

Г. Ю. ПАШКОВСКИЙ, В. И. ПРИЦКЕР
(Ленинград)

АНАЛИЗ БЕЗГИСТЕРЕЗИСНОГО ПОРОГОВОГО УСТРОЙСТВА

Пороговые устройства являются одной из основных составных частей электронной аппаратуры, предназначенной для контроля и измерения параметров электрических величин.

Вследствие увеличения рабочих частот и повышения точности измерительных установок применяемые в настоящее время пороговые устройства в ряде случаев не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям. Так, например, при измерении параметров импульсных напряжений быстроедействие триггера Шмитта оказывается недостаточным уже в микросекундном диапазоне длительностей. Часто недопустимо велик и порог чувствительности пороговых устройств. Кроме того, все известные пороговые устройства характеризуются принципиально неустранимым гистерезисом.

В связи с этим несомненный интерес представляет работа [1], в которой изложен принцип построения безгистерезисного порогового устройства, содержащего два последовательно включенных туннельных диода. К сожалению, автором [1] не рассмотрен материал, отражающий параметры, режим работы и методы уменьшения порога чувствительности предложенной им схемы.

Целью настоящей работы является получение аналитических выражений и экспериментальных данных, освещающих указанный круг вопросов.

ПРИНЦИП РАБОТЫ СХЕМЫ И ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

На рис. 1 представлена принципиальная схема порогового устройства, отличающаяся от предложенной в [1] наличием источника тока смещения I_0 .

В [1] предполагается, что токи максимума I_p и минимума I_v характеристик туннельных диодов удовлетворяют неравенствам:

$$I_{p1} < I_{p2}; \quad I_{v1} > I_{v2} \quad (1)$$

(индексы относятся соответственно к туннельным диодам ТД₁ и ТД₂).

Однако представляет интерес анализ порогового устройства для значительно более распространенного на практике случая:

$$I_{p1} < I_{p2}; \quad I_{v1} < I_{v2} \quad (2)$$

Тем более, что полученные результаты, как будет показано ниже, носят общий характер, а некоторые особенности работы, свойственные пороговому устройству при выполнении (1), могут быть рассмотрены отдельно.

Для пояснения принципа работы схемы рассмотрим суммарную вольт-амперную характеристику последовательного соединения двух туннельных диодов (рис. 2).

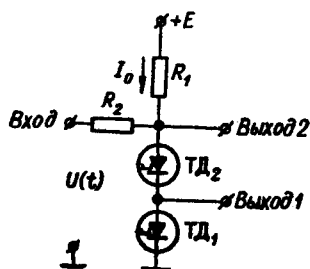


Рис. 1. Принципиальная схема порогового устройства.

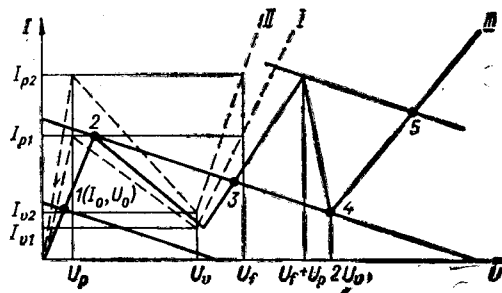


Рис. 2. Суммарная вольт-амперная характеристика (III) туннельных диодов ТД₁ и ТД₂ (I и II).

Кривая рис. 2 построена в предположении равенства характеристических напряжений туннельных диодов:

$$U_{p1} = U_{p2} = U_p; \quad U_{v1} = U_{v2} = U_v; \quad U_{f1} = U_{f2} = U_f,$$

где U_p , U_v — напряжения максимума и минимума вольт-амперных характеристик; U_f — напряжение на диффузионной ветви характеристики, соответствующее пиковому току I_p .

Указанные соотношения достаточно точно выполняются, если ТД₁ и ТД₂ — туннельные диоды одного типа (например, оба германиевые).

При отсутствии входного напряжения оба диода выключены и рабочая точка находится на первом участке положительного сопротивления (точка 1).

Если для сопротивлений R_1 и R_2 выполняются соотношения:

$$R_n = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cong \frac{2(U_v - U_p)}{I_{p1} - I_{p2}}; \quad (3)$$

$$\frac{U_n}{R_2} + \frac{E}{R_1} = I_{p1} + \frac{2U_p}{R_n}, \quad (4)$$

где U_n — пороговый уровень, то при возрастании входного напряжения до порогового уровня линия нагрузки пройдет через точки первого максимума и второго минимума трехстабильной характеристики (точки 2 и 4 на рис. 2). При этом рабочая точка окажется в точке 3 характеристики и туннельный диод ТД₁ перейдет в высоковольтное состояние.

Дальнейшее возрастание входного напряжения приведет к увеличению тока, протекающего через туннельные диоды, а при достижении тока I_{p2} — к переходу в высоковольтное состояние туннельного диода ТД₂ (рабочая точка окажется в точке 5 характеристики).

Очевидно, что условием перехода рабочей точки через второй максимум вольт-амперной характеристики является неравенство

$$\frac{U_{\max} - U_{\Pi}}{R_2} > I_{p2} + \frac{U_f - U_p}{R_{\Pi}} - I_{p1}, \quad (5)$$

где U_{\max} — амплитудное значение входного напряжения.

Если теперь входное напряжение будет уменьшаться, то при достижении порогового уровня линия нагрузки опять пройдет через точки 2 и 4 характеристики, рабочая точка вновь окажется в точке 3, а туннельный диод ТД₂ перейдет в выключенное состояние.

Дальнейшее уменьшение входного напряжения приведет к переходу туннельного диода ТД₁ в низковольтное состояние и возврату рабочей точки в исходную точку 1. Условие восстановления исходного состояния имеет вид

$$\frac{E}{R_1} < I_{v1} + \frac{U_v}{R_{\Pi}}. \quad (6)$$

Из описания работы схемы следует, что момент достижения порогового уровня при увеличении входного напряжения соответствует моменту включения диода ТД₁, а при уменьшении входного напряжения — моменту выключения диода ТД₂.

Указанные моменты времени могут быть зарегистрированы с помощью двух ключевых каскадов, подключенных соответственно к выходам 1 и 2 порогового устройства.

ПОРОГ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ СХЕМЫ

Так как, согласно рис. 2,

$$\frac{E}{R_1} = I_0 + \frac{U_c}{R_1}, \quad (7)$$

а для линейно аппроксимированной характеристики

$$\frac{U_0}{I_0} \cong \frac{2U_p}{I_p},$$

то выражение (3) можно записать в виде

$$U_{\Pi} = R_2 \left[I_{p1} - I_0 \left(1 + \frac{2U_p}{I_{p1} R_{\Pi}} \right) + \frac{2U_p}{R_{\Pi}} \right]. \quad (8)$$

Согласно (8), пороговое напряжение будет тем меньше, чем меньше величина сопротивления R_2 .

В соответствии с (3) при $R_1 \rightarrow \infty$ (смещение осуществляется от источника тока) сопротивление R_2 стремится к своему минимальному значению:

$$R_{2 \min} = R_{\Pi}. \quad (9)$$

Тогда на основании (3), (8) и (9) порог чувствительности схемы будет определяться выражением

$$U_{\Pi.ч} = \frac{2(U_v - U_p)}{1 - \frac{\mu}{\eta_2}} \left[1 + \frac{U_p}{U_v - U_p} \left(1 - \frac{\mu}{\eta_2} \right) \right] \left(1 - \frac{I_0}{I_{p1}} \right). \quad (10)$$

где

$$\mu = \frac{I_{p2}}{I_{p1}}; \quad \eta_2 = \frac{I_{p2}}{I_{v2}}. \quad (11)$$

Анализ этого выражения позволяет сделать ряд выводов.

1. Германиевые туннельные диоды при прочих равных условиях позволяют получить большую чувствительность, так как напряжения U_v , U_p этих диодов меньше, чем арсенидо-галлиевых.

2. Чувствительность порогового устройства не зависит от абсолютных значений токов туннельных диодов.

3. Для увеличения чувствительности следует использовать туннельные диоды с малым значением μ и большим η_2 (при этом, разумеется, необходимо выполнение неравенства $\mu > 1$).

Из этого же выражения следует, что порог чувствительности схемы неограниченно уменьшается ($U_{п.ч} \rightarrow 0$) при увеличении тока смещения туннельных диодов ($I_0/I_{p1} \rightarrow 1$).

Однако следует учесть, что реальное значение порога чувствительности порогового устройства ограничено условиями перехода рабочей точки через второй максимум суммарной вольт-амперной характеристики (5) и возврата порогового устройства в исходное состояние (6).

Рассмотрим эти условия подробнее. Введем понятие относительного порогового уровня

$$k = \frac{U_{п.ч}}{U_{\max}}. \quad (12)$$

Тогда, используя (3), (9), (11), (12), условия (5) и (6) можно записать в виде:

$$U_{\max} > \frac{1}{1-k} \left[2 \frac{\mu-1}{1-\frac{\mu}{\eta_2}} (U_v - U_p) + U_f - U_p \right]; \quad (13)$$

$$U_{\max} > \frac{1}{k} \left[\frac{2 \left(1 - \frac{1}{\eta_1} \right)}{1 - \frac{\mu}{\eta_2}} - 1 \right] (U_v - U_p), \quad \eta_1 = \frac{I_{p1}}{I_{v1}}. \quad (14)$$

Полученные выражения определяют область значений амплитуды входного напряжения, при которых возможен режим автоматического перехода рабочей точки через второй максимум характеристики [см. выражение (14)]. Анализ выражений (13) и (14) позволяет сделать следующие выводы.

1. При использовании германиевых туннельных диодов, имеющих меньшие значения напряжений U_f , U_v , U_p , чем арсенидо-галлиевые диоды, автоматический режим работы может быть обеспечен для меньших значений U_{\max} и k .

2. Область, соответствующая автоматическому режиму работы, расширяется при уменьшении μ и η_1 и увеличении η_2 .

На рис. 3 изображены семейства зависимостей $U_{\max} = f_1(k)$ и $U_{\max} = f_2(k)$, построенные, согласно (13) и (14), для германиевых туннельных диодов ($U_f = 500$ мв; $U_v = 300$ мв; $U_p = 50$ мв) и ряда значений μ , η_1 и η_2 . Графики рис. 3 позволяют определить режим работы порогового устройства, соответствующий заданным значениям k и U_{\max} . Так, например, если точка с координатами k , U_{\max} лежит выше кривых

$U_{\max}=f_1(k)$ и $U_{\max}=f_2(k)$, взятых для данных значений μ , η_1 и η_2 (область А), то режим работы будет автоматическим, если ниже, то необходим как принудительный переброс, так и принудительный возврат в исходное состояние (область Г). Для некоторых значений k и U_{\max} будет необходим либо принудительный возврат (область Б), либо принудительный переброс (область В).

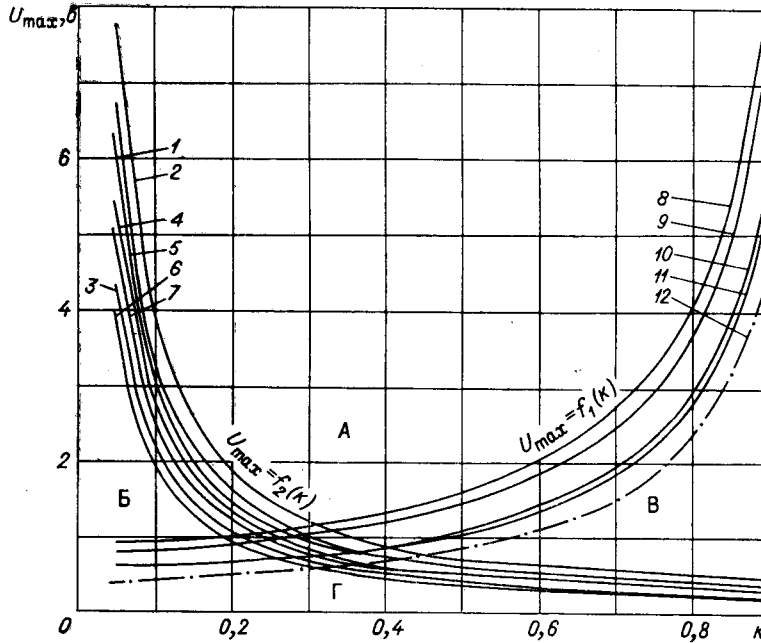


Рис. 3. Графики зависимости амплитуды входного напряжения от величины нормированного порогового уровня:

- 1 — $\mu=1,5$, $\eta_2=5$, $\eta_1=5$; 2 — $\mu=1,5$, $\eta_2=5$, $\eta_1=10$; 3 — $\mu=1,5$, $\eta_2=10$, $\eta_1=5$;
 4 — $\mu=1,5$, $\eta_2=10$, $\eta_1=10$ и $\mu=k,2$, $\eta_2=5$, $\eta_1=5$; 5 — $\mu=1,2$, $\eta_2=5$, $\eta_1=10$;
 6 — $\mu=1,2$, $\eta_2=10$, $\eta_1=5$; 7 — $\mu=1,2$, $\eta_2=10$, $\eta_1=10$; 8 — $\mu=1,5$, $\eta_2=5$; 9 — $\mu=1,5$,
 $\eta_2=10$; 10 — $\mu=1,2$, $\eta_2=5$; 11 — $\mu=1,2$; $\eta_2=10$; 12 — $\mu=1$.

Естественной мерой, позволяющей обеспечить работу порогового устройства при значениях параметров входного сигнала, лежащих в областях Б, В и Г, является применение формирователя, выходные импульсы которого в определенные моменты времени осуществляли бы переброс рабочей точки схемы через второй максимум суммарной характеристики и возврат порогового устройства в исходное состояние.

Ввиду того, что при использовании такого формирователя ограничения, накладываемые условиями (13) и (14), снимаются, порог чувствительности схемы будет полностью определяться выражением (10). Расчеты, проведенные, согласно (10), для типовых значений напряжений германиевых диодов, показывают, что при $\frac{I_0}{I_{p1}} = 0,9$ порог чувствительности схемы будет составлять величину порядка 65—70 мв.

Рассмотрим теперь особенности, характерные для порогового устройства в случае выполнения неравенств (1). Легко заметить, что вид суммарной вольт-амперной характеристики в этом случае останется прежним, за исключением лишь того, что первый минимум характеристики будет теперь определяться током I_{v2} , а второй — током I_{v1} .

В соответствии с этим при взаимной замене I_{v1} на I_{v2} останутся справедливыми и все полученные в процессе анализа выражения. ●

В то же время принцип работы такого порогового устройства будет несколько иным. Действительно, достижение порогового уровня как при увеличении, так и при уменьшении входного сигнала будет сопровождаться изменением состояния одного и того же туннельного диода ТД₁ [1] и, следовательно, может быть зарегистрировано с помощью одного ключевого каскада, подключенного к выходу 1 порогового устройства. Это обстоятельство приводит к существенному упрощению как самого порогового устройства, так и последующих измерительных цепей.

Следует, правда, отметить, что в некоторых случаях указанное преимущество не может быть реализовано. Как известно, выключение транзистора, работающего в ключевом режиме, происходит с задержкой, вследствие чего может возникнуть значительная ошибка в регистрации момента достижения порогового уровня при уменьшении входного напряжения.

Известно также, что время задержки может быть значительно снижено за счет введения нелинейной обратной связи [2]. Однако порог срабатывания ключевого каскада с нелинейной обратной связью обычно больше, чем напряжение U_f туннельных диодов, что приводит к необходимости подключения такого каскада к выходу 2 порогового устройства. При этом, разумеется, необходим и второй ключевой каскад, подключенный к выходу 1 и регистрирующий момент достижения порогового уровня при возрастании входного сигнала.

Кроме того, выполнение условий (1) путем подбора туннельных диодов затруднительно и, как правило, достигается путем деформации вольт-амперной характеристики одного из диодов [1], что приводит к некоторому усложнению порогового устройства.

Таким образом, выбор того или иного варианта порогового устройства вряд ли может быть сделан без учета конкретных требований к точности, простоте схемы и взаимозаменяемости ее элементов.

ФОРМИРОВАТЕЛЬ ИМПУЛЬСОВ ПЕРЕБРОСА И ВОЗВРАТА

Принципиальная схема одного из возможных вариантов формирователя, вырабатывающего как импульс переброса, так и импульс возврата, изображена на рис. 4.

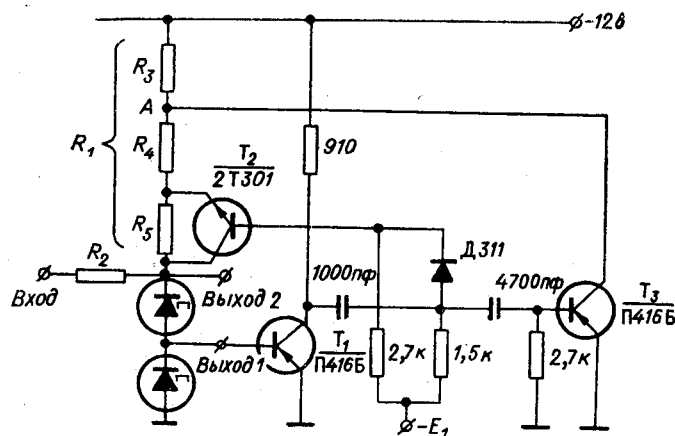


Рис. 4. Принципиальная схема формирователя

Сопровождающие сопротивления R_1 (составлено из цепочки $R_3 - R_5$) и R_2 совместно с туннельными диодами ТД₁ и ТД₂ образуют пороговое устройство, предназначенное для работы с отрицательным входным напряжением. При этом предполагается, что параметры туннельных диодов удовлетворяют неравенствам (1).

Схема принудительного переброса и возврата собрана на полупроводниковых триодах Т₁, Т₂, Т₃ и работает следующим образом. В исходном состоянии туннельные диоды выключены и триоды Т₁, Т₂, Т₃ закрыты (на базу Т₂ подано напряжение E_1 более отрицательное, чем напряжение на его эмиттере).

При превышении входным сигналом порогового уровня туннельный диод ТД₁ переходит в высоковольтное состояние и на коллекторе Т₁ формируется положительный перепад напряжения. Вследствие этого триод Т₂ открывается, ток смещения туннельных диодов возрастает до величины, превышающей I_{p2} , и туннельный диод ТД₂ переходит в высоковольтное состояние. Таким образом, осуществляется переброс рабочей точки через второй максимум трехстабильной характеристики.

При достижении порогового уровня в процессе уменьшения входного напряжения туннельный диод ТД₁ переходит в низковольтное состояние и триод Т₁ закрывается.

Отрицательный перепад напряжения, формируемый на его коллекторе, открывает триод Т₃, вследствие чего потенциал точки А становится близким к нулевому; ток смещения туннельных диодов резко уменьшается, и туннельный диод ТД₂ также переходит в низковольтное состояние.

Для нормальной работы схемы необходимо, чтобы ток смещения туннельных диодов в момент переброса превысил I_{p2} . Учитывая, что при протекании тока I_{p2} на туннельных диодах падает напряжение $U_f + U_p$, условие переброса может быть записано в виде

$$R_3 + R_4 \leq \frac{E - (U_f + U_p)}{U_f + U_p + I_{p2} R_2} R_2. \quad (15)$$

Величина сопротивления R_3 определяется допустимым током $I_{к.доп}$ триода Т₃:

$$R_3 \geq \frac{E}{I_{к.доп}}.$$

Если параметры туннельных диодов порогового устройства удовлетворяют неравенствам (2), то схема формирования импульса возврата должна быть несколько изменена. В этом случае сигнал возврата должен поступать на вход триода Т₃ с выхода ключевого каскада, подсоединенного к выходу 2 порогового устройства.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В процессе эксперимента была проверена работоспособность порогового устройства совместно с формирователем рис. 4 в режиме, соответствующем области Г.

Для построения порогового устройства были использованы туннельные диоды, имеющие соответственно параметры: $I_{p1} = 9,7 \text{ ма}$; $I_{p1} = 1,35 \text{ ма}$; $I_{p2} = 10,3 \text{ ма}$; $I_{v2} = 1,0 \text{ ма}$.

Запуск порогового устройства осуществляется отрицательным пи-

лообразным напряжением частотой 100 кГц и амплитудой 0,45 в через эмиттерный повторитель с выходным сопротивлением 10 ом.

Расчет схемы был проведен для относительного порога срабатывания $k=0,25$, в соответствии с чем расчетная величина порога срабатывания равнялась $U_n = k \cdot U_{max} = 112 мв$.

На рис. 5, а представлены осциллограммы напряжений (сверху вниз) на коллекторе T_1 , выходе 1, 2 и входе порогового устройства, по-

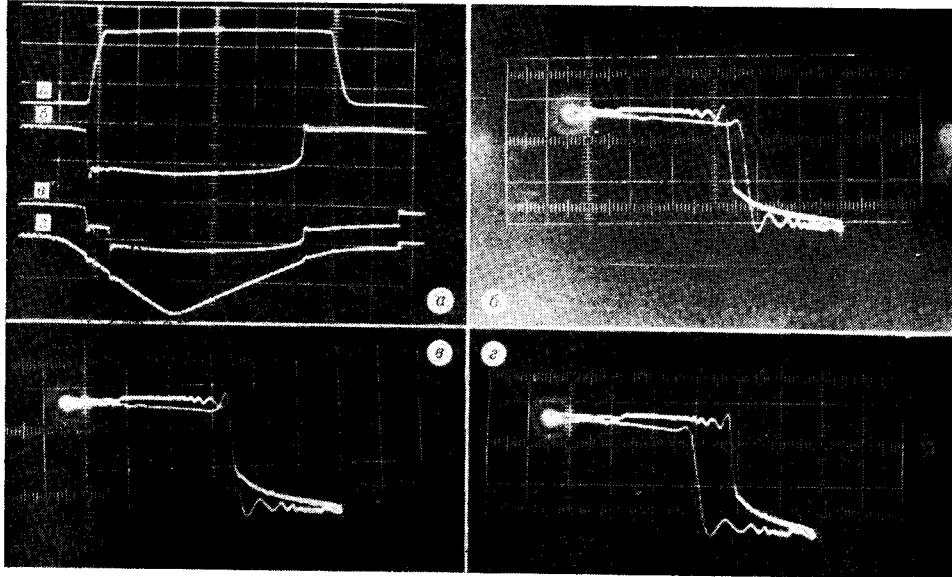


Рис. 5. Осциллограммы напряжений (а) на выходе транзисторного ключа (чувствительность по вертикали 5 в/см), на выходе 1 порогового устройства (чувствительность по вертикали 0,5 в/см), на выходе 2 порогового устройства (чувствительность по вертикали 1,0 в/см), на входе порогового устройства (чувствительность по вертикали 0,25 в/см); масштаб по горизонтали 0,5 мксек/см; осциллограммы петли гистерезиса — положительного (б), нулевого (в), отрицательного (г) (чувствительность по вертикали 0,1 в/см, по горизонтали 0,1 в/см).

лученные на экране четырехлучевого осциллографа С1-17. На верхней осциллограмме отчетливо видна задержка выключения триода T_1 , равная приблизительно 0,3 мксек.

Измеренное значение порогового напряжения составило величину 120 мв, что приблизительно на 15% превышает расчетное значение. При уменьшении порога срабатывания до 75 мв расхождение расчетных и экспериментальных данных несколько увеличивалось, не превышая, однако, 25%.

Экспериментальной проверке были подвергнуты также графики рис. 3. С этой целью путем уменьшения амплитуды входного напряжения при неизменном пороге срабатывания схемы был осуществлен последовательный переход из области А в области Б и Г и из области А в области В и Г; при этом определялись значения U_{max} , соответствующие границам указанных областей.

Было обнаружено, что значения U_{max} , определенные экспериментально, превышают расчетные не более чем на 20% вплоть до $U_{max} = 0,2 в$.

Для контроля гистерезиса порогового устройства, периодически проводимого в процессе эксперимента, напряжение с выхода I подавалось на вход Y , а входное напряжение через усилитель на пластины X осциллографа С1-8.

На рис. 5, б, в, г представлены фотографии кривых, полученных соответственно для положительного (порог включения ТД₁ больше порога выключения), нулевого и отрицательного гистерезиса. Изменение величины гистерезиса осуществлялось путем регулировки сопротивления R_2 .

ЛИТЕРАТУРА

1. R. A. Каепел. Histeresis — free Tunnel Diode Comparator.— IRE Trans. on Electr. Computers, 1962, v. EC-11, № 2.
2. Б. Н. Кононов. Симметричные триггеры на плоскостных полупроводниковых триодах. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.

*Поступила в редакцию
27 декабря 1966 г.,
окончательный вариант —
18 апреля 1967 г.*