

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



Ц 84 8

B-216

12/1-74

10 - 7617

1837/2-74

К.Ваттенбах, В.М.Котов, Р.Позе, А.Е.Селиванов

АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ  
В СХЕМЕ ОБРАБОТКИ ТРЕКОВОГО СИГНАЛА  
"СПИРАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ"

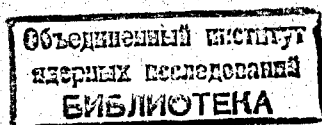
**1973**

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ  
ТЕХНИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ

10 - 7617

К.Ваттенбах, В.М.Котов, Р.Позе, А.Е.Селиванов

АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ  
В СХЕМЕ ОБРАБОТКИ ТРЕКОВОГО СИГНАЛА  
"СПИРАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ"



## ВВЕДЕНИЕ

При автоматической обработке камерных снимков изменения прозрачности пленки в поле кадра могут создавать помехи. Однако пространственная реконструкция следов частиц требует большой точности при измерении координат точек на треках. Поэтому, разрабатывая автоматические устройства для измерения камерных снимков, в схемах обработки трекового сигнала необходимо исключить влияние изменения фона.

Во время разработки "Спирального измерителя" в Дубне был предложен вариант метода<sup>1/</sup>, рассчитанного на темные изображения пузырьков на светлом фоне. /Вариант для светлых изображений пузырьков на темном фоне также исследуется/.

В "Спиральном измерителе" положение пузырьков на треках измеряется в полярных координатах, причем радиус  $R$  в процессе измерения изменяется более чем в 100 раз<sup>2/</sup>. Это обстоятельство требует, чтобы кривая пропускания тракта усиления трекового сигнала изменялась в соответствии с радиусом сканирования, однако при этом ширина полосы пропускания должна оставаться неизменной. Только таким образом можно достичь примерно постоянного отношения сигнала к шуму во всем диапазоне изменения  $R$ .

## ПРИНЦИП РАБОТЫ

Анодный ток фотоумножителя легко изменяется в широкой области /на два порядка/, если изменять напряжение между анодом и последним динодом при условии, что напряжение питания  $U_{ак}$  и освещенность фотокатода остаются постоянными, а анодный ток измеряется прибором с низким внутренним сопротивлением. На *рис. 1* приведена зависимость анодного тока от напряжения анод-динод для некоторых умножителей. Измерение проводилось при указанных условиях. Кривые показывают некоторое насыщение в области отрицательных напряжений на диноде. Это означает, что все вторичные электроны, которые испускаются последним динодом, долетают до анода. При увеличении потенциала динода часть вторичных электронов задерживается вблизи него, образуя пространственный заряд. При этом число электронов, долетающих до анода из облака пространственного заряда, зависит от величины и знака напряжения между анодом и динодом. Кроме того, пространственный заряд способствует тому, что отношение сигнала к шуму в анодном токе выше, чем отношение сигнала к шуму в катодном токе. В связи с этим желательно, чтобы при световом потоке с модуляцией в направлении уменьшения света фотоумножитель работал в режиме пространственного заряда, в то время как при импульсной световой модуляции этот режим менее удобен. Из *рис. 1* также видно, что управляющие напряжения находятся в рабочих пределах интегральных операционных усилителей.

Заметная разница обнаруживается между умножителем EM1 9656A /см. *рис. 1*/ и двумя другими типами умножителей относительно крутизны характеристики  $I_a = f(U_d)$ , что связано с различием в конструкции этих умножителей. Будучи умножителем типа "жалюзи", EM1 9656A имеет скорость нарастания выходного сигнала намного выше требуемой для "Спирального измерителя" или подобных приборов, и поэтому он очень удобен в качестве светочувствительного элемента для таких приборов.

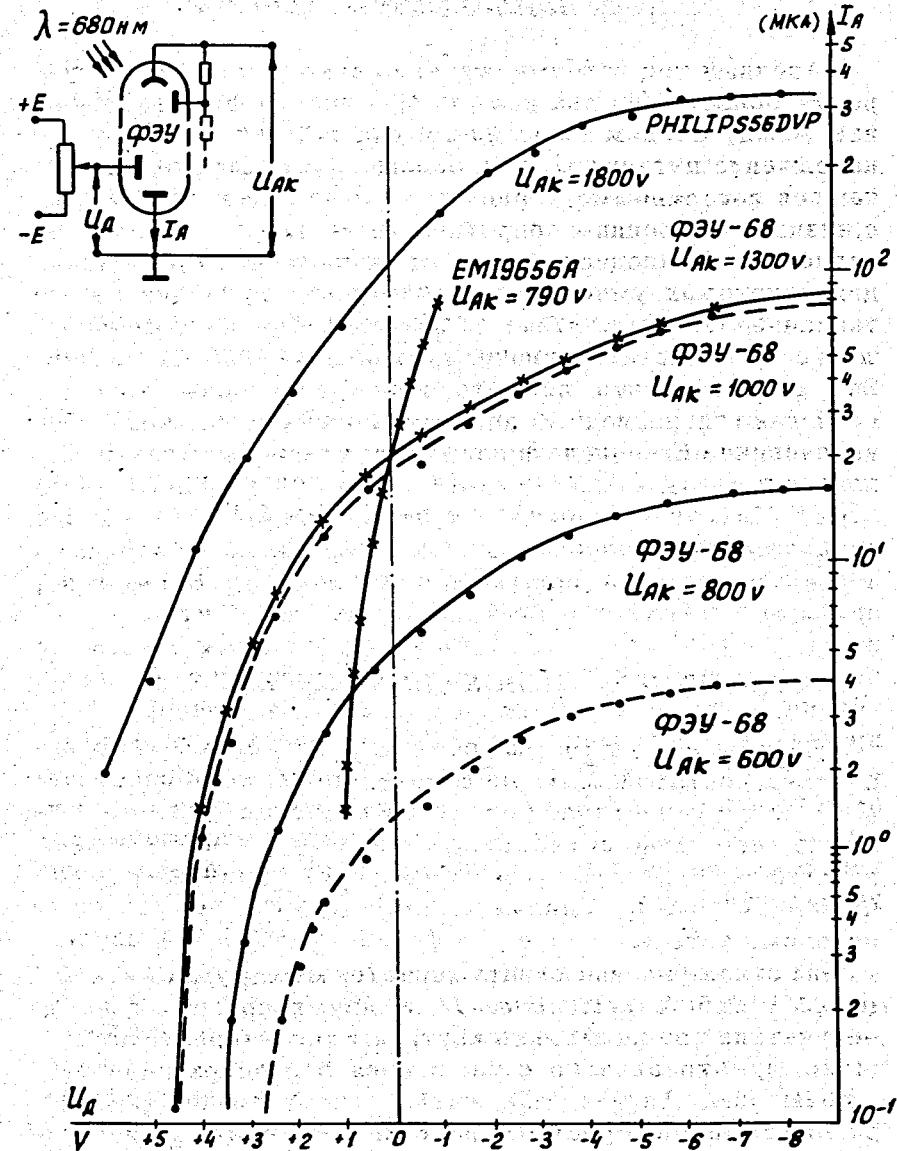


Рис. 1

## БЛОК-СХЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ АНОДНОГО ТОКА

Если анодный ток умножителя подать на вход усилителя с отрицательной обратной связью  $A_1$  /рис. 3/, то на выходе этого усилителя получится напряжение, пропорциональное этому току. Если это выходное напряжение сравнить с опорным в схеме сравнения  $A_2$ , а выходное напряжение  $A_2$ , пропорциональное разности входных напряжений, подать непосредственно на последний диод, то оно будет изменяться таким образом, чтобы анодный ток  $I_a$  оставался постоянным и равнялся заданному опорным напряжением значению.

Если усилитель  $A_1$  будет широкополосным /кривая пропускания  $B$ , рис. 3/, а усилитель  $A_2$  с более узкой полосой пропускания /кривая  $C$ /, то полоса пропускания всей схемы будет соответствовать кривой  $D$ , т.е. соответствующим выбором кривой пропускания усилителя  $A_2$  можно подавить нежелательную низкочастотную составляющую в сигнальном токе  $I_a$ .

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛА К ШУМУ

Напряжение шума на выходе усилителя  $A_1$  состоит из двух составляющих: из шума умножителя и собственного шума усилителя. Точность измерения, конечно, тем лучше, чем выше отношение сигнала к шуму в выходном напряжении  $U_A$  /рис. 4/. Отношение сигнала к шуму в анодном токе  $I_a$  умножителя прямо связано со световым потоком, который падает на фотокатод. Сильное влияние также оказывает длина волны светового потока, от которой зависит квантовый выход. Высокий квантовый выход получается при использовании фотокатода типа  $SbKNaCs$ . Максимум квантового выхода и минимум шума совпадают. На рис. 2 приведены кривые относительного распределения энергии лампы накаливания и газоразрядной лампы с  $InJ$ -наполнением в зависимости от длины волны, а также относительная зависимость квантового выхода и напряжения шума умножителя ФЭУ-68 от длины волны.

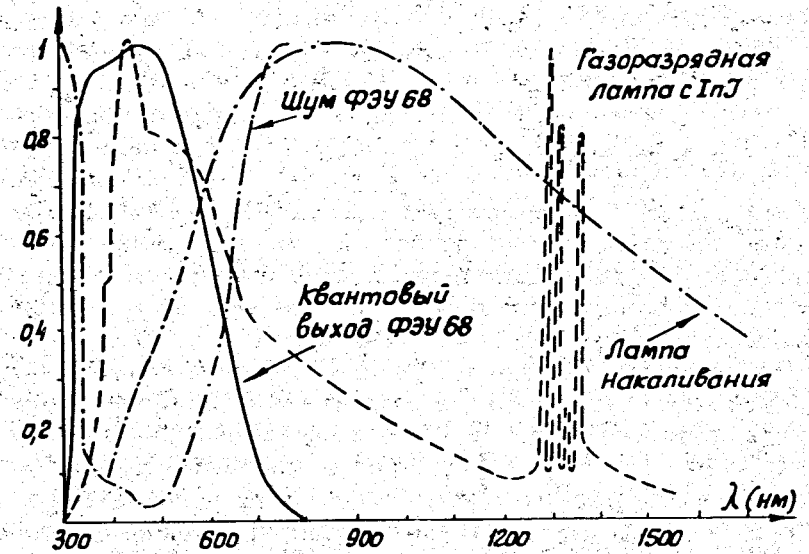


Рис. 2

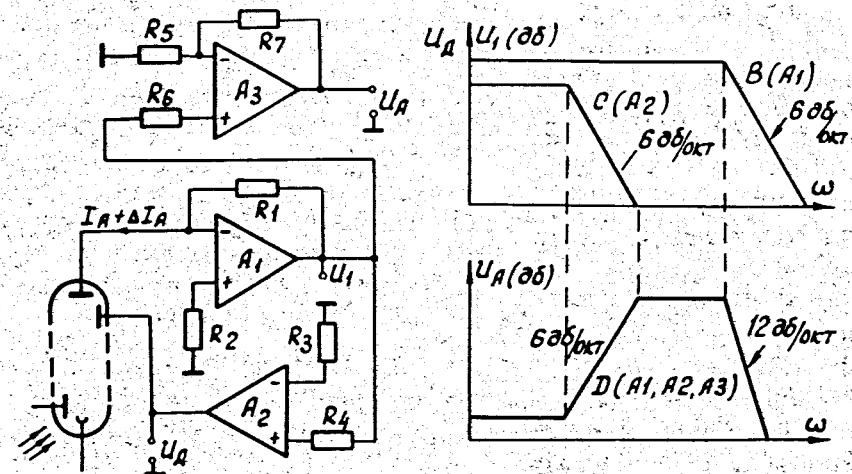


Рис. 3

Грубая оценка показывает, что при использовании лампы накаливания потребуется примерно десятикратная световая мощность, чтобы получить то же самое отношение сигнала к шуму, что и при использовании газоразрядной лампы. На отношение сигнала к шуму также влияет качество электронной оптики между катодом и первым диодом, которое существенно зависит от напряжения между катодом и диодом; поэтому рекомендуется стабилизировать это напряжение<sup>/3/</sup>.

Таким образом, отношение сигнала к шуму умножителя определяется данной оптической системой, так как повысив напряжение питания, можно увеличить усиление и, следовательно, анодный ток. Однако это не улучшит отношения сигнала к шуму, поскольку в процессе умножения среднее распределение электронов, вылетающих из фотокатода, не изменится. Фотоумножитель является идеальным широкополосным усилителем, т.к. для него произведение коэффициента усиления на ширину полосы увеличивается при увеличении усиления. Напротив, для нормального усилителя произведение коэффициента усиления на ширину полосы является постоянным, и увеличение ширины полосы возможно только за счет уменьшения коэффициента усиления и обратно. Улучшить отношение сигнала к шуму, таким образом, можно лишь путем улучшения оптической системы или путем увеличения световой мощности источника света.

Напряжение шума биполярного кремниевого транзистора в схеме с общим эмиттером зависит от двух величин<sup>/4/</sup>, а именно: от эмиттерного тока и внутреннего сопротивления источника сигнала. Минимальные значения напряжения шума расположены в области малых, 20-30 мкА, эмиттерных токов, и внутреннем сопротивлении источника сигнала около 10-30 кОм. Этим требованиям соответствует режим входного каскада операционного усилителя типа 1УТ402.

Эмиттерный ток входного каскада интегрального операционного усилителя можно варьировать в некоторых пределах путем изменения напряжения питания.

Современные типы интегральных усилителей с так называемыми супербета-транзисторами имеют соответственно меньшие токи в рабочих точках.

## ОПИСАНИЕ СОСТАВЛЕННЫХ СХЕМ

Как уже было показано, информация на пленке представлена в виде темного изображения пузырька на светлом фоне. Поэтому фотоумножитель постоянно освещается, и световой поток уменьшается только при прохождении изображения пузырька. Для такого режима работы изготовитель задает максимальный анодный ток умножителя  $I_{a \text{ макс.}} = 50 \text{ мкА}$ . При предполагаемом 100-кратном изменении плотности фона анодный ток будет изменяться от 50 до 0,5 мкА вне изображения пузырька. К этому току  $I_a$  добавляется изменение анодного тока  $\Delta I_a$ , вызванное изображением пузырька. При этом модуляция света, вызванная изображением пузырька в светлом или темном окружении, в первом приближении рассматривается одинаковой<sup>/5/</sup>.

Принципиальная схема АРУ показана на рис. 4. Работу схемы можно представить следующим образом: если, например, ток  $I_a$  уменьшается на входе усилителя А1, то этим вызывается разбаланс на входе схемы сравнения А2, на выходе которой устанавливается максимальное отрицательное напряжение. Ток последнего диода растет и полностью принимается анодом, компенсируя этот разбаланс до тех пор, пока разность входных напряжений на А2 не станет равной нулю. Начинает работать замкнутая схема регулировки, и анодный ток принимает прежнее значение. Если увеличить усиление умножителя увеличением напряжения питания или увеличить анодный ток увеличением светового потока, то эти изменения воспримутся пространственным зарядом последнего диода. Максимальный постоянный ток диода в 50 мкА при этом составляет верхний предел. Таким же образом выравниваются не только колебания анодного тока, но и дрейф усилителя А1. /Например, тепловой, временной и т.д./ Выравниваются колебания, находящиеся в полосе пропус-



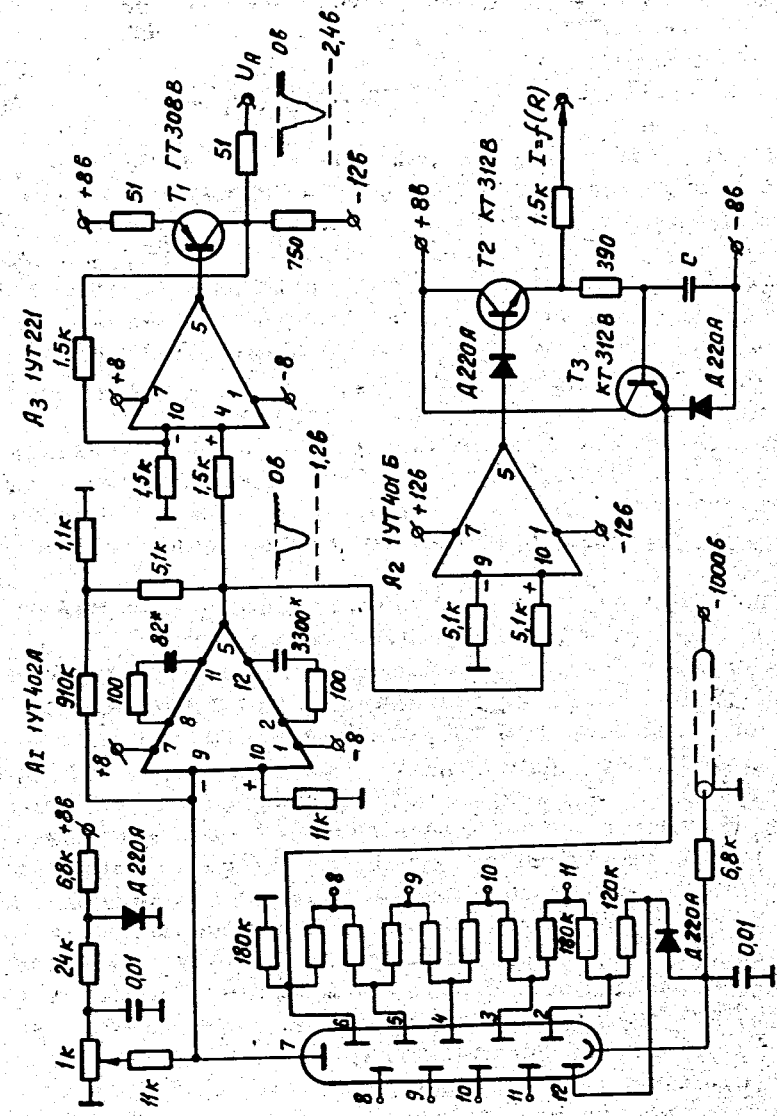


Рис. 4

кания усилителя А2. Все составляющие с большими частотами, к которым принадлежит также и сигнал, не выравниваются.

Необходимо, чтобы конец полосы пропускания усилителя А2 /кривая С на рис. 3/ и начало полосы сигнала были расположены достаточно далеко друг от друга так, чтобы умножитель во время прохождения сигнала с пузырька фактически работал с постоянным напряжением на диноде. Кривая пропускания типа С /см. рис. 3/ создается включением пик-детектора после усилителя А2. Накопительный конденсатор этого пик-детектора разряжается током, пропорциональным радиусу. Таким образом достигается переменная верхняя граница полосы А2, что определяет оптимальную фильтрацию нижней границы сигнала. Фильтрация помех, частоты которых выше содержащихся в сигнале, осуществляется усилителем фильтра с переменной частотой среза, расположенным вне этой замкнутой схемы регулировки и здесь не рассматриваемым.

Усилитель А2 работает постоянно вне линейной области, так как напряжение шума на выходе А1 выше, чем область управления А2 /рис. 6/. Поэтому частотная характеристика самого усилителя А2 здесь не играет роли. Он работает как выпрямитель и не влияет на стабильность схемы регулировки.

Конденсатор пик-детектора заряжается до положительного максимального напряжения шума, однако это зависит от плотности импульсов в шумовом сигнале. Переходной процесс схемы АРУ после воздействия на фотоумножитель скачком от светлого к темному определяется только усилителем А1. Если сигнал не возвращается до начального уровня, то напряжение динода уменьшается с постоянным временем пик-детектора до тех пор, пока на выходе А1 не восстановится начальный уровень. После этого схема регулировки усиления опять следит за колебаниями фона. Недосток этой схемы пик-детектора заключается в том, что меняющийся с ростом радиуса ток разряда конденсатора /рис. 4/ влияет на уровень выходного напряжения, т.к. это изменение вносится в схему

регулирования в самом конце цепи. Эмиттерный повторитель на транзисторе Т2 ослабляет это влияние в 20-30 раз.

### СТАБИЛЬНОСТЬ СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ УСИЛЕНИЯ

Как уже указывалось в предыдущей главе, переходные процессы и стабильность схемы АРУ определяются, в основном, параметрами усилителя А1.

Операционный усилитель 1УТ402 /А1/ не имеет внутренней частотной коррекции, поэтому при использовании его с отрицательной обратной связью необходимы корректирующие цепи, подавляющие колебания на верхней границе частот. Применение корректирующих цепей, предлагаемых изготовителем, не позволяет достичь высокой скорости изменения выходного напряжения, которая требуется для "Спирального измерителя". Необходимо было изменить корректирующие цепочки так, чтобы они гарантировали стабильность схемы и одновременно повышали на порядок скорость изменения выходного напряжения. Степень обратной связи, как известно, оказывает влияние на выбор постоянной времени корректирующих цепей.

Экспериментальным подбором RC-цепочек было достигнуто увеличение скорости изменения выходного напряжения примерно в 20 раз при устойчивой работе схемы. Эта компенсация, однако, не рассчитана на худшие случаи, поэтому необходимо исследовать его переходный процесс после скачкообразного возбуждения усилителя.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Для проверки работоспособности предлагаемой схемы АРУ были проведены испытания и сняты характеристики схемы на специальном стенде, позволяющем имитировать 100-кратное изменение освещенности фотокатода ФЭУ и модуляцию света в нужных пределах по амплитуде и частоте.

Кривые /рис. 5/ показывают, что при амплитуде выходного сигнала  $1,5 \div 3$  В, что вполне достаточно для схем дальнейшей обработки сигнала, изменение освещенности ФЭУ на два порядка компенсируется схемой АРУ со значительным запасом по регулированию.

Новые цепи коррекции операционного усилителя 1УТ402 /А1/ позволяют достигнуть скорости нарастания выходного сигнала 2 В/мксек.

На рис. 6 представлены осциллограммы видеосигналов в контрольных точках АРУ.



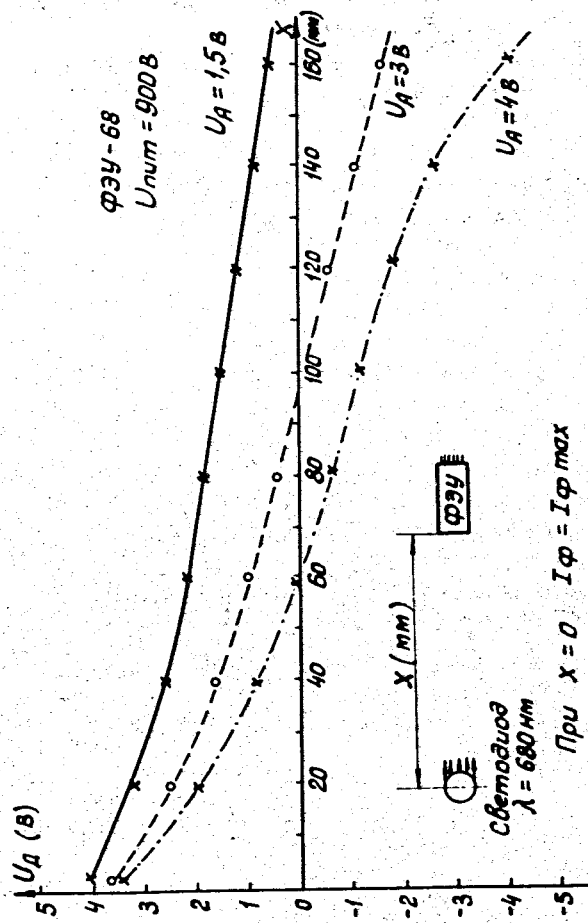


Рис. 5

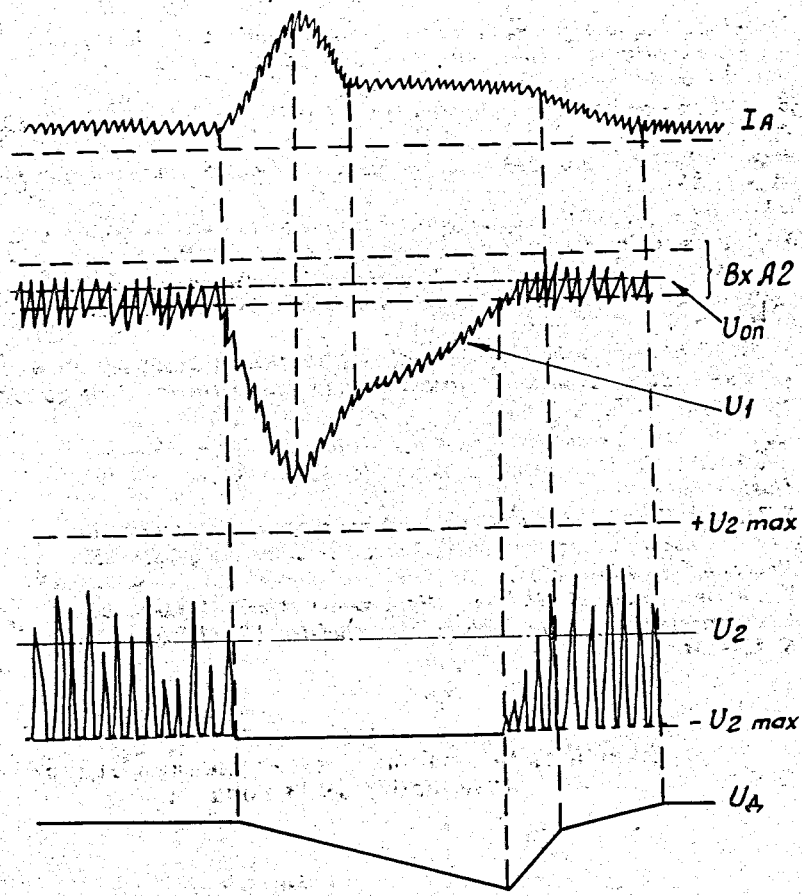


Рис. 6

## Литература

1. Rosenthal, Jerome A. and Fiehrer M. Automatic Gain Control for Photomultiplier Tubes. *The Review of Scientific Instruments* Vol 35 (1964) No 11 S. 1560.
2. А.Я.Астахов и др. Сообщение ОИЯИ, Р10-4943, Дубна, 1970.
3. Photomultiplier Tubes. EMI Electronics Ltd Electron Tube Division Hayes Middlesex G.B.=
4. H.P.Walker. Low-Noise Audio Amplifiers. *Wireless-World* Vol 78
5. G.Fontaine, G.Reboul. Automatic Gain Control in Signal Processing for Bubble Chamber Pictures. International Conference on Data Handling Systems in High-Energy Physics. Lord D.H.Powel B.W. CERN 70-21 Vol I S. 383.
6. А.В.Павлов, А.И.Черников. Приемники излучения автоматических оптико-электронных приборов. "Энергия", Москва, 1972.
7. Use the Two-Stage RC-Low-Pass-Filter as Approximation for Matched Filters. *Electronic Design*. Vol 19 No 26 (dec. 23 1973) Design Ideas.
8. S.Reynand, E.Rossa. Controle automatique de gain et normalization des impulsions de sortie sur le lecteur en spirale digitisee LSD. Preprint CERN Inst. 71-5.
9. K.Larche. Moderne Gluh-und Entladungslampen (Indium Iodid Entladungslampen). *Die Naturwissenschaften* 56 (1969) No 9, S. 429-434.

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 декабря 1973 года.