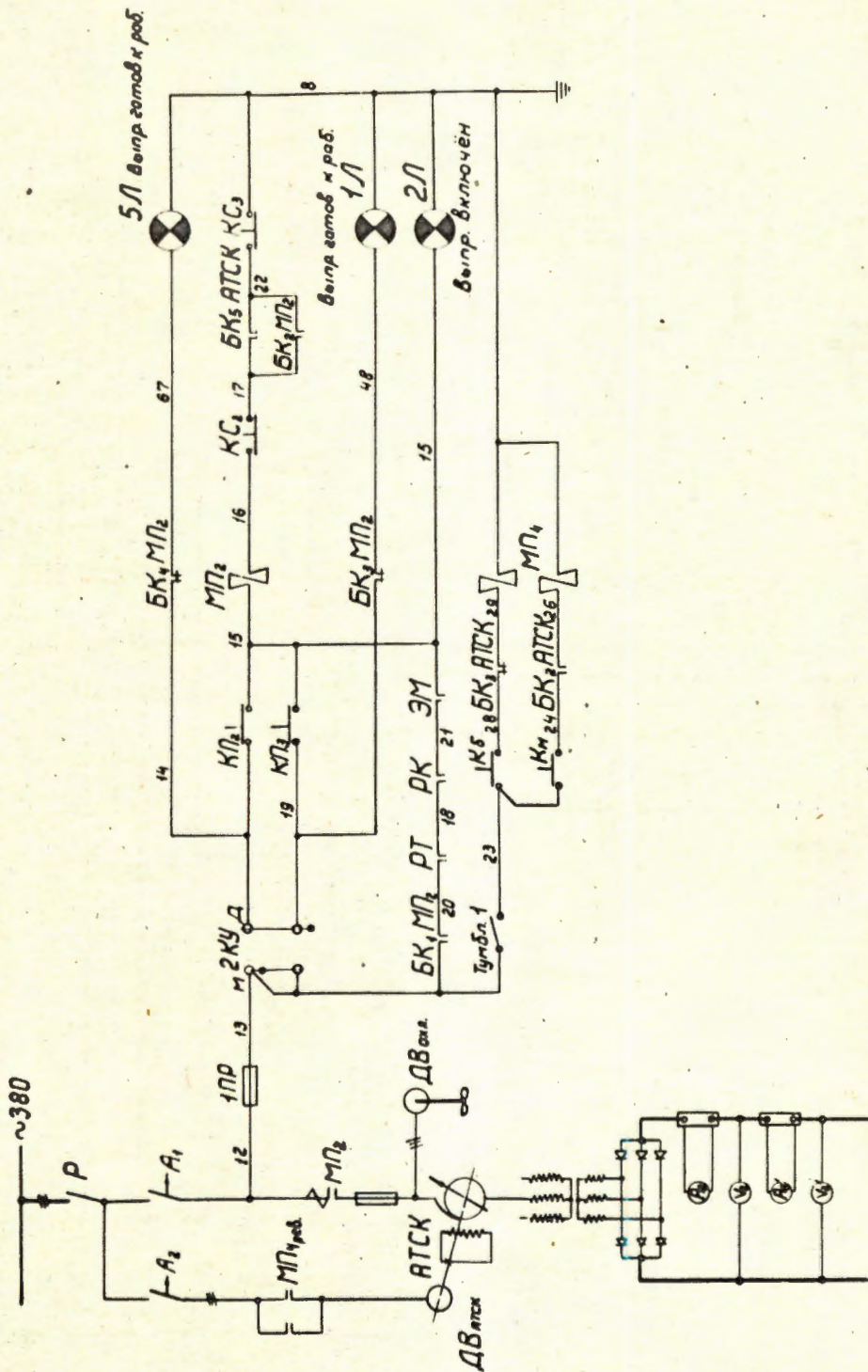


Рис. 3 Принципиальная схема управления, регулирования и сигнализации выпрямителя ВУ №1 12/600С

АТСК-25/0,5.

Принципиальная схема управления, регулирования и сигнализации выпрямителя ВУ 12/600 с АТСК-25/0,5

Условные обозначения:

РТ-контакт теплового реле (нагреват элемент включён на 1л втроричной обмотки трансформатора ВУ-12/600)

ЭМ-электромагнитное реле (контроль по току на выходе ВУ-12/600)

РК-релейный контакт (контроль охлаждения селеновых шайб)

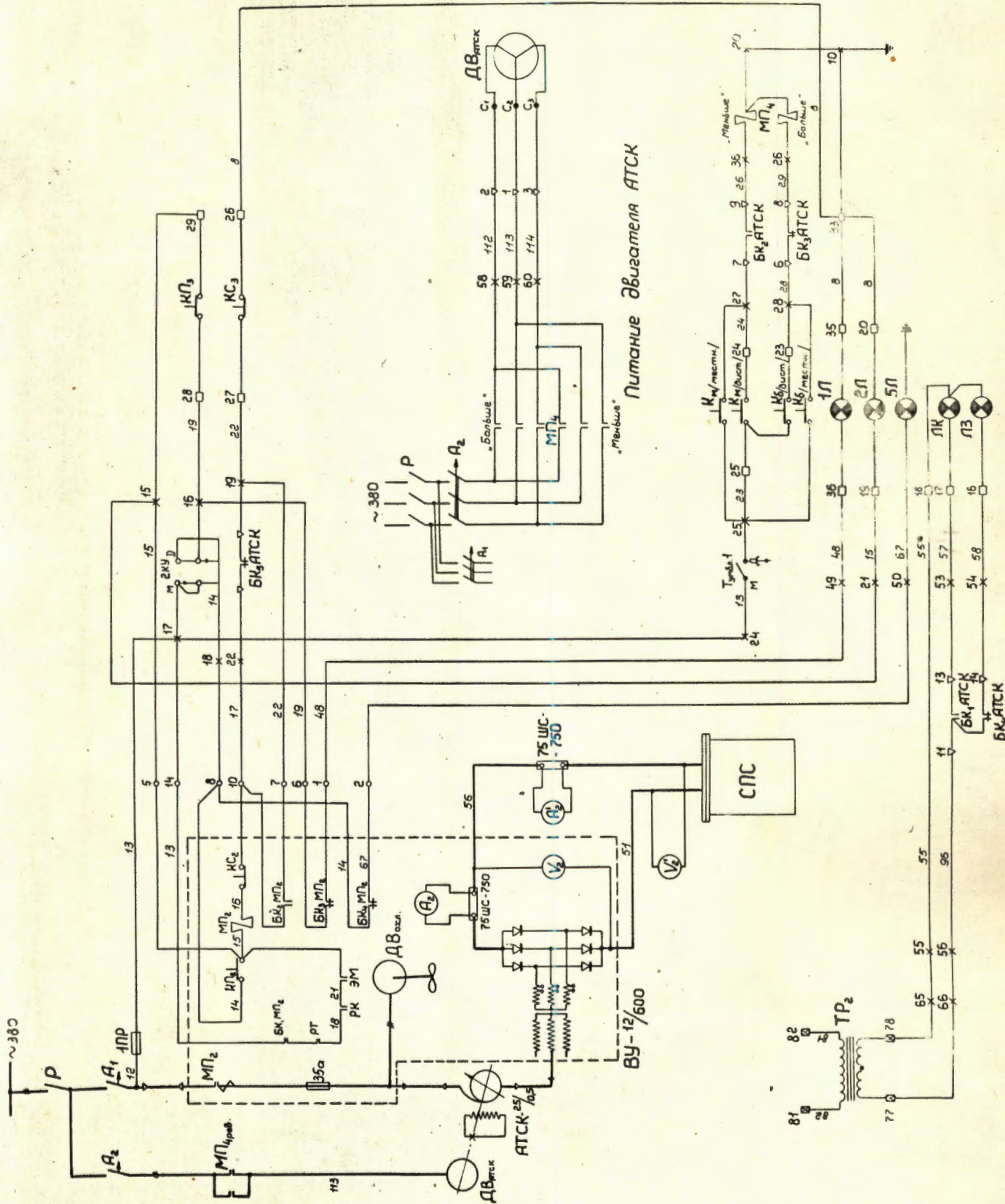
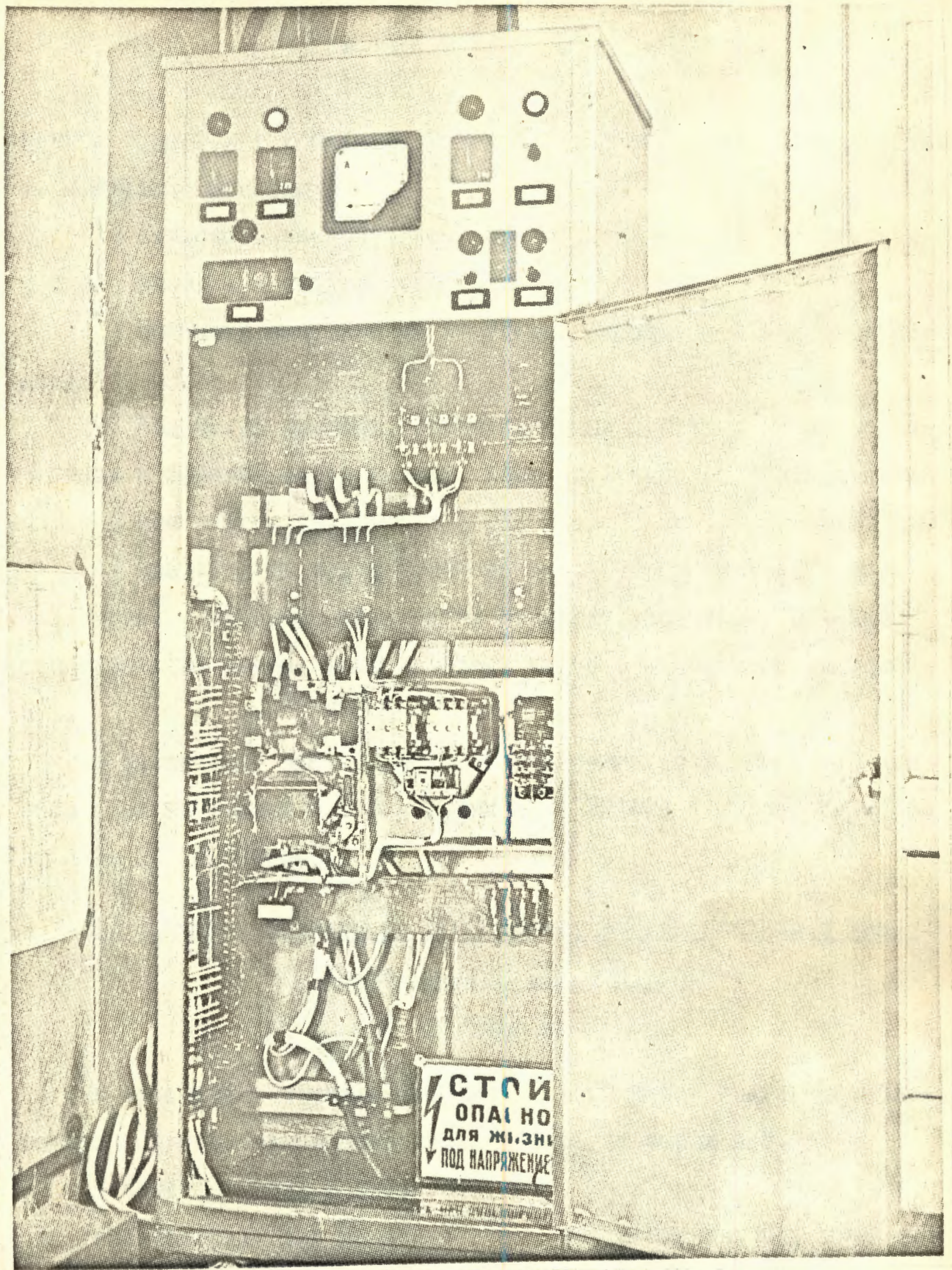


Рис. 4

Схема цепей управления, защиты, измерения, регулирования и сигнализации выпрямителя  $\text{BU-12/600A}$



СТОЙ  
ОПАСНО  
для жизни  
ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

Рис. 5. Вводной шкаф питания

точные реле РСМ-1 и МКУ-48. Релейный блок может осуществлять также следующие функции:

- 1) отключать измерительные приборы, включенные на чувствительные шкалы при запитке соленоида;
- 2) подавать импульсы на включение элементов схемы эвакуации;
- 3) запускать приборы, регистрирующие характер перехода соленоида и эффективность работы схемы эвакуации энергии (самописцы, осциллографы и др.).
- 4) производить поиск "слабого места" в стабилизированном соленоиде, с которого начинается переход, для чего в релейном блоке собрана специальная мостовая схема с выходом на осциллограф.

В заключение необходимо отметить возможность параллельной работы выпрямителей № 1 и № 2 типа ВУ-12/600А в диапазоне токов от нуля до 1200 ампер.

III. Источник питания до 5000 ампер, смонтированный в криогенном отделе ЛВЭ для работ с крупными СПС.

В качестве источника питания до 5000 ампер применен низковольтный электропреобразовательный агрегат серии АНГ.

Паспортные данные АНГ:

генератора: тип НГ -  $\frac{5000}{2500}$ , двухколлекторный, открытого исполнения;

мощность / - 30 квт;

напряжение - 6/12 в.;

ток - 5000/2500 ампер;

число оборотов - 970 об/мин.

вес - 850 кг,  
возбуждение - независимое.

двигателя: тип А2-82/6  
мощность - 40 кВт,  
напряжение - 220/380 в,  
ток - 130/75 а;  
вес - 318 кг.

Разработанная и выполненная схема дистанционного управления, регулирования, измерения и сигнализации АНГ при работе с СПС представлена на рис. 7,8. Внешний вид агрегата представлен на рис.1. Данные по наладке АНГ приведены на рис.9,10,11

Поскольку СПС как нагрузка представляет собой нулевое активное сопротивление, а шинный мост на 5000 а, соединяющий АНГ и СПС, очень короткий (~ 3 метра), режим работы генератора близок к режиму короткого замыкания (номинальная омическая нагрузка - 0,0012 ома; эксплуатационная - 0,0002 ома). В этих условиях необходимо, обеспечить плавное (в широких пределах изменения скорости) регулирование тока нагрузки генератора. Первым решением этой задачи явилось возбуждение генератора от схемы "мостика" (рис6,7,8). Схема "мостика" позволяет (за счет частичного развозбуждения генератора и компенсации, таким образом, остаточной намагниченности полюсов обмотки возбуждения) включить генератор на нагрузку с нулевым значением тока, Это особенно важно при работе генератора на безиндуктивную нагрузку (испытание коротких образцов сверхпроводников и др.). Минимально возможный ток генератора (при нагрузке 0,0002 ома) без развозбуждения составляет ~ 300 ампер.

Схема независимого возбуждения генератора позволяет осу-

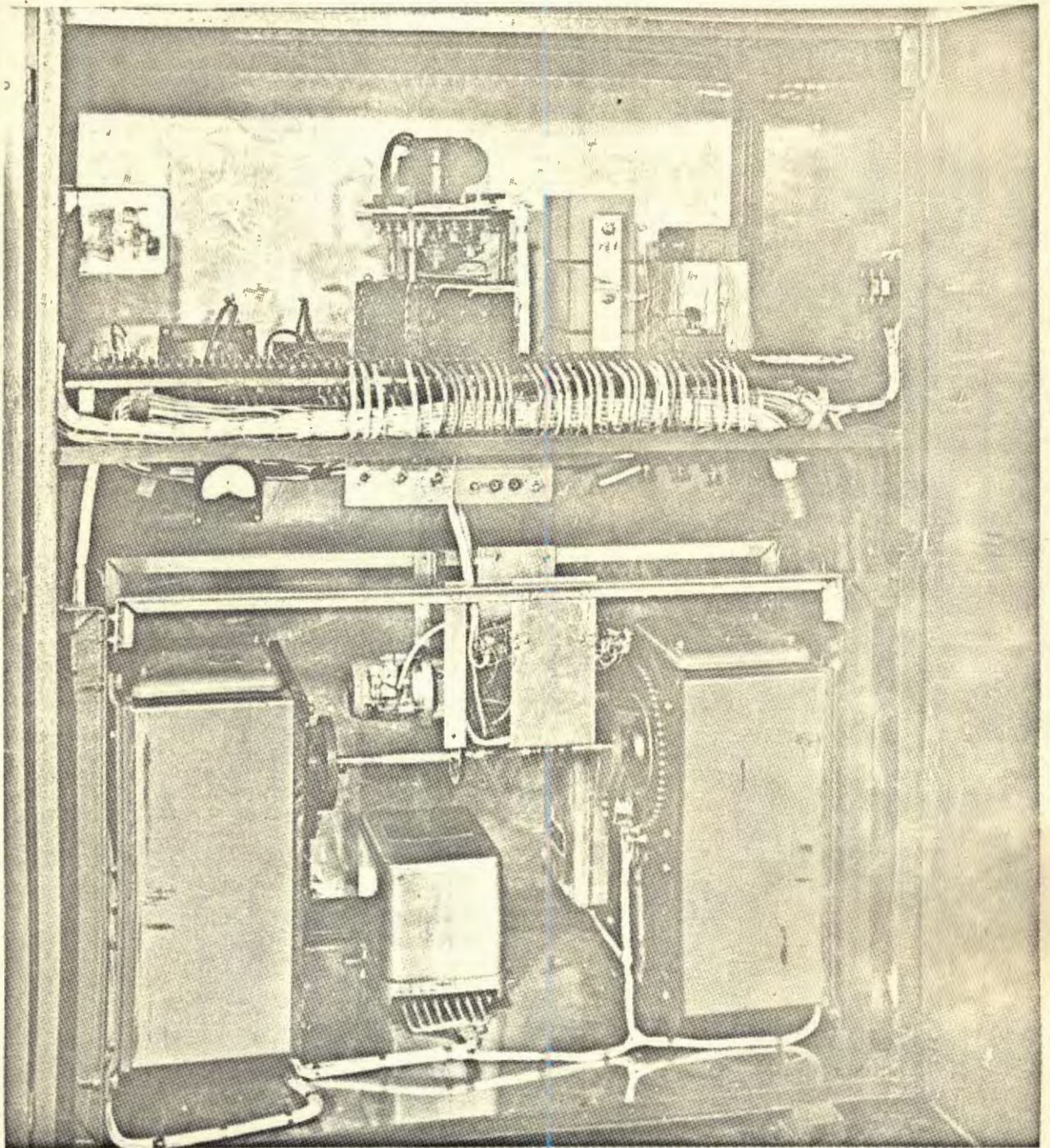
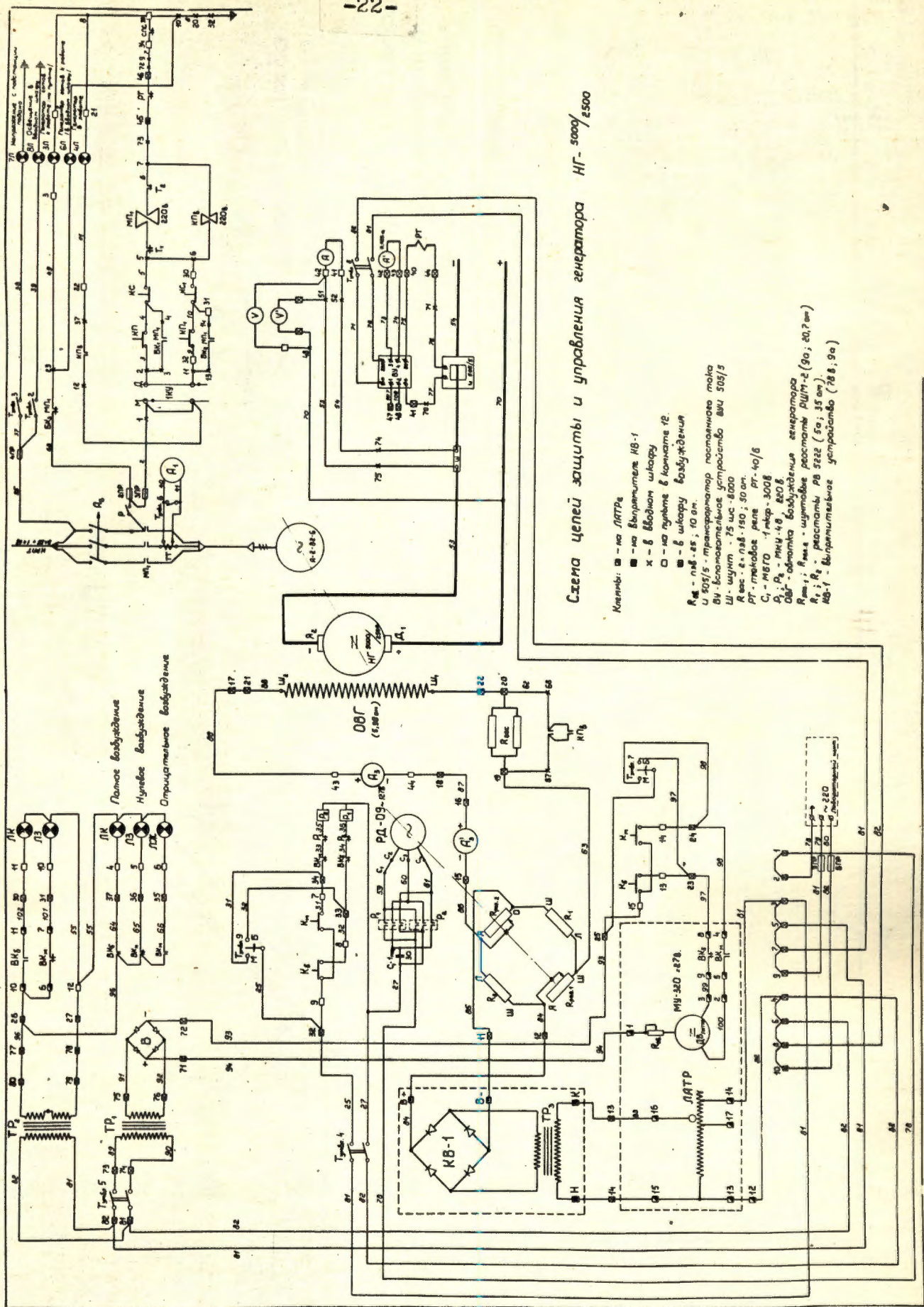


рис. 6

Шкаф возбуждения генератора.



Схема цепей защиты и управления генератора НГ-5000/2500

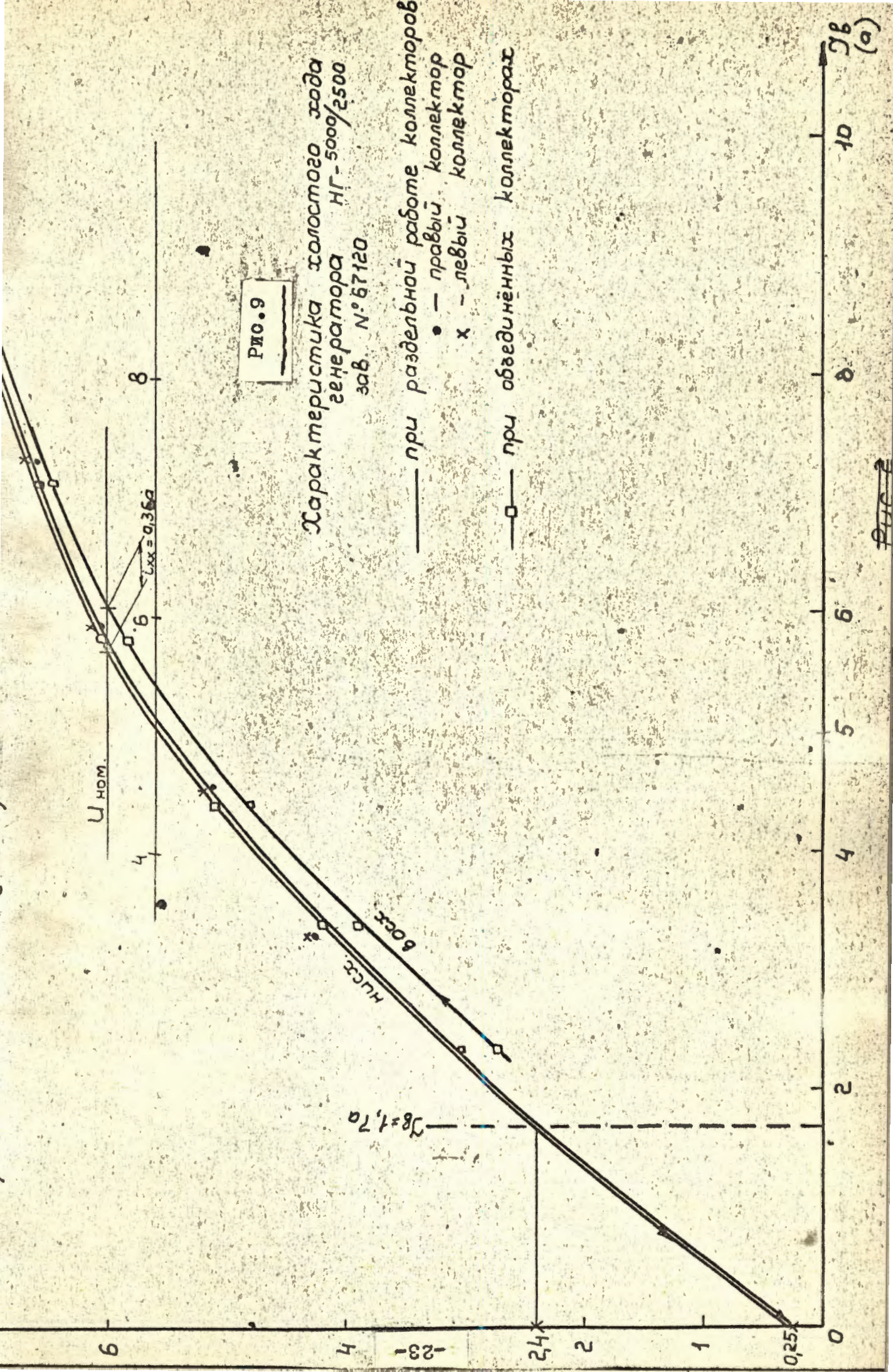


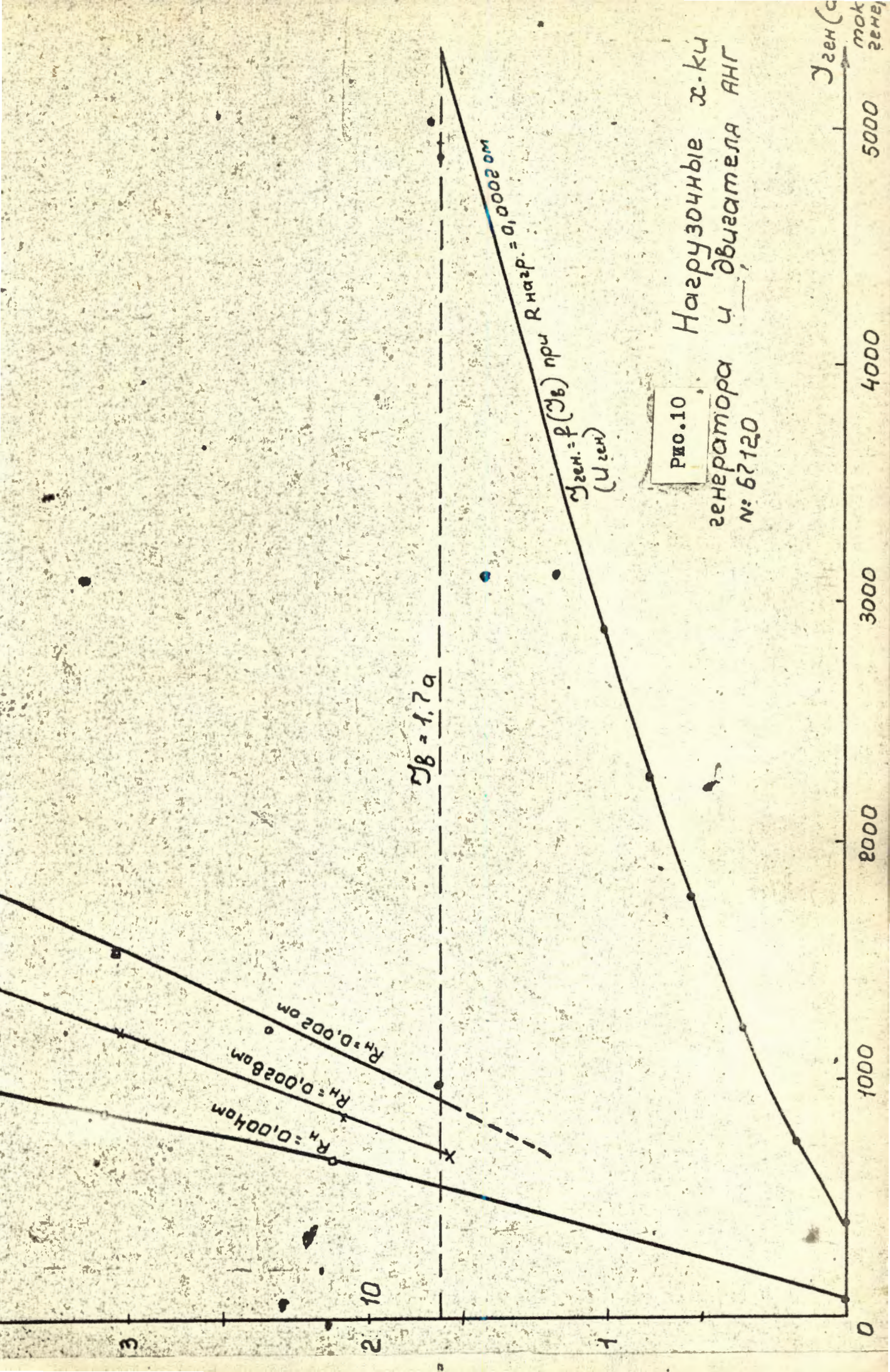
- Клеммы: □ - на ЛАПР  
 ■ - на выкатителе КВ-1  
 х - в вводном шкафу  
 □ - на пульте в комнате 12  
 ■ - в шкафу возбуждения  
 R<sub>к</sub> - плав. 45; 10 ам.  
 и 50/5 - трансформатор постоянного тока  
 ВУ - вспомогательное устройство ВУ 505/5  
 Ш - шунт - 75 мс - 8000  
 R<sub>к</sub> - рез. плав. 150; 50 ам.  
 РТ - тепловое реле РТ-40/6  
 С<sub>1</sub> - МВГО - 1 мкФ - 300 В  
 Р<sub>1</sub>; Р<sub>2</sub> - МКУ - 4 В 250 В  
 ОБГ - обмотка возбуждения генератора  
 R<sub>1</sub>; R<sub>2</sub> - резисторы расщепл. РШТ-2 (90; 20,7 ом)  
 R<sub>3</sub>; R<sub>4</sub> - резисторы РВ 5222 (50; 35 ом)  
 КВ-1 - выкатываемое устройство (288; 9а)

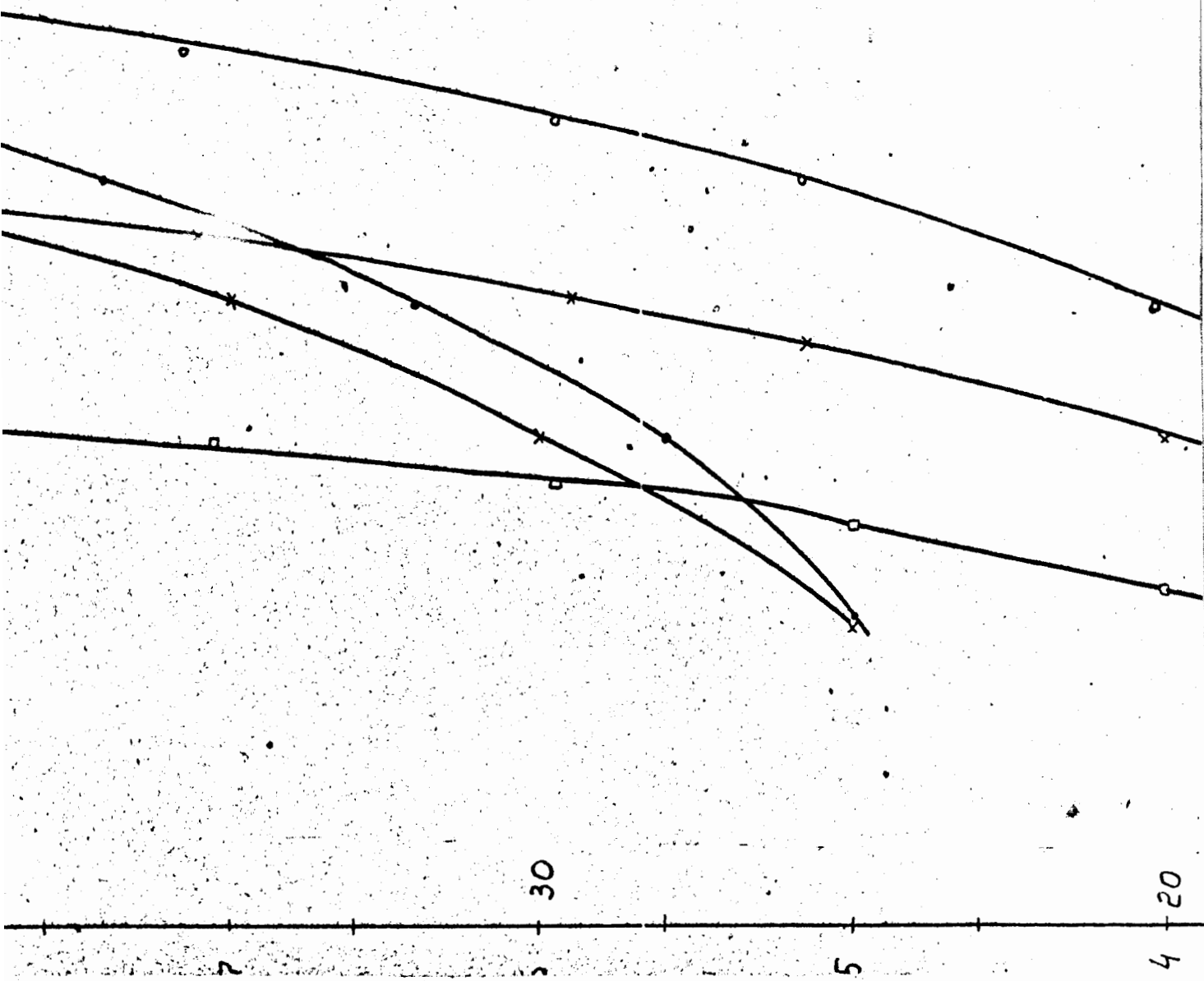
Рис. 8

Схема цепей защиты и управления генератора НГ-5000/2500.



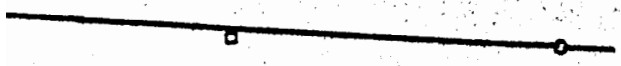






$I_B(a)$  - ток возбуждения  
 $I_{AB}(a)$  - ток двигателя

50



$I_{ген} = f(I_B)$  при  $R_{нагр} = 0,0028 \text{ ом}$

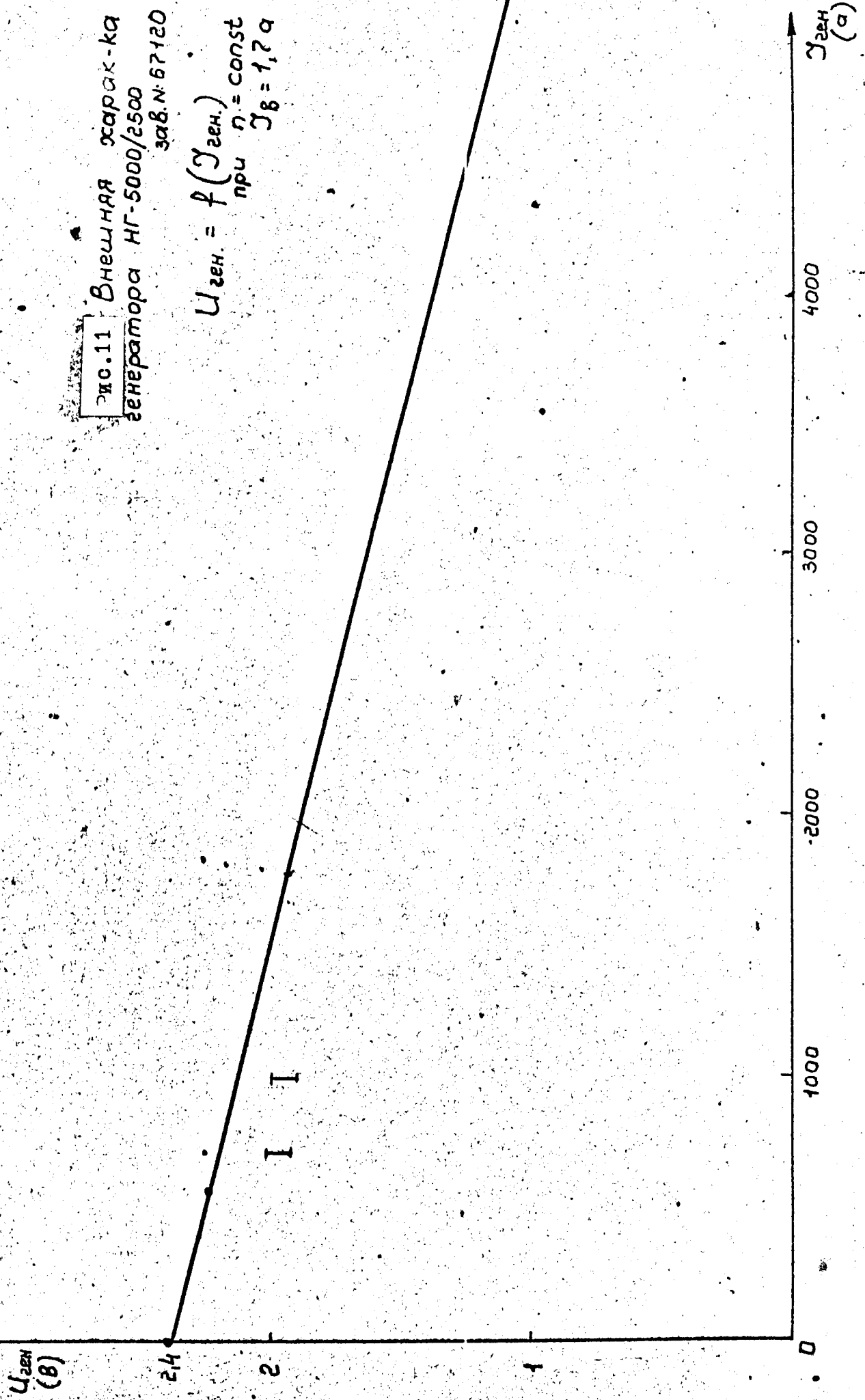
$I_{AB} = f(I_{ген})$  при  $R_{нагр} = 0,0028 \text{ ом}$

$I_{ген} = f(I_B)$  при  $R_{нагр} = 0,002 \text{ ом}$

$I_{AB} = f(I_{ген})$  при  $R_{нагр} = 0,002 \text{ ом}$

рис. 11 Внешняя харак-ка генератора НГ-5000/2500 заг. N: 67120

$U_{ген.} = f(U_{ген.})$   
при  $n = const$   
 $U_B = 1,7 a$



ществить эвакуацию энергии, запасаемой магнитным полем СПС, рекуперацией ее в сеть. Это достигается переполосовкой и форсировкой возбуждения. Схема возбуждения генератора, обеспечивающая более плавное регулирование тока нагрузки и позволяющая применять режим рекуперации, в настоящее время разрабатывается.

Полученные при наладке характеристика холостого хода генератора, нагрузочные характеристики генератора и двигателя, а также внешняя характеристика генератора приведены на рис. 9, 10, 11. Пульсации напряжения якоря генератора при работе на чисто активную нагрузку не превышают:

1,7% при нагрузке 0,004 ома и токах до 1700 а,

1,2% при нагрузке 0,0002 ома и токах до 5000 а.

После необходимой притирки щеток генератор может работать при токах, несколько превышающих 5000 ампер.

Измерение тока генератора производится с помощью трансформатора постоянного тока типа И505, а также сухим шунтом на 75 мв.

В цепи катушки магнитного пускателя МП<sub>I</sub> (рис. 8) предусмотрены Н.З. контакты выходного реле (МКУ-48) релейного блока (на схеме рис. 8) они обозначены "СПС"). Благодаря этому, в начале процесса перехода СПС в нормальное состояние происходит отключение двигателя АНГ от сети. Одновременно (контактами реле КП<sub>B</sub>) в цепь возбуждения генератора вводится гасительное сопротивление  $R_{гас} = 25 \text{ ом}$ . В результате происходит быстрое прекращение подачи тока от генератора в СПС. Оборудование и аппараты, разрывающие рабочий ток соленоида (выключатель воздушный автоматический типа АВ-45-1/6000) и осуществляющие аварийную эвакуацию запасенной энергии (автомат гашения поля типа АПП -60-42 или гасительные сопротивления из ЯС-2) в данной работе не рассматриваются.

Проверка нагрева токоведущих частей под напряжением производится электротермометром типа ЭТ-1, укрепленным на изолирующей штанге (производства ЦВЛ Мосэнерго). Эта мера предосторожности необходима, т.к. переход СПС в нормальное состояние возможен практически в любой момент работы СПС.

Наладка всего электрооборудования произведена в соответствии с ПУЭ /28/ и /29/

#### IV. ВЫВОДЫ.

1. Источники питания для электроснабжения СПС и исследований по сверхпроводимости <sup>действующие</sup> в криогенном отделе ЛВЭ, охватывают весь необходимый диапазон рабочих токов (вплоть до 5000 а).

2. Рассматриваемые источники питания могут быть применены для изготовления стабилизированных ленточных сверхпроводников на большие критические токи (по электролитической технологии).

3. Сверхпроводящий соленоид СПС<sub>40</sub>-1 с внутренним диаметром 40 мм. и весом около 40 кгс /30/ запитывается от выпрямителя № 2 достаточно легко и надежно.

4. С помощью выпрямителя № 1 сняты критические характеристики коротких образцов сверхпроводящей проволоки типов НЦ-50, НЦ-75, 60Т, СС-2 при различной степени стабилизации их нормальным металлом. Для этой цели разработаны и выполнены целый ряд измерительных штоков, позволяющих производить работу с 23 образцами одновременно.

5. Для обеспечения проектируемых более крупных и повышения критических характеристик созданных СПС, а также для исследований стабилизации сверхпроводников необходимо:

а) стабилизировать режимы работы источников питания (в частности, стабилизировать питание 380/220в для выпрямителей);

б) расширить диапазон скоростей и увеличить плавность регулирования тока при автоматической запитке соленоидов и коротких образцов;

в) осуществить схемы эвакуации энергии, запасенной соленоидами, применив, в частности, реуперацию (через агрегат АНГ);

г) разработать и изготовить более совершенный датчик срыва сверхпроводящего состояния СПС, не реагирующий на „скачки потока” в сверхпроводящей обмотке и на индуктивную составляющую напряжения, возникающего в обмотке СПС при запитке и эвакуации энергии;

6. Для проведения сравнительного выбора наиболее подходящих для постоянной работы с крупными СПС источников питания необходимо разрабатывать и вводить в действие и другие источники питания, описанные во введении.

И. Анис  
28. VII. 69.

Трих  
27. VII. 69.



### Литература:

- /1/ Japan Journal of Applied Physics, v.7, N 3, 291-292, 1968.
- /2/ Phys.State Solid, 28, K63-65, 1968.
- /3/ Phys.Letters, v.27A, N 9, 631, 1968.
- /4/ Cryogenics, v.7, N 1, 26, 1967.
- /5/ IEEE Transactions on Magnetics, v. Mag.3, N 3, 277, September, 1967.
- /6/ Сверхпроводящие соленоиды. Перевод с английского В.П. Карцева и Н.Н. Михайлова. Под ред. Н.Е. Алексеевского "Мир" 1965 г. , стр. 37.
- /7/ IEEE Transactions Magnet, 2, N 3, 369, 1966.
- /8/ Cryogenics, 4, N 4, 206, VIII, 1964.
- /9/ Phys. Letters, 7, N 4, 227, 1/XII - 1963.
- /10/ Пятиметровая жидководородная пузырьковая камера. Часть 2. Криовенные системы и сверхпроводящий соленоид. Препринт ОИЯИ 8-3316.
- /11/ Е.Я. Казовский и др. Сверхпроводящие магнитные системы, стр. 120-164, "Наука", 1968 г.
- /12/ Physica, Deel 31, N 4, 413-443, April 1965.
- /13/ Liquid Helium Technology International Institute of Refrigeration, Commission 1, Boulder(U.S.A.), 1966, p. 529-553.
- /14/ Advances in Cryogenic Engineering, N 11, p. 98, 1965.
- /15/ The Superconducting Magnet System for the Argonne 12-Foot Bubble Chamber. Design Report. ANL/HEP 6813. Compiled by P.G.Marston. June 1968.
- /16/ А.И. Бертинов и др. Униполярные электрические машины. Энергия, 1966 г.
- /17/ A.D.Appleton. "Homopolar Generator for Providing High Currents to Stabilized Superconductors" The 2nd Int. Conf. of Magnet Technology. Oxford, 1967.

- [18] В.А. Ядрошников, И.Ф. Ватулин (ФТИ, Донецк) "Применение уни-Полярного генератора в качестве источника питания сверхпроводящего соленоида" (Доклад, представленный на У Всесоюзное совещание по физико-химии, металлосведению и металлофизике сверхпроводников. 27-29/У. (1968 г.)
- [19] Е.И. Беркович и др. Полупроводниковые выпрямители. Под ред. Ф.И. Ковалева и Г.П. Московской. "Энергия", 1967 г.
- [20] Б.П. Терентьев. Электропитание предприятий связи. "Связь" 1966 г.
- [21] Силовая полупроводниковая техника. Сборник подготовлен Мордовским НИ электротехническим ин-том. Информстандартэлектр Москва, 1967 г. Вып. УП.
- [22] Силовые полупроводниковые приборы и установки. Сборник подготовлен ВЭИ им. Ленина. Информстандартэлектр, Москва, 1967 г.
- [23] И.Л. Каганов. Электронные и ионные преобразователи. Часть II. Госэнергоиздат. 1955 год.
- [24] Ю.Г. Толстов. Силовые полупроводниковые выпрямители, управляемые дросселями насыщения. "Наука", 1968 г.
- [25] Н.Х. Ситник. Силовая полупроводниковая техника. "Энергия", 1968 год.
- [26] Сверхпроводимость и ее применение в электротехнике. Переводы статей под ред. Б.К. Буль и Б.М. Тареева. "Энергия". 1964 г.
- [27] В.Г. Фастовский и др. Криогенная техника. "Энергия", 1967 г.
- [28.] Правила устройства электроустановок. Изд. 4. "Энергия". 1965г.
- [29.] Объем и нормы испытания электрооборудования, "Энергия", 1965г.
- [30.] "Сверхпроводящий соленоид на 40 кгс из паяной стабилизированной ленты". Доклад на 15 Всесоюзной конференции по физике низких температур, г. Тбилиси, 1968г.