



Государственный комитет  
СССР  
по делам изобретений  
и открытий

# О П И С А Н И Е ИЗОБРЕТЕНИЯ

## К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

(11) 998982

(61) Дополнительное к авт. свид-ву -

(22) Заявлено 21.09.81 (21) 3337809/18-21

с присоединением заявки № -

(23) Приоритет -

Опубликовано 23.02.83. Бюллетень № 7

Дата опубликования описания 23.02.83

(51) М. Кл.<sup>3</sup>

G 01 R 31/26

(53) УДК 621.382.

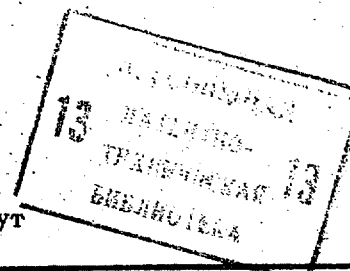
.3 (088.8)

(72) Автор  
изобретения

В. Л. Свирид

(71) Заявитель

Минский радиотехнический институт



### (54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АППРОКСИМАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1  
Изобретение относится к радиоизмерительной технике, предназначено для измерения степени аппроксимирующего полинома характеристики управления полевых транзисторов, варикапов и таких параметров этих приборов как напряжение отсечки, контактная разность потенциалов, значения физических параметров в исследуемой точке и т.д. с повышенной точностью и быстродействием и может быть использовано для измерения аналогичных параметров других нелинейных элементов, характеристики которых аппроксимируются степенным полиномом.

Известен способ измерения параметров аппроксимации характеристик управления полевых транзисторов, заключающийся в определении напряжения отсечки, а также тока стока и крутизны при заданном напряжении затвор-исток с последующим расчетом степени аппроксимирующего полинома по установленному соотношению [1].

2  
Однако данный способ не обеспечивает требуемой точности и быстродействия измерений из-за необходимости определения по существу разнородных параметров аппроксимации с присущими каждому в отдельности методическими и техническими трудностями, так как отсутствует единый обобщенный параметр, характеризующий все остальные.

10  
15  
20  
Наиболее близким к изобретению техническим решением является устройство, содержащее регистрирующий прибор, генератор импульсов, два синхронных демодулятора, сравнивающий и вычитающий блоки, два аттенюатора, а также пропорциональный модулятор и преобразователь физических параметров в напряжение, включающий генератор переменного напряжения, операционный усилитель, амплитудный детектор, переключатель и блок напряжений смещения [2].

Однако известное устройство позволяет достаточно точно с высоким быстродействием определить лишь напряжение

отсечки полевых транзисторов, характеристики крутизны и проводимости канала которых имеют степень аппроксимирующего полинома равную единице, и не обладает таковыми свойствами при измерениях аналогичных и других параметров аппроксимации характеристик нелинейных элементов с произвольной степенью нелинейности.

Целью изобретения является повышение точности и быстродействия измерений.

Указанная цель достигается тем, что в устройство для измерения параметров аппроксимации характеристик нелинейных элементов, содержащее регистрирующий прибор, генератор импульсов, выходы которого соединены с управляющими входами первого модулятора, первого и второго синхронных демодуляторов, выход первого синхронного демодулятора подключен через первый аттенюатор к первому входу блока сравнения, второй вход которого соединен с выходом второго синхронного демодулятора, а выход соединен с входом первого модулятора, преобразователь физических параметров в напряжение, первый выход которого соединен с входом первого и второго синхронных детекторов, а второй выход и вход соединены соответственно с первой и второй клеммами для подключения исследуемого прибора, генератор модулирующего напряжения и второй аттенюатор, выход которого подключен к первому входу первого вычитающего блока, введены третий и четвертый аттенюаторы, второй модулятор, третий и четвертый синхронные демодуляторы, масштабный и первый и второй линейные преобразователи напряжений, блок деления, блок умножения, первый и второй суммирующие блоки, суммирующе-вычитающий блок, второй вычитающий блок, второй и третий сравнивающие блоки и блок опорных напряжений, причем выход генератора модулирующего напряжения через третий аттенюатор соединен с входом первого линейного преобразователя напряжений и с первым входом первого суммирующего блока, второй и третий входы которого подключены к выходам первого модулятора и второго сравнивающего блока, а выход - к первому входу второго суммирующего блока, второй вход которого подключен к третьему выходу преобразователя физических параметров в напряжение, а выход - к третьей клемме для подключения исследу-

дуемого полупроводникового прибора, первый вход второго сравнивающего блока соединен с выходом второго синхронного демодулятора, второй подключен к входу второго модулятора, первому вычитающему входу суммирующе-вычитающего блока и первому выходу блока опорных напряжений, второй вход третьего аттенюатора подключен к выходу третьего сравнивающего блока, один вход которого соединен с вторым выходом блока опорных напряжений, а второй через второй линейный преобразователь напряжений соединен с выходом суммирующе-вычитающего блока, второй суммирующий вход которого подключен к второму выходу преобразователя физических параметров в напряжение, а третий - через четвертый аттенюатор к выходу второго модулятора, управляющий вход которого подключен к соответствующему выходу генератора импульсов, выход первого линейного преобразователя напряжения соединен с входами третьего и четвертого синхронных демодуляторов, управляющие входы которых подключены к соответствующим выходам генератора импульсов, а выходы - соответственно к входу первого аттенюатора и вторым входам первого вычитающего и перемножающего блоков, соответствующие входы блока деления соединены с выходами первого сравнивающего и первого вычитающего блоков, а выход - с первым входом перемножающего блока и через масштабный преобразователь напряжений, с одним из входов регистрирующего прибора, другие входы которого подключены раздельно, к выходам второго сравнивающего и второго вычитающего блоков, первый вход которого подключен к входу второго сравнивающего блока, а второй - к выходу перемножающего блока.

55 Сущность изобретения состоит в следующем.

60 Проходные характеристики в функции управляющего воздействия ряда нелинейных элементов в общем виде могут быть аппроксимированы степенным полиномом

$$P(\nu) = P_{\max} \left( 1 \pm \frac{\nu}{\nu_0} \right)^{\alpha}, \quad (1)$$

65 где  $P(\nu)$  - функция, под обозначением  $P$  которой понимают всевозможные физические параметры (ток, проводимость, емкость, индуктивность и т.д.), а под

аргументом  $v$  — напряжения, пропорциональные воздействию факторам (ток, напряжение, давление, температура и т.д.), вызывающим изменения физических параметров в исследуемой точке;

$P_{\max}$  — максимальное значение функции, соответствующее определенному значению аргумента, например  $v = 0$ ;

$v_0$  — пороговое напряжение, характеризующее экстремальные значения исследуемых функций  $O$  или  $\infty$ , например, для полевых транзисторов это напряжение соответствует напряжению отсечки  $U_{3\alpha \text{ отс}}$ , при котором канал лишается проводимости ( $P(U_{3\alpha \text{ отс}} = 0)$ ), а для варикапов — контактной разности потенциалов  $\varphi_k$ , при компенсации внешним напряжением ( $U = -\varphi_k$ ) которой барьерная емкость условно устремляется в бесконечность; степень аппроксимирующего полинома, отличие которой от единицы является мерой нелинейности исследуемых характеристик, — в общем случае она может быть величиной как больше, так и меньше нуля; например, для некоторых типов полевых транзисторов  $\alpha = 1,9 \dots 2,2$ , а для варикапов  $\alpha = - (0,3 \dots 0,5)$ . Для отмеченных типов (нелинейных элементов существует жесткая связь между знаками "±", стоящими перед параметрами  $v$  и  $\alpha$ , а именно, знак "+" в скобках соотношения (1) соответствует характеристикам варикапов, а знак "-" — полевым транзисторам.

Для определения искомых величин продифференцируем (1) по параметру  $v$

$$\frac{\partial P}{\partial v}(v) = \pm \alpha \frac{P_{\max}}{v_0} \left(1 \pm \frac{v}{v_0}\right)^{\alpha-1}. \quad (2)$$

Решая совместно (2) и (1), получаем

$$\alpha = \frac{\frac{\partial P}{\partial v}(v)}{P(v)} (v \pm v_0); \quad (3)$$

$$v_0 = \pm \left[ \frac{\alpha P(v)}{\frac{\partial P}{\partial v}(v)} - v \right]. \quad (4)$$

Из соотношений (3) и (4) видно, что параметры аппроксимации жестко взаимосвязаны и для их раздельного измерения необходимо отыскать другие, более обобщенные параметры, в полной мере характеризующие искомые величины.

Так как соотношения (3) и (4) выполняются при любых значениях  $v$ , зафиксируем величину параметра  $v_1$  и представим (3) в виде

$$(v_1 \pm v_0) = \frac{\alpha P(v_1)}{\frac{\partial P}{\partial v}(v_1)}. \quad (5)$$

Тогда на основании (3) и (5) можно записать

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\frac{\partial P}{\partial v}(v)}{P(v)} (v \pm v_0 + v_1 - v_1) = \\ &= \frac{\frac{\partial P}{\partial v}(v)}{P(v)} \left[ (v - v_1) + \frac{\alpha P(v_1)}{\frac{\partial P}{\partial v}(v_1)} \right]. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\alpha = \frac{v - v_1}{\frac{P(v)}{\frac{\partial P}{\partial v}(v)} - \frac{P(v_1)}{\frac{\partial P}{\partial v}(v_1)}}. \quad (6)$$

С учетом (6) соотношение (4) приобретает вид

$$v_0 = \pm \left[ \frac{v - v_1}{1 - \frac{P(v_1)}{P(v)} \frac{\frac{\partial P}{\partial v}(v)}{\frac{\partial P}{\partial v}(v_1)}} - v \right]. \quad (7)$$

Переходя к конечным приращениям и выполняя в процессе измерений условия

$$\Delta P(v) = \Delta P(v_1) \quad (8)$$

$$\frac{P(v_1)}{P(v)} = m, \quad (9)$$

где коэффициент  $m$  может быть выбран равным 0,15, выражения (6) и (7) существенно упрощаем

$$\alpha = \frac{(v - v_1) \Delta P(v)}{P(v) [\Delta v(v) - m \Delta v(v_1)]}, \quad (10)$$

$$v_0 = \pm \left[ \frac{(v - v_1) \Delta v(v)}{\Delta v(v) - m \Delta v(v_1)} - v \right]. \quad (11)$$

Вводя обобщенный параметр

$$M = \frac{v - v_1}{\Delta v(v) - m \Delta v(v_1)}, \quad (12)$$

для искомых величин (10) и (11) окончательно получаем

$$\varphi = M \frac{\Delta P(\nu)}{P(\nu)}; \quad (13)$$

$$\nu_0 = \pm [M \Delta \nu(\nu) - \nu]. \quad (14)$$

Предлагаемое устройство в автоматическом режиме производит измерение физических параметров  $P$  и приращений напряжений  $\Delta \nu$ , пропорциональных производным, при двух значениях напряжений  $\nu$  и  $\nu_1$ , при которых автоматически выполняются условия (8) и (9), вычисляет значение обобщенного параметра (12) и в соответствии с (13) и (14) определяет искомые параметры аппроксимации соответствующих характеристик нелинейных элементов, обеспечивая выигрыш в точности и быстродействии измерений.

На фиг. 1 представлена структурная схема предлагаемого устройства для измерения параметров аппроксимации характеристик нелинейных элементов; на фиг. 2 - упрощенная структурная схема преобразователя физических параметров, в напряжение, соединенного с исследуемым нелинейным элементом и вторым суммирующим блоком; на фиг. 3 - диаграммы, поясняющие принцип работы устройства; на фиг. 4 - диаграммы, поясняющие выигрыш в точности измерений параметров аппроксимации характеристик нелинейных элементов.

Устройство (фиг. 1) включает ряд функциональных систем. Исследуемый элемент 1, преобразователь 2 физических параметров в напряжение, первый и второй синхронные демодуляторы 3 и 4 и первый пропорциональный модулятор 5, управляемые генератором 6 импульсов, а также второй аттенуатор 7 с коэффициентом передачи равным (9), первый сравнивающий блок 8 и первый и второй суммирующие блоки 9 и 10 образуют систему модуляции физических параметров, позволяющую при измерениях автоматически выполнить условие (9), при котором устанавливается заданное соотношение параметров в соответствующих точках исследуемых характеристик, например  $m = 0,15$  и, следовательно, непосредственно определить разность напряжений  $\nu - \nu_1$ , входящую в (10) - (12).

Блок 11 опорных напряжений и второй сравнивающий блок 12, входящие совместно с первым и вторым суммирующими блоками 9 и 10, преобразовате-

лем 2 физических параметров в напряжение и вторым синхронным демодулятором 4 в состав системы нормирования физических параметров, позволяет заста-

5 биллизировать независимо от действия различных факторов значение параметра в одной из отсчетных точек  $P(\nu)$  исследуемых характеристик нелинейного элемента 1 и, следовательно, однозначно 10 определить ее координаты, информация о которых входит в (13) и (14). Отсчетную точку  $P(\nu)$  на исследуемых характеристиках выбирают таким образом, чтобы ее ордината соответствовала, например, пределам измерений каждого из 15 параметров преобразователя 2, что достижимо при первичной регулировке опорного напряжения блока 11 и коэффициента передачи преобразователя 2 физических параметров в напряжение. 20

Второй пропорциональный модулятор 13, управляемый генератором 6 импульсов, четвертый аттенуатор 14 с коэффициентом передачи равным  $(1-m)$  (9), 25 суммирующе-вычитающий блок 15, второй линейный преобразователь 16 напряжений, третий сравнивающий блок 17, третий аттенуатор 18, управляемый напряжением, и генератор 19 модулирующего 30 напряжения совместно с первым и вторым суммирующими блоками 9 и 10, преобразователем 2 физических параметров в напряжение и блоком 11 опорных напряжений образуют систему стабилизации 35 приращений  $\Delta P$  физических параметров независимо от положения отсчетных точек  $P(\nu)$  и  $P(\nu_1)$  на исследуемых характеристиках нелинейного элемента 1, которая в процессе измерений производит 40 необходимую обработку сигналов и совместно с указанными выше системами обеспечивает автоматическое выполнение условия (8).

Первый линейный преобразователь 20 45 напряжений, третий и четвертый синхронные демодуляторы 21 и 22, первый аттенуатор 23 с коэффициентом передачи равным  $m$  (9), первый вычитающий блок 24 и делящий блок 25 представляют собой канал обработки информации о приращениях напряжений 50  $\Delta \nu(\nu)$  и  $\Delta \nu(\nu_1)$ , пропорциональных производным в точках  $P(\nu)$  и  $P(\nu_1)$  исследуемых характеристик, и формирования в соответствии с (12) обобщенного параметра  $M$ . 55

Масштабный преобразователь 26 напряжений и перемножающий блок 27 с вторым вычитающим блоком 28 обра-

зуют каналы измерения параметров  $\mathcal{K}$  и  $\mathcal{V}_0$ , которые осуществляют дальнейшие преобразования получаемой информации и вычисление в соответствии с уравнениями (13) и (14) искомым параметров с последующей передачей для индикации на регистрирующий прибор 29. Для автоматической коррекции показаний регистрирующего прибора 29, связанных с изменением пределов измерения физических параметров (делитель  $P(\nu)$  в формуле (13) управляющие органы преобразователя 2 физических параметров в напряжение и масштабного преобразователя 26, осуществляющие изменение их коэффициентов передачи, сопряжены между собой.

Преобразователь 2 физических параметров в напряжение (фиг. 2) включает операционный усилитель 30, имеющий в цепи отрицательной обратной связи резистор 31, с помощью которого можно изменять коэффициент передачи, и исследуемый нелинейный элемент 1, а также амплитудный детектор 32, соединенный с выходом усилителя 30, генератор 33 переменного напряжения, блок 34 напряжений смещения и два переключателя 35 и 36. С помощью переключателя 35 на два положения можно изменять полярность напряжений смещения блока 34 в случае исследования трехполосных нелинейных элементов, например полевых транзисторов с различным типом проводимости канала. Переключатель 36 на четыре положения с тремя направляющими, каждая по порядку представляющая собой соответственно первый, второй и третий выходы 37 - 39 преобразователя 2, позволяет переводить преобразователя в необходимый режим преобразования физических параметров в напряжение, например емкости  $C$  варикапов и активной проводимости  $G$  крутизны  $S$  и тока  $I$  полевых транзисторов.

Для создания нормального режима работы вход преобразователя 2, которым является вход операционного усилителя 30, и первый выход 37 этого же преобразователя соединены раздельно с первой и второй клеммами 40 и 41 для подключения исследуемых элементов 1. Третий выход преобразователя 2 подключен к второму входу 42 второго суммирующего блока 10 (фиг. 2), выход которого соединен с третьей клеммой 43 для подключения исследуемых элементов 1. Для исследования двухполосных нелинейных элементов, например варикапов, эти эле-

менты подключают к первой и третьей клеммам 40 и 43, при этом вторая клемма 41 остается свободной.

Второй суммирующий блок (фиг. 2) выполнен в виде широкополосного пассивного сумматора, на активном резисторе 44 сравнительно небольшого номинала которого происходит суммирование относительно низкочастотных, включая постоянную составляющую, сигналов, поступающих на первый вход 45 с выхода первого суммирующего блока 9 (фиг. 1) и относительно высокочастотных сигналов, поступающих на второй вход 42 с третьего выхода 39 преобразователя 2 (фиг. 2). Величины реактивных элементов второго суммирующего блока 10 (фиг. 2) выбраны такими, что исключается взаимное влияние источников сигналов, действующих в этом блоке.

Динамика процессов, протекающих в устройстве, состоит в следующем.

При подключении к соответствующим клеммам 40 - 43 (фиг. 2) устройства исследуемого нелинейного элемента 1, например полевого транзистора, и переводе с помощью переключателей 35 и 36 в необходимый режим работы преобразователя 2 физических параметров в напряжение, например в режим преобразования крутизны  $S$  (фиг. 2), рабочая точка нелинейного элемента оказывается смещенной в область максимальных значений параметров исследуемой характеристики  $P = f(\nu)$  (фиг. 3) под влиянием большого разностного сигнала, возникающего во втором сравнивающем блоке 12 (фиг. 1) за счет действия опорного напряжения блока 11 и отсутствия в данный момент времени напряжения синхронного демодулятора 4. Кроме этого, под влиянием большого разностного сигнала, образующегося за счет аналогичных действий в третьем сравнивающем блоке 17, коэффициент передачи третьего аттенюатора 18 становится максимальным и модулирующее напряжение генератора 19 без заметного ослабления передается совместно с напряжением второго сравнивающего блока 12 через первый и второй суммирующие блоки 9 и 10 на управляющий электрод исследуемого нелинейного элемента 1, что способствует образованию на втором выходе 38 (фиг. 2) преобразователя 2 напряжений (фиг. 3) в виде суммы постоянного, пропорционального величине параметра  $P(U(P) = P(\nu))$ , и переменного, пропорционального приращению пара-

метра  $\Delta P (\Delta U (P) \approx \Delta P (\nu))$  независимо от местонахождения рабочей точки на исследуемой характеристике.

Образующийся на втором выходе преобразователя 2 сигнал поступает для обработки на один из суммирующих входов суммирующе-вычитающего блока 15 и информационные входы синхронных демодуляторов 3 и 4, причем второй синхронный демодулятор 4 в данный момент времени оказывается открытым для приема информации под действием первого импульса (фиг. 3 г), вырабатываемого генератором 6. Получаемое на выходе синхронного демодулятора 4 напряжение, не содержащее модулирующего сигнала генератора 19, преодолевая во втором сравнивающем блоке 12 опорное напряжение блока 11, переводит рабочую точку нелинейного элемента 1 на участок характеристики, определяемый начальными условиями с последующей стабилизацией в установившемся режиме величины параметра  $P (\nu)$  (фиг. 3 а) с заданной точностью, независимо от влияния различных факторов, за счет изменения напряжения смещения  $\nu$ , создаваемого на выходе сравнивающего блока 12, которое поступает на один из входов второго вычитающего блока 28, а также на регистрирующий прибор 29.

Одновременно с этим полное выходное напряжение преобразователя 2 в суммирующе-вычитающем блоке 15 вычитается с опорным напряжением блока 11, образуя на выходе блока 15 только переменную составляющую напряжения  $\Delta U (P)$  (фиг. 3 а), пропорциональную приращению  $\Delta P (\nu)$  (фиг. 3 в). Получаемое переменное напряжение, преобразуясь во втором линейном преобразователе 16 в постоянное (фиг. 3 ж), преодолевает в третьем сравнивающем блоке 17 опорное напряжение блока 11 и изменяет коэффициент передачи третьего аттенюатора 18 таким образом, чтобы в установившемся режиме сохранить постоянной с заданной степенью точности и независимо от влияния различного рода факторов, в том числе и напряжения смещения нелинейного элемента, величину приращения  $\Delta U (P) \approx \Delta P (\nu)$  (фиг. 3 в), действующего на выходе преобразователя, что возможно за счет изменения приращения напряжения  $\Delta U (\nu) \approx \Delta \nu (\nu)$  (фиг. 3 б), создаваемого генератором 19 модулирующего напряжения на выходе третьего аттенюатора 18. При таких условиях выход-

ное напряжение третьего аттенюатора 18 (фиг. 3 з), несущее информацию с производной физических параметров в точке  $P (\nu)$  исследуемой характеристики нелинейного элемента 1, поступает в первый линейный преобразователь 20, где превращается в постоянное напряжение (фиг. 3 и), пропорциональное приращению аргумента  $\Delta \nu (\nu)$  и накапливается в четвертом синхронном демодуляторе 22, который в рассматриваемый момент времени оказывается открытым для приема информации так же, как и синхронный демодулятор 4, под влиянием первого импульса (фиг. 3 г) генератора 6. Образующее на выходе синхронного демодулятора 22 напряжение воздействует на соответствующие входы первого вычитающего и перемножающего блоков 24 и 27.

По окончании управляющего импульса генератора 6, длительность которого зависит от времени установления переходных процессов в рассматриваемых системах авторегулировок, второй и четвертой, синхронные демодуляторы 4 и 22 переходят в режим хранения накопленной информации соответственно о величинах параметра  $P (\nu)$  и приращения аргумента  $\Delta \nu (\nu)$ , а первый и третий синхронные демодуляторы 3 и 21, воспринимая с второго выхода генератора 6 управляющий импульс (фиг. 3 д) — в режим приема информации. Одновременно с этим импульс с второго выхода генератора 6 открывает для передачи информации первый и второй пропорциональные модуляторы 5 и 13, а также разрешает регистрирующему прибору 29 измерение и индикацию одного из параметров аппроксимации  $\nu$  — напряжения смещения, действующего на выходе второго сравнивающего блока 12, которое к данному моменту времени оказывается установившемся и соответствует величине исследуемого физического параметра  $P (\nu)$  связи генератора 6, синхронизирующие работу регистрирующего прибора 29, (не показаны).

При этом напряжение, хранимое во втором синхронном демодуляторе 4, сравнивается с приобретаемым напряжением первого синхронного демодулятора 3 в первом сравнивающем блоке 8, на выходе которого, из-за явного преобладания в данный момент времени выходного напряжения демодулятора 3, образуется резкий перепад напряжения, который через открытый первый пропор-

циональный модулятор 5, первый и второй суммирующие блоки 9 и 10 беспрепятственно передается на управляющий электрод нелинейного элемента 1 и смещает рабочую точку в область меньших значений физических параметров  $P(\nu_1)$ , вызывая тем самым модуляцию параметров исследуемого нелинейного элемента и одновременно изменение производной в соответствии с новым значением напряжения смещения.

Получаемое на втором выходе преобразователя 2 напряжение с меньшим уровнем  $U_1(P) \approx P(\lambda_1)$  после слежения с частью опорного напряжения, поступающего от блока 11 через открытый второй пропорциональный модулятор 13 и четвертый аттенюатор 14, имеющий коэффициент передачи равный  $(1-m)$ , полностью компенсируется в суммирующе-вычитающем блоке 15 с полным опорным напряжением блока 11, создавая на выходе блока 15 только переменную составляющую  $\Delta U_1(P) \approx \Delta P(\nu_1)$  (фиг. 2в) меньшей амплитуды, однако система стабилизации приращений физических параметров  $\Delta P$ , стремясь воспрепятствовать изменению этой амплитуды (фиг. 2е) после ее выпрямления (фиг. 2ж) во втором линейном преобразователе 16 и сравнения в блоке 17 вызывает скачкообразное изменение коэффициента передачи третьего аттенюатора 18 и, следовательно, увеличение на его выходе модулирующего напряжения (фиг. 3з), создаваемого генератором 19.

По истечении предельного короткого интервала времени, неотмеченного на диаграммах (фиг. 3б, в, е, ... и), данные системы стабилизации приходят в равновесное состояние, непрерывно поддерживая постоянными с заданной степенью точности значение физического параметра  $P(\nu_1)$  и соответствии с уровнем затухания второго аттенюатора 7, а также величину приращения этого параметра  $\Delta P(\nu_1)$  в точности равного приращению  $\Delta P(\nu)$  в соответствии с уровнем опорного напряжения, имеющегося на втором выходе блока 11. При этом в результате работы системы модуляции достигается необходимая глубина модуляции (9) физических параметров нелинейного элемента (фиг. 3в), независимо от влияния различного рода факторов, за счет стабилизации абсолютной разности напряжений  $[U(\nu) - U_1(\nu)] \approx [\nu - \nu_1]$  (фиг. 3б), образуемой на выходе первого сравнивающего блока 8, а в результате работы

системы стабилизации приращений — постоянство приращений параметров (8) независимо от местонахождения рабочей точки на исследуемой характеристике (фиг. 3а) за счет авторегулировки модулирующего воздействия  $\Delta U_1(\nu) \approx \Delta \nu(\nu_1)$  (фиг. 3б, з), образуемого на выходе третьего аттенюатора 18 и несущего информацию о производных, входящих в выражения (6) и (7).

Одновременно с протеканием переходных процессов и установлением стационарного режима работы рассмотренных систем стабилизации производится дальнейшее непрерывное преобразование их выходных сигналов в канале обработки информации о приращениях напряжений  $\Delta \nu(\nu)$  и  $\Delta \nu(\nu_1)$  и формирования обобщенного параметра  $M$ , а также в каналах измерения искомым параметров  $\mathcal{K}$  и  $\nu_0$ . Выходное напряжение (фиг. 3з) третьего аттенюатора 18 снова выпрямляется в первом линейном преобразователе 20 и в виде постоянного напряжения (фиг. 3и), пропорционального приращению аргумента  $\Delta \nu(\nu_1)$ , накапливается в третьем синхронном демодуляторе 21. Данная информация о приращении аргумента участвует в соответствии с (12) в формировании обобщенного параметра  $M$ , т.е. ослабляется в необходимые числа раз в первом аттенюаторе 23 (коэффициент передачи аттенюатора равен  $m$ ), вычитается в блоке 24 с хранимой информацией четвертого синхронного демодулятора 22, а получаемая разность напряжения управляет коэффициентом деления делящего блока 25, на выходе которого после взаимодействия с напряжением  $(U - U_1) \approx (\nu - \nu_1)$  (фиг. 3б) первого сравнивающего блока 8 образуется напряжение, пропорциональное обобщенному параметру  $M$ . Далее это напряжение, проходя масштабный преобразователь 26, порождает в соответствии с (13) напряжение, пропорциональное искомому параметру  $\mathcal{K}$ , а также взаимодействуя в соответствии с (14) в перемножающем блоке с хранимым напряжением четвертого синхронного демодулятора 22 и во втором вычитающем блоке 28 с выходным напряжением второго сравнивающего блока 12, напряжение, пропорциональное искомому параметру  $\nu_0$ . Образованные на выходах масштабного преобразователя 26 и второго вычитающего блока 28 напряжения поступают на регистрирующий прибор 29.



Таким образом, по установлению в системах модуляции и стабилизации приращений физических параметров переходных процессов, когда выходные напряжения первого сравнивающего блока 8 и третьего аттенюатора 18 станут в точности соответствовать разности напряжений  $\psi - \psi_1$  и приращению  $\Delta\psi(\psi_1)$ , генератор 6, заканчивая формирование управляющего импульса (фиг. 2д) на своем втором выходе, переводит первый и третий синхронные демодуляторы 3 и 21 в режим хранения накопленной информации соответственно о величине физического параметра  $P(\psi_1)$  (фиг. 3в) и приращении аргумента  $\Delta\psi(\psi_1)$  (фиг. 3б), а также прекращает передачу информации через первый и второй пропорциональные модуляторы 5 и 13 и разрешает регистрирующему прибору 29 изменение с последующей индикацией выходных напряжений масштабного преобразователя 26 и второго вычитающего блока 28, которые к данному моменту времени оказываются точно соответствующими измеряемым параметрам аппроксимации  $\mathcal{X}$  и  $\psi_0$  исследуемой характеристики нелинейного элемента 1.

Исчезновение напряжений на выходах первого и второго пропорциональных модуляторов 5 и 13 прекращает работу системы модуляции физических параметров и напряжение смещения возвращается к прежнему значению аргумента  $\psi$ , независимо от состояния режима работы нелинейного элемента 1 и преобразователя 2. Это связано с тем, что система нормирования физических параметров сохраняет прежний режим работы, так как состояние второго синхронного демодулятора 4 пока остается неизменным. При этом система стабилизации приращений физических параметров работает двояко в зависимости от состояния режима работы нелинейного элемента 1 и преобразователя 2, который, начиная с данного момента времени, может быть произвольно изменен, включая смену нелинейного элемента и переключение предела измерения. Если нелинейный элемент 1 исключен, и, следовательно, отсутствует какое-либо напряжение на втором выходе преобразователя 2, то эта система возвращается в исходное состояние, при котором переменное напряжение на выходе третьего аттенюатора 18 становится максимально возможным. В противном случае система стабилизации приращений физических парамет-

ров  $\Delta P$  описанным выше способом стремится сохранить неизменным приращение  $\Delta P(\psi) = \Delta P(\psi_1)$  независимо от абсолютного значения параметра  $P$ , соответствующего значению аргумента  $\psi$ . Если нелинейный элемент 1 остается подключенным к измерительным клеммам преобразователя 2 с сохранением исходного режима работы обеих, то рабочая точка на исследуемой характеристике возвращается (фиг. 3а, в,) к прежним значениям параметра  $P(\psi)$  и его приращению  $\Delta P(\psi) = \Delta P(\psi_1)$ , и устройство подготавливается к новому циклу измерений, исходя уже не из нулевых (исходных) условий, а с новых, соответствующих нынешнему состоянию рассматриваемых систем стабилизации.

Спустя некоторое предельно короткое время  $\tau$  (фиг. 3г, д), достаточное только для установления показаний регистрирующего прибора 20 или изменения режима работы преобразователя 2, например выбора иного предела измерения параметров, включая смену исследуемого нелинейного элемента, снова срабатывает генератор 6, и управляющий импульс (фиг. 3г) с его первого выхода снова открывает для приема информации второй и четвертый синхронные демодуляторы 4 и 22, приводя тем самым дополнительно в действие систему нормирования физических параметров, начинающую работать с нового состояния (при отключении исследуемого элемента она возвращается в исходное состояние) и канал отработки информации о приращениях напряжений  $\Delta\psi(\psi)$  и  $\Delta\psi(\psi_1)$  и формирования обобщенного параметра  $M$ . В дальнейшем процессы в измерительном устройстве периодически повторяются описанным выше способом, производя по избранной программе измерение тех или иных параметров нелинейных элементов.

Индикация измеряемых величин может производиться: параметров  $\mathcal{X}$  и  $\psi_0$  — за время действия каждого из управляющих импульсов (фиг. 3г), за исключением первого, образующихся на первом выходе генератора 6, т.е. за время измерения параметров следующего нелинейного элемента; параметра  $\psi$ , как было отмечено выше, — за время действия управляющих импульсов (фиг. 3д), имеющих на втором выходе генератора 6: смена нелинейного элемента или его режима работы, включая изменение предела измере-



ния преобразователя 2 — за интервал времени  $\tau$ , образуемый между импульсами (фиг. 3д), появляющимися последовательно на втором и первом выходах генератора 6, который при необходимости может регулироваться в широких пределах, включая режим "Останов". Индикация других параметров аппроксимации, а именно значений физических параметров в исследуемой точке характеристики  $P(\nu)$ , производится с помощью указателя положения управляющего органа резистора 31 (фиг. 2), сопряженного с масштабным преобразователем 26, который может быть оцифрован в значениях пределов измеряемых величин (фиг. 2) с указанием соответствующих наименований физических единиц, например пикофард (пф), микросименсов (мкСм), микроампер (мкА) в зависимости от вида исследуемых характеристик нелинейного элемента (переключатель 36).

Выбор предела измерения физических параметров при исследовании одного и того же нелинейного элемента на показаниях регистрирующего прибора 29, измеряющего параметры  $\mathcal{X}$  и  $\nu_0$ , не должен оказываться, если только характеристики этого элемента соответствуют степенной функции, так как при изменении коэффициента передачи преобразователя 2 автоматически подстраивается обобщенный параметр  $M$  (12), входящий в выражения (13) и (14), и одновременно корректируется коэффициент передачи масштабного преобразователя 26, так, что отношение  $\frac{M}{P(\nu)}$ , представленное в аналоговых величинах, остается постоянным. Если при изменении предела наблюдаются различия в измеряемых параметрах  $\mathcal{X}$  и  $\nu_0$ , то это свидетельствует о том, что анализируемый интервал характеристики не соответствует степенному полиному и его необходимо сузить, причем характерным признаком для установления границ этого интервала может явиться допустимое отклонение измеряемых величин  $\mathcal{X}$  и  $\nu_0$ .

Предлагаемое устройство отличается повышенной точностью и быстродействием измерений, что обеспечивается использованием в устройстве изложенного выше метода определения параметров аппроксимации характеристик нелинейных элементов, позволяющего практически полностью исключить составляющие погрешности, обусловленные нелинейностью исследуемых характеристик, которые присущи известным методам измерений

и являются преобладающими при отклонениях степени аппроксимирующего полинома от единицы, достигая десятков процентов, а также реализацией соответствующего алгоритма работы устройства, позволяющего в автоматическом режиме одновременно измерять все параметры аппроксимации с минимально возможными погрешностями, ускоряя тем самым процесс измерений.

Для количественной оценки выигрыша в точности измерений  $i$ -параметров исследуемых элементов целесообразно исходить из сравнения соответствующих сумм систематических (аддитивных) и случайных (среднеквадратических) составляющих погрешностей, образуемых в известном  $\sigma_{iI}^2$  и  $\sigma_{iII}^2$  и предлагаемой  $\sigma_{iI}^2$  и  $\sigma_{iII}^2$  устройствах за счет влияния различного рода факторов:

$$B_i = \frac{|\sigma_{iI}^2| + |\sigma_{iII}^2|}{|\sigma_{iI}^2| + |\sigma_{iII}^2|} \approx \frac{|\sigma_{iI}^2|}{|\sigma_{iII}^2|}. \quad (15)$$

Таким образом, для достоверной оценки выигрыша (15) достаточно определить лишь аддитивную составляющую погрешности известного устройства и среднеквадратическую предлагаемого, так как из вышеизложенного справедливы соотношения

$$|\sigma_{iI}^2| \gg |\sigma_{iII}^2| \gg |\sigma_{iII}^2| \gg |\sigma_{iII}^2|.$$

Аддитивная составляющая погрешности измерения параметра в самом общем виде

$$\sigma_{\nu_0}^* = \frac{\nu_0^* - \nu_0}{\nu_0}, \quad (16)$$

где  $\nu_0^*$  — пороговое напряжение, исследуемой характеристики нелинейного элемента, получаемое с помощью известного устройства при отличии степени аппроксимирующего полинома от единицы.

В связи с тем, что известное устройство основано на линейной аппроксимации характеристик нелинейных элементов, то для нахождения величины  $\nu_0^*$  достаточно на исследуемой характеристике (фиг. 4а) провести прямую, проходящую через три точки с координатами

$$A[\nu_1, P(\nu)], B[\nu_1, mp(\nu)], C[\nu_0^*, 0].$$

Уравнение прямой, проходящей через данные точки, имеет вид

$$\frac{\nu_0^* - \nu}{\nu_1 - \nu} = \frac{0 - P(\nu)}{P(\nu) - mp(\nu)}$$

Отсюда

$$v_0^* = v - \frac{v - v_1}{1 - m} \quad (17)$$

Разность аргументов  $v - v_1$  является промежуточной величиной (неудобной для практического использования) и ее целесообразно представить через измеряемые параметры. Для этого воспользуемся исходным соотношением (1) и составим уравнение

$$\frac{P(v)}{\left(1 \pm \frac{v}{v_0}\right)^\alpha} = \frac{mp(v)}{\left(1 \pm \frac{v_1}{v}\right)^\alpha}$$

решение которого позволяет определить искомую величину

$$v - v_1 = v_0 \left(1 - \sqrt[m]{\frac{\alpha}{\alpha - 1}}\right) \left(\frac{v}{v_0} \pm 1\right) \quad (18)$$

Подставляя (17) и (18) в (16), получаем

$$\delta v_{0I} = \left(\frac{v}{v_0} - 1\right) \frac{\alpha \sqrt[m]{m-1}}{1-m} + (1 \pm 1) \frac{\alpha \sqrt[m]{m-1}}{1-m} \quad (19)$$

Для значений параметров  $\frac{v}{v_0} = 0,25$ ,  $m = 0,5$ ,  $\alpha = 2$ , характерных для таких нелинейных элементов как, например, полевые транзисторы, при измерениях на известном устройстве  $\delta v_{0Iпт} = \delta U_{зипт} \approx \pm 31,5\%$ . При исследовании на этом же устройстве, например варикапов с  $\alpha = -0,5$ , целесообразно принять  $\frac{v}{v_0} = -1$ , тогда при  $m = 0,5$  погрешность определения контактной разности потенциалов составит  $\delta v_{0IB} = \delta \psi_k \approx -200\%$ .

Аддитивную составляющую погрешности измерения параметра  $\alpha$  с помощью

$$\delta v_{0II} = \sqrt{\left(1 \pm \frac{v}{v_0}\right)^2 \left\{ (\delta m)^2 + [\delta \Delta v(v)]^2 + (\delta v)^2 \right\} + (\delta v)^2} \quad (21)$$

$$\delta \alpha_{II} = \sqrt{(\delta m)^2 + [\delta P(v)]^2 + [\delta \Delta P(v)]^2} \quad (22)$$

где  $\delta m, \delta v, \delta \Delta v(v), \delta P(v), \delta \Delta P(v)$  - среднеквадратические составляющие погрешности формирования параметров  $M, v, \Delta v(v), P(v), \Delta P(v)$ , обусловленные несовершенством соответствующих систем стабилизации.

В связи с тем, что в предлагаемом устройстве использованы однотипные статические системы стабилизации, отмеченные составляющие погрешности, за исключением первой, оказываются равнозначными и могут быть приняты каждая в отдельности примерно равными ( $\delta v \approx \pm 0,1\%$ ). В формировании обобщенного па-

известного устройства можно оценить на основании (3) при условии, что параметр  $P(v)$  и его производная  $\frac{\partial P}{\partial v}$  определяются точно, а параметр  $v_0$  приближенно, - в соответствии с (17)

$$\delta \alpha_1 = \frac{\frac{\partial P}{\partial v}(v) \frac{v \pm v_0^*}{P(v)}}{\frac{\partial P}{\partial v}(v) \frac{v \pm v_0}{P(v)}} - 1 = \frac{v \pm v_0^*}{v \pm v_0} - 1$$

Принимая во внимание (16), получаем искомую погрешность в удобном для практического использования виде

$$\delta \alpha_I = \frac{\delta v_0}{\left(1 \pm \frac{v}{v_0}\right)} \quad (20)$$

С учетом ранее принятых численных значений параметров, входящих в (20), для тех же нелинейных элементов соответственно имеем  $\delta \alpha_{Iпт} = 42\%$  и  $\delta \alpha_{IB} = -\infty$ . Отсюда следует, что оценить относительно точно значение параметра  $\alpha$  с помощью известного устройства не представляется возможным.

Среднеквадратические составляющие погрешности измерений параметров  $v_0$  и  $\alpha$ , характерные для предлагаемого устройства, определим на основании соотношений (13) и (14) путем почленного дифференцирования по каждому из параметров, влияющих на точность измерений, с последующим геометрическим суммированием получаемых частных составляющих

параметра  $M$  (12) участвуют практически все системы устройства и составляющую  $\delta M$  следует рассмотреть более подробно.

Анализируя соотношение (12) нетрудно заметить, что между величинами  $\Delta v(v)$  и  $\Delta v(v_2)$  существует строгая корреляционная связь. Во-первых, они формируются одной и той же системой стабилизации приращений, во-вторых, их соотношение определяется, очевидно, параметрами аппроксимации, и, следовательно, зависит от коэффициента  $m$ . Действительно, решая совместно (12), (14) и (18), можно установить, что

$$\frac{\Delta v(v_1)}{\Delta v(v)} = \frac{\alpha \sqrt[m]{m}}{m} \quad (23)$$

Подставляя (23) и (12), получаем

$$M = \frac{\nu - \nu_1}{\Delta \nu(\nu) [1 - \frac{x}{\sqrt{m}}]} \quad (24)$$

$$\bar{\sigma}_M \sqrt{[\bar{\sigma}(\nu - \nu_1)]^2 + [\bar{\sigma} \Delta \nu(\nu)]^2 + \left[ \frac{x}{x - \sqrt{m}} \right]^2 (\bar{\sigma}_m)^2} \quad (25)$$

где  $\bar{\sigma}(\nu - \nu_1)$  и  $\bar{\sigma}_m$  — составляющие погрешности формирования разности аргументов  $\nu - \nu_1$  и коэффициента  $m$ .

Первая составляющая определяется несовершенством системы модуляции физических параметров, а вторая — нестабильностью коэффициента передачи второго аттенюатора 7.

При равновеликих частных среднеквадратических составляющих погрешности ( $\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}$ ) формирования обобщенного параметра  $M$ , что на практике обычно имеет место, соотношение (25) можно представить в виде

$$\bar{\sigma}_M = \psi \bar{\sigma} \quad (26)$$

где весовой коэффициент

$$\psi = \sqrt{2 + \frac{1}{x^2 \left( m - \frac{1}{x-1} \right)^2}} \quad (27)$$

Представленная на фиг. 46 графическая интерпретация соотношения (27) в функции параметра  $m$  для различных значений степени аппроксимирующего полинома  $x$  показывает целесообразность выбора значения коэффициента в пределах 0,1 ... 0,2, в отличие от известного устройства, где рекомендовано значение  $m = 0,5$ .

В соответствии с графиком (фиг. 46) при  $m = 0,15$ ,  $x = 2$ , что характерно для полевых транзисторов, весовой коэффициент  $\psi = 1,45$ , и если принять  $\bar{\sigma} = \pm 0,1\%$ , то, согласно (26) или (25),  $\bar{\sigma}_M_{от} = \pm 0,145\%$ . Аналогично для варикапов:  $x = -0,5$ ;  $\psi = 2,5$  и  $\bar{\sigma}_M_B = \pm 0,25\%$ .

Подставляя данные численные значения для  $\bar{\sigma}_M$  в (21) и (22) и принимая  $\frac{\nu}{\nu_0} = 0,25$  (для полевых транзисторов) и  $\frac{\nu}{\nu_0} = -1$  (для варикапов), а также полагая другие частные составляющие, входящие в (21) и (22), равными  $\pm 0,1\%$ , соответственно получаем:  $\bar{\sigma}_{\nu_{отпт}} \approx \pm 0,18\%$ ,  $\bar{\sigma}_{\nu_{отв}} \approx 0$ ,  $\bar{\sigma}_{x_{пт}} \approx \pm 0,2\%$ ,  $\bar{\sigma}_{x_{в}} \approx \pm 0,28\%$ .

На основании (24), по аналогии с (21) и (22), запишем выражение для среднеквадратической составляющей погрешности формирования обобщенного параметра  $M$

Выигрыш в точности измерений порогового напряжения и степени аппроксимирующего полинома в соответствии с (15) для полученных численных значений аддитивных (19), (20) и среднеквадратических (21), (22) составляющих погрешностей составляет: а) при исследовании характеристик полевых транзисторов

$$B_{\nu_{отпт}} = \frac{|\bar{\sigma}_{\nu_{отпт}}|}{|\bar{\sigma}_{\nu_{отпт}}|} \approx 174; \quad B_{x_{пт}} = \frac{|\bar{\sigma}_{x_{пт}}|}{|\bar{\sigma}_{x_{пт}}|} \approx 210;$$

б) при исследовании характеристик варикапов

$$B_{\nu_{отв}} = \frac{|\bar{\sigma}_{\nu_{отв}}|}{|\bar{\sigma}_{\nu_{отв}}|} \rightarrow \infty; \quad B_{x_{в}} = \frac{|\bar{\sigma}_{x_{в}}|}{|\bar{\sigma}_{x_{в}}|} \rightarrow \infty$$

Количественную оценку выигрыша в быстродействии измерений можно произвести лишь ориентировочно на основании сравнения времен уравнивания известного устройства и предлагаемого, которые оказываются примерно равными. Однако известное устройство за это время способно измерить лишь один основной параметр — пороговое напряжение (напряжение отсечки), а предлагаемое устройство — как минимум, два — пороговое напряжение и степень аппроксимирующего полинома. Поэтому можно считать, что выигрыш по быстродействию измерений составляет не менее двух раз.

Таким образом, предлагаемое устройство по сравнению с известным обладает высокой эффективностью и позволяет существенно повысить точность измерений параметров аппроксимации характеристик нелинейных элементов, а также ускорить процесс измерений. Это устройство, как наиболее эффективное, целесообразно для использования в подсистемах технической диагностики нелинейных элементов автоматизированных систем контроля параметров различной радиоэлектронной аппаратуры.

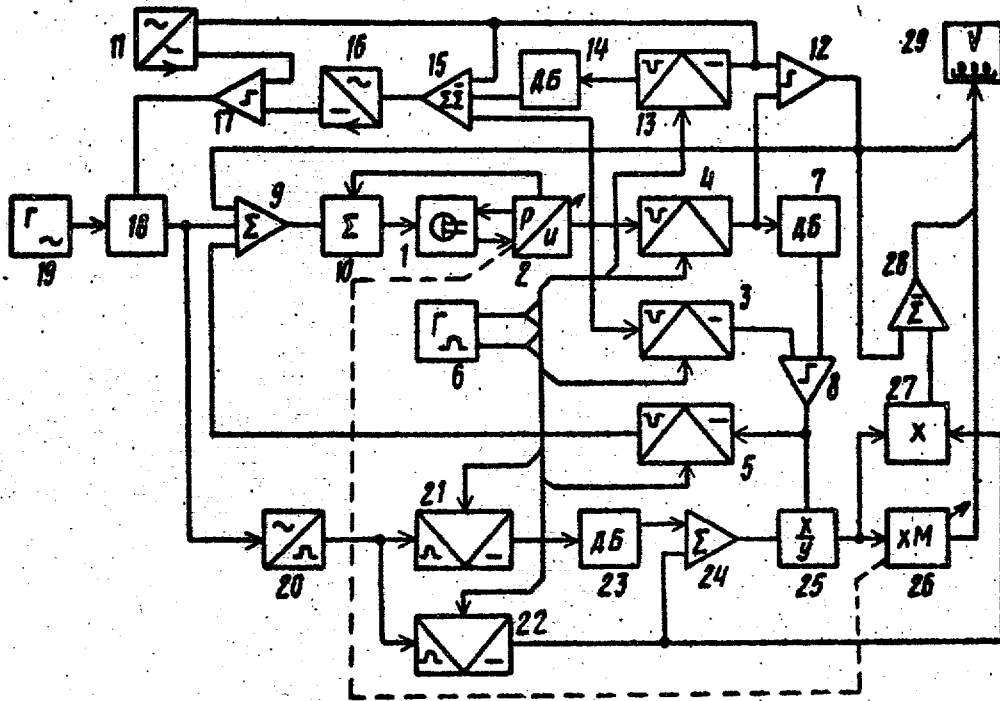
## Ф о р м у л а и з о б р е т е н и я

Устройство для измерения параметров аппроксимации характеристик нелинейных элементов, содержащее регистрирующий прибор, генератор импульсов, выходы которого соединены с управляющими входами первого модулятора, первого и второго синхронных демодуляторов, выход первого синхронного демодулятора подключен через первый аттенюатор к первому входу блока сравнения, второй вход которого соединен с выходом второго синхронного демодулятора, а выход соединен с входом первого модулятора, преобразователь физических параметров в напряжение, первый вход которого соединен с входом первого и второго синхронных детекторов, а второй выход и вход соединены соответственно с первой и второй клеммами для подключения исследуемого прибора, генератор модулирующего напряжения и второй аттенюатор, выход которого подключен к первому входу первого вычитающего блока, о т л и ч а ю щ е е с я тем, что с целью повышения точности и быстродействия измерений, в него введены третий и четвертый аттенюаторы, второй модулятор, третий и четвертый синхронные демодуляторы, масштабный и первый и второй линейные преобразователи напряжений, блок деления, блок умножения, первый и второй суммирующие блоки, суммирующе-вычитающий блок, второй вычитающий блок, второй и третий сравнивающие блоки и блок опорных напряжений, причем выход генератора модулирующего напряжения через третий аттенюатор соединен с входом первого линейного преобразователя напряжений и с первым входом первого суммирующего блока, второй и третий входы которого подключены к выходам первого модулятора и второго сравнивающего блока, а выход - к первому входу второго суммирующего блока, второй вход которого подключен к третьему выходу преобразователя физических параметров в напряжение, а выход - к третьей клемме для подключения исследуемого полупроводникового прибора, первый вход второго сравниваю-

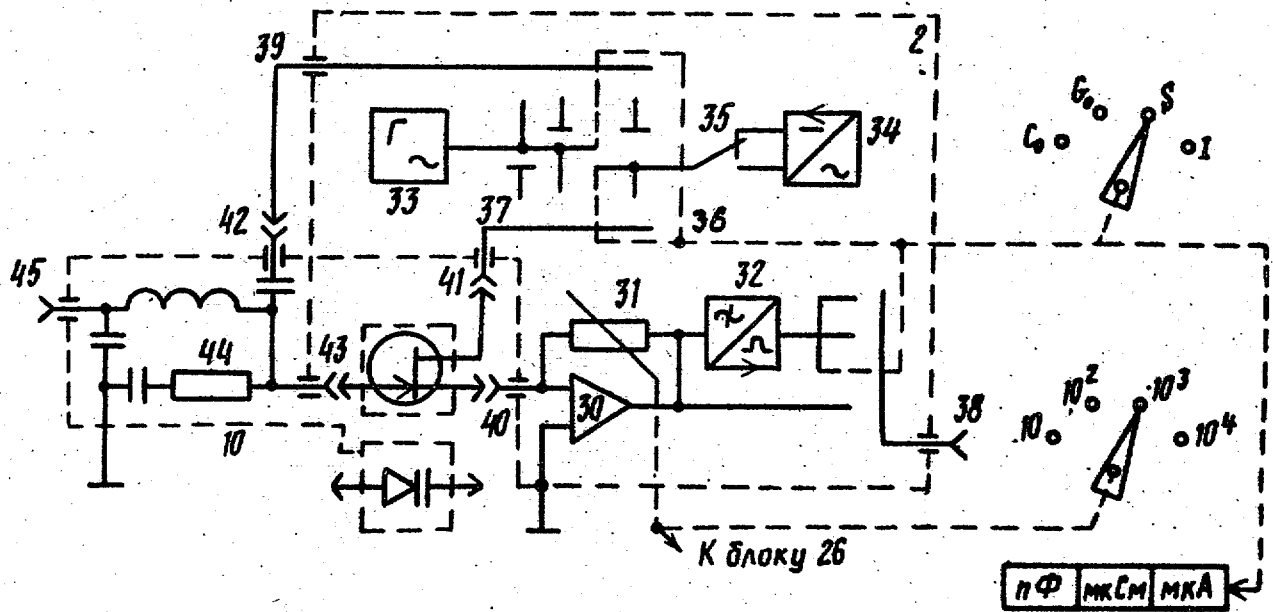
щего блока соединен с выходом второго синхронного демодулятора, второй подключен к входу второго модулятора, первому вычитающему входу суммирующе-вычитающего блока и первому выходу блока опорных напряжений, второй вход третьего аттенюатора подключен к выходу третьего сравнивающего блока, один вход которого соединен с вторым выходом блока опорных напряжений, а второй через второй линейный преобразователь напряжений соединен с выходом суммирующе-вычитающего блока, второй суммирующий вход которого подключен к второму выходу преобразователя физических параметров в напряжение, а третий - через четвертый аттенюатор к выходу второго модулятора, управляющий вход которого подключен к соответствующему выходу генератора импульсов, выход первого линейного преобразователя напряжений соединен с входами третьего и четвертого синхронных демодуляторов, управляющие входы которых подключены к соответствующим выходам генератора импульсов, а выходы - соответственно к входу первого аттенюатора и к вторым входам первого вычитающего и перемножающего блоков, соответствующие входы блока деления соединены с выходами первого сравнивающего и первого вычитающего блоков, а выход - с первым входом перемножающего блока и через масштабный преобразователь напряжений, с одним из входов регистрирующего прибора, другие входы которого подключены отдельно к выходам второго сравнивающего и второго вычитающего блоков, первый вход которого подключен к выходу второго сравнивающего блока, а второй - к выходу перемножающего блока.

Источники информации,

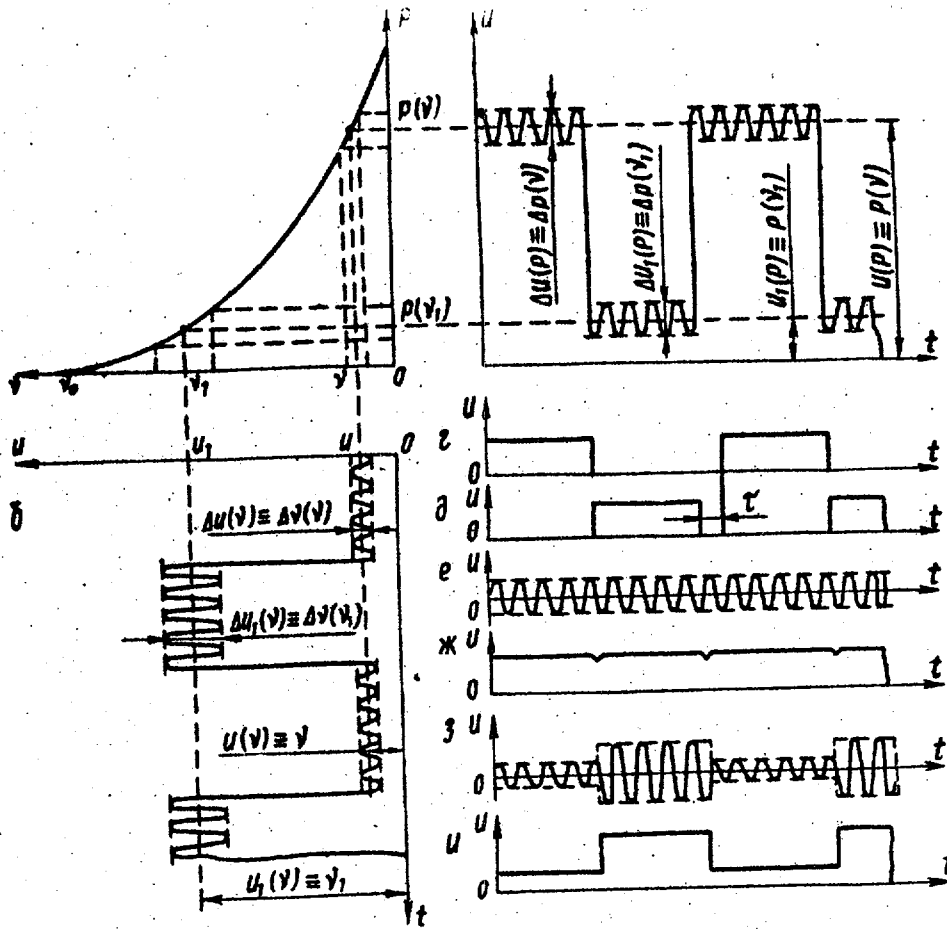
- принятые во внимание при экспертизе
- 45 1. Каскады радиоприемников на полевых транзисторах. Под ред. Н. Г. Петрова. М., "Энергия", 1974, с. 192, (Б-ка по радиоэлектронике, вып. 50) с. 13-17.
  - 50 2. Авторское свидетельство СССР № 543894, кл. G 10 R 31/26, опублик. 18.05.77, (прототип).



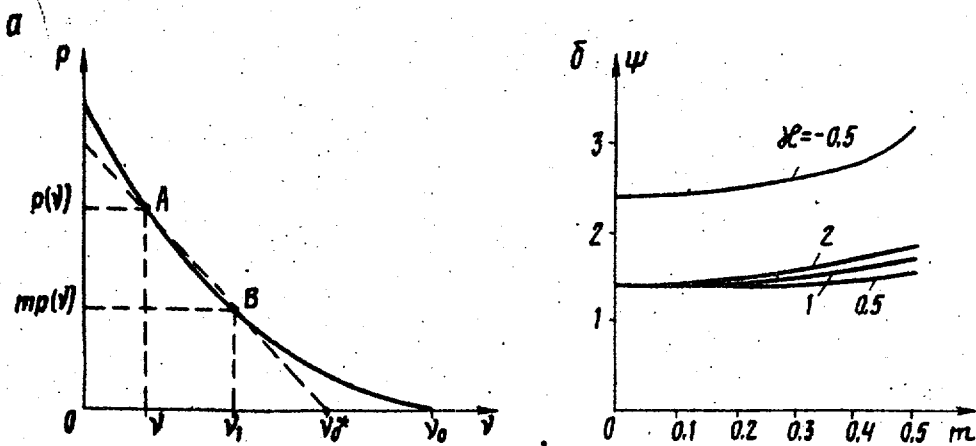
Фиг.1



Фиг.2



Фиг.3



Фиг.4