

Э. ПООСЕ

## РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДНЫХ ДЕТЕКТОРОВ МАШИНЫМ МЕТОДОМ ПРИПАСОВЫВАНИЯ

При расчете диодного детектора (рис. 1) возникает типичная задача расчета нелинейной электрической цепи, в которой скоррелированы выходное напряжение ( $u_N$ ) и сопротивление диода ( $r_D$ ). Значения обоих этих параметров зависят от детектируемого напряжения ( $u_X$ ) и от параметров схемы детектора ( $R_N$  и  $C$ ). В настоящей работе эта задача решается на ЭЦВМ методом припасовывания элементарных функций включения к линейно-сегментной аппроксимации вольт-амперной характеристики диода.

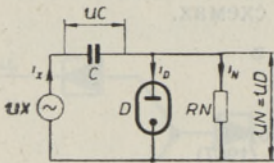


Рис. 1. Электрическая схема однополупериодного пикового детектора с «закрытым» входом.

С момента изобретения Д. Флемингом в 1904 году электровакуумного диода было предложено множество методов расчета статических и переходных характеристик диодных детекторов: методы характеристик выпрямления; метод трех и пяти ординат; метод суммирования; метод угла отсечки; метод, основанный на использовании формул разложения по бесселевым функциям от мнимого аргумента; методы параболического детектора; метод гиперболического тангенса; методы релейного детектора; метод интегрируемой аппроксимации (припасовывания, переключаемых сопротивлений), метод точек и много других. Однако все эти графические, графо-аналитические и аналитические методы не обеспечивают при расчете детекторов в широком диапазоне изменения их характеристик и параметров той необходимой точности, которая достигнута в настоящее время экспериментом. Если, например, переменные напряжения можно измерять с погрешностью до десятых и сотых долей процента [1], то погрешность расчетов составляет десятки и даже сотни процентов. Такое положение обусловлено исчерпанностью возможностей существующих методов расчета, базирующихся в основном на довольно грубой аппроксимации вольт-амперных характеристик диодов «простыми» формулами (линейно-ломаная, квадратичная, экспоненциальная аппроксимации). Единственной возможностью, на наш взгляд, повысить точность расчетов диодных детекторов является разработка специальных машинных методов расчета.

В работе [2] автором предложен машинный алгоритм расчета подобных электрических цепей (детекторов) методом припасовывания элементарных функций включений к вольт-амперной характеристике диода, аппроксимированной эмпирической формулой.\* В [3] приведены некоторые примеры расчета однополупериодных детекторов по этому алго-

\* Данная здесь формулировка уточняет прежнее наименование метода.

ритму и выявлен следующий недостаток: выведенные ранее (на основе экспоненциальной и линейно-ломаной аппроксимации) характеристики детектора могут в значительной мере отличаться от таковых у реального детектора.

Для устранения указанного недостатка алгоритма в последнем между 5 и 6-м блоками (см. рис. 4 в [2]) был включен дополнительный блок расчета, в котором осуществляется припасовывание напряжения ( $u_D$ ) на электродах диода к соответствующему сегменту вольт-амперной характеристики, вводимой в алгоритм в виде исходной информации.

В данной статье приводятся результаты расчета статических и переходных характеристик диодного детектора, проведенного по уточненному таким образом алгоритму. Из партии было выбрано два диода типа Н-66 (№ 135 и 139), обладающих крайними вольт-амперными характеристиками (рис. 2). Вольт-амперная характеристика диодов аппроксимировалась тридцатью сегментами\*\*, при этом среднеквадратичная ошибка отклонений от реальной характеристики составила  $\sigma \approx 0,02$ .

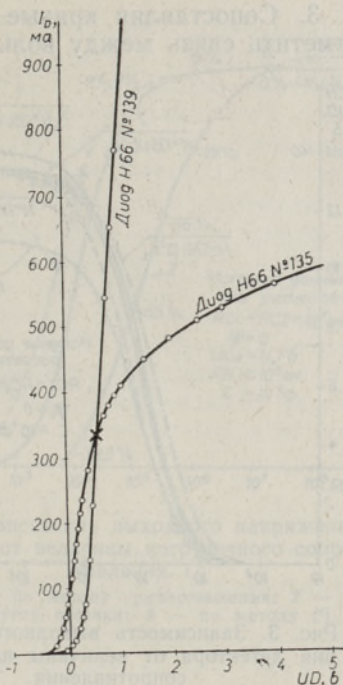


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диодов типа Н-66.

## 1. Статические характеристики

Для детектора, представленного на рис. 1, были рассчитаны нагрузочные, частотные и амплитудные характеристики в случае двух указанных диодов с предельными вольт-амперными характеристиками.

Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик показало, что первые не выходят за пределы доверительного интервала погрешности определения последних даже в случае сравнительно узкого интервала ( $\pm 0,3\%$ ), достигаемого при помощи приборов ВЗ-24 и В7-11.\*\*\*

Это указывает на то, что режим машинного расчета был выбран правильно.

По таблицам расчетных данных построены графики рис. 3, из которых можно заключить следующее.

1. При разных входных напряжениях ( $UX_M$ ), начиная с величин  $RN \sim (10^5 \div 10^6)$  ом, кривые идут почти параллельно оси абсцисс, что указывает на относительную независимость коэффициента передачи детектора от сопротивления нагрузки. Непропорциональные по сравнению с  $UX_M$  промежутки между кривыми 1 и 2, а также 2 и 3 указывают на нелинейное уменьшение коэффициента передачи детектора.

2. При  $RN > 10^6$  ом происходит совпадение кривой 4, снятой при меньшей частоте входного сигнала ( $F = 400$  гц), с кривой 2 ( $10^3$  гц). При  $RN < 10^6$  ом кривая 4 идет ниже кривой 2, что объясняется частотной зависимостью характеристик детектора (подробнее см. рис. 4).

\*\* Количество сегментов выбиралось по критерию необходимой точности расчета. Методика определения количества сегментов требует специального рассмотрения.

\*\*\* В основном же погрешность измерения определялась погрешностью вольтметра ВК7-15 на пределах измерения постоянного напряжения.

3. Сопоставляя кривые 2 и 5 на рис. 3 с кривыми рис. 2, можно заметить связь между вольт-амперными и нагрузочными характеристиками разных диодов. При больших нагрузках, когда  $UD \approx 0,6$  в, нагрузочная характеристика диода № 139 (кривая 5 на рис. 3) идет выше нагрузочной характеристики диода № 135 (кривая 2 на рис. 3), так как в данном режиме импульсы тока у диода № 139 больше, чем у диода № 135 (см. рис. 2). При  $UD < 0,6$  в кривая 5 идет ниже кривой 2, что соответствует обратному режиму. На рис. 2 и 3 точка перехода этих кривых отмечена крестиком (точка А).

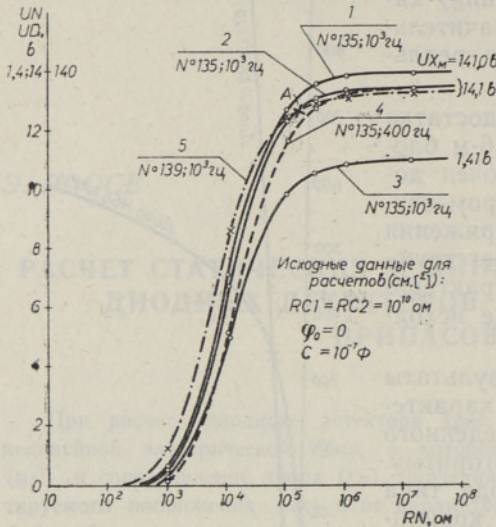


Рис. 3. Зависимость выходного напряжения детектора от величины нагрузочного сопротивления.

При больших нагрузках, когда  $UD \approx 0,6$  в, нагрузочная характеристика диода № 139 (кривая 5 на рис. 3) идет выше нагрузочной характеристики диода № 135 (кривая 2 на рис. 3), так как в данном режиме импульсы тока у диода № 139 больше, чем у диода № 135 (см. рис. 2). При  $UD < 0,6$  в кривая 5 идет ниже кривой 2, что соответствует обратному режиму. На рис. 2 и 3 точка перехода этих кривых отмечена крестиком (точка А).

На рис. 4 приведена расчетная частотная характеристика детектора (кривая 1), достаточно точно совпадающая с экспериментально снятыми данными.

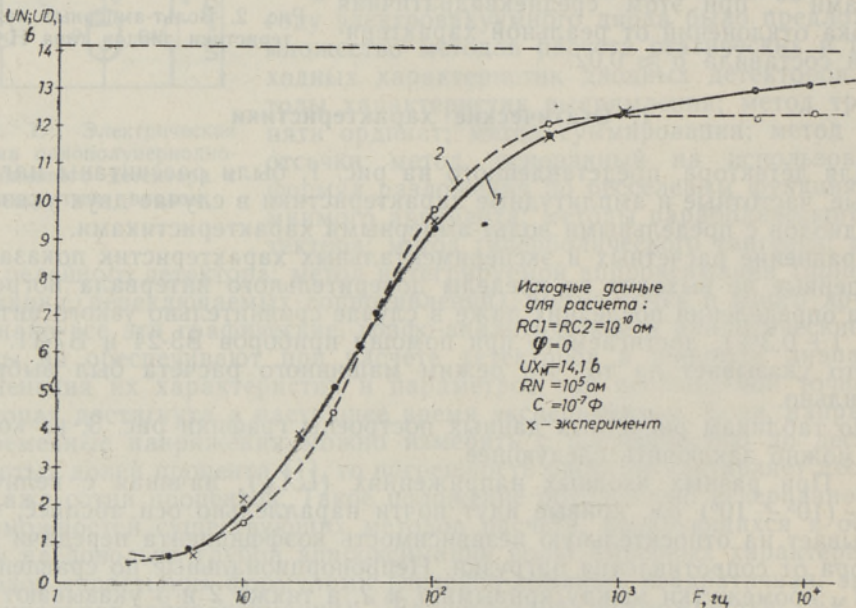


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения детектора от частоты детектируемого сигнала для диода H-66 № 135.

1 — расчет по методу припасовывания; 2 — по методу угла отсечки ( $\theta = 29^\circ$ ).

На рис. 5 (кривая 1) приведена амплитудная характеристика детектора.

Сравним результаты расчета детектора, полученные в данной работе с результатами применения некоторых распространенных аналитических методов.

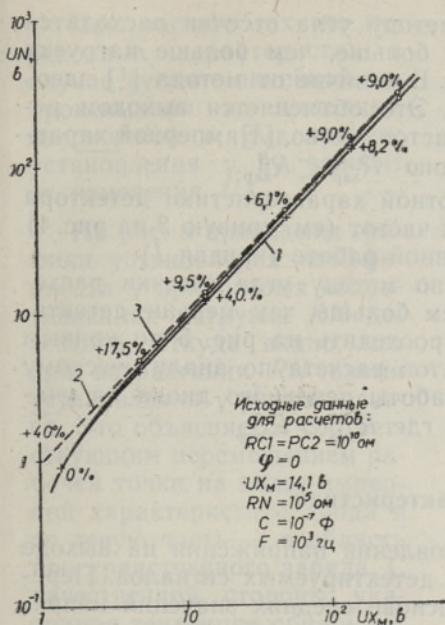


Рис. 5. Амплитудная характеристика детектора.

1 — расчет по методу припасовывания; 2 — по методу угла отсечки (проценты отклонений даны сверху); 3 — по методу разложения по бесселевым функциям от мнимого аргумента [4] (проценты — снизу).

Во-первых, расхождение результатов расчета по этому методу с результатами данной работы тем больше, чем больше нагрузка детектора (ср. кривые 1 и 3 на рис. 6). Около точек кривой 3 отмечено их относительное отклонение от соответствующих точек кривой 1. Завышенность результатов расчета по аналитическому методу объясняется выходом режима работы реального диода за пределы экспоненциального участка его вольт-амперной характеристики, где заряжающие конденсатор  $C$  токовые импульсы меньше, чем рассчитываемые при использовании экспоненциальной вольт-амперной характеристики.

Во-вторых, метод [4] не применим для расчета частотной характеристики.

В-третьих, результаты расчета  $UN$  по методу [4] расходятся с результатами данной работы тем больше, чем больше детектируемое напряжение  $UX_M$ . Это можно проследить на рис. 5 по кривым 1 и 3. Причина завышенности результатов расчета по аналитическому методу та же, что и в первом случае.

Для сравнения с результатами расчетов по методу угла отсечки [5] необходимо зафиксировать исходную точку расчета. Выберем ее на участке нагрузочной характеристики, где коэффициент передачи детектора не зависит от нагрузки (см. на рис. 6 точку  $B$ ). Предполагая линейность вольт-амперной характеристики ( $I_D \geq 0$ ) диода при прохождении ее через эту точку, найдем, что угол отсечки  $\theta = 16^\circ$ , а сопротивление цепи заряда конденсатора  $R_{зар}^B = 3,74 \cdot 10^4$  ом. На основе  $R_{зар}^B$  произведем расчет нагрузочных, частотных и амплитудных характеристик детектора по методу угла отсечки. Результаты расчетов приведены на рис. 4, 5 и 6. По этим графикам можно заключить следующее.

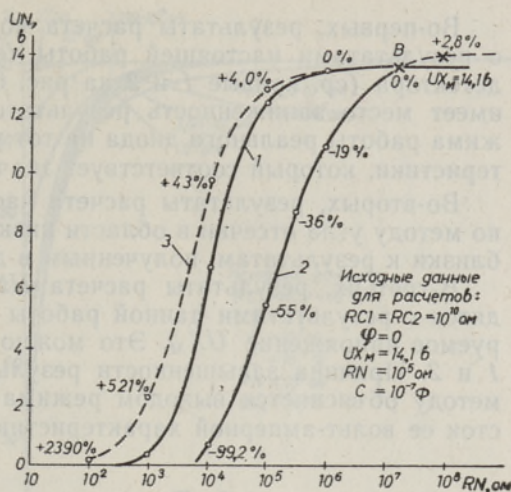


Рис. 6. Зависимость выходного напряжения детектора от величины нагрузочного сопротивления.

1 — расчет по методу припасовывания; 2 — по методу угла отсечки; 3 — по методу [4].

Возьмем метод расчета, основанный на использовании формул разложения по бесселевым функциям от мнимого аргумента [4].

Во-первых, результаты расчета по методу угла отсечки расходятся с результатами настоящей работы тем больше, чем больше нагрузка детектора (ср. кривые 1 и 2 на рис. 6). В отличие от метода [4] здесь имеет место заниженность результатов. Это объясняется выходом режима работы реального диода на тот участок его вольт-амперной характеристики, который соответствует значению  $R_{зар} < R_{зар}^B$ .

Во-вторых, результаты расчета частотной характеристики детектора по методу угла отсечки в области низких частот (см. кривую 2 на рис. 4) близки к результатам, полученным в данной работе (кривая 1).

В-третьих, результаты расчета  $UN$  по методу угла отсечки расходятся с результатами данной работы тем больше, чем меньше детектируемое напряжение  $UX_M$ . Это можно проследить на рис. 5 по кривым 1 и 2. Причина завышенности результатов расчета по аналитическому методу объясняется выходом режима работы реального диода на участок ее вольт-амперной характеристики, где  $R_{зар} > R_{зар}^B$ .

## 2. Переходные характеристики

На рис. 7 приведены графики установления напряжения на выходе детектора при разных амплитудах  $UX_M$  детектируемых сигналов. Переходные характеристики вычерчены на основе средних значений напряжений на выходе детектора, а относительный коэффициент передачи детектора рассчитывается по формуле

$$\gamma = \frac{UN_i}{UN_{уст}},$$

где  $UN_i$  — среднее значение выходного напряжения детектора на  $i$ -м периоде ( $T$ ) детектируемого напряжения;  $UN_{уст}$  — среднее значение установившегося выходного напряжения, т. е. когда  $UN_i = UN_{i+1}$ .

Из графиков рис. 7 видно, что при возрастании  $UX_M$  сначала наблюдается ускорение (см. по порядку кривые 1—4), а потом замедление установления (см. по порядку кривые 4—6). Ускорение объясняется постепенным уменьшением динамического сопротивления диода в цепи заряда конденсатора ввиду выхода режима из области пространственного заряда диода, а замедление объясняется возрастанием сопротивления диода при заходе режима в область насыщения тока катода.

В случае расчета аналогичных переходных характеристик на основе экспоненциальной аппроксимации вольт-амперной характеристики диода [3] наблюдается только тенденция ускорения установления относительного коэффициента передачи детектора (см. пунктирные кривые 1, 3, 5 на рис. 7).

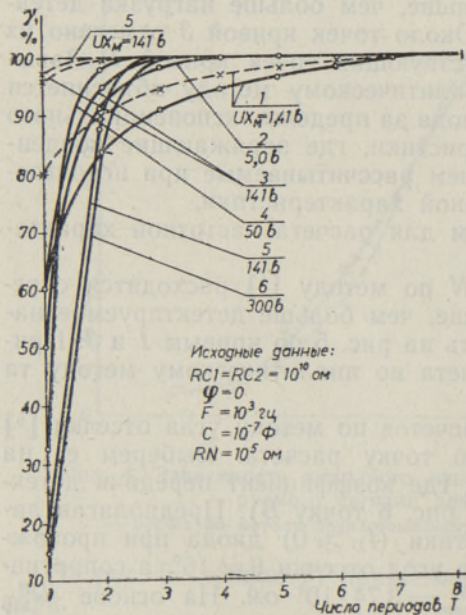


Рис. 7. Относительное установление выходного напряжения детектора при разных значениях  $UX_M$ .

При расчете тех же переходных характеристик в случае кусочно-линейной аппроксимации по методике, изложенной в [6], процесс установления  $\gamma$  не зависит от изменения  $UX_M$ .

На рис. 8 приведены графики установления коэффициента  $\gamma$  при разных сопротивлениях нагрузки  $RN$  детектора, откуда видно, что при возрастании  $RN$  время установления  $\gamma$  увеличивается. Это объясняется соответствующим перемещением рабочей точки на вольт-амперной характеристике диода в ее левую часть — в область пространственного заряда. С качественной стороны указанная тенденция обнаруживается и при расчете детектора в случае кусочно-линейной аппроксимации вольт-амперной характеристики диода [6].

На рис. 9 приведены графики установления коэффициента  $\gamma$  при разных частотах  $F$  детектируемого сигнала, откуда видно, что при возрастании  $F$  количество периодов, необходимых для полного установления  $\gamma$  и  $UN$ , увеличивается. Это увеличение находится в прямой зависимости от постоянной времени  $\tau$  цепи заряда конденсатора. Когда  $\frac{1}{F} \lesssim \tau$ , конденсатор не успевает заряжаться за первые периоды прохождения входного сигнала. Аналогичное явление выявляется и в результате расчетов по методике работы [6].

На рис. 10 приведены выходные напряжения детектора в неустановившемся режиме при разных значениях частоты сигнала. Из графиков видно, что до частоты  $F \approx 100$  гц амплитуда первого положительного импульса напряжения  $un$  практически не зависит от частоты. При тех же условиях отрицательные импульсы уменьшаются при увеличении  $F$ .

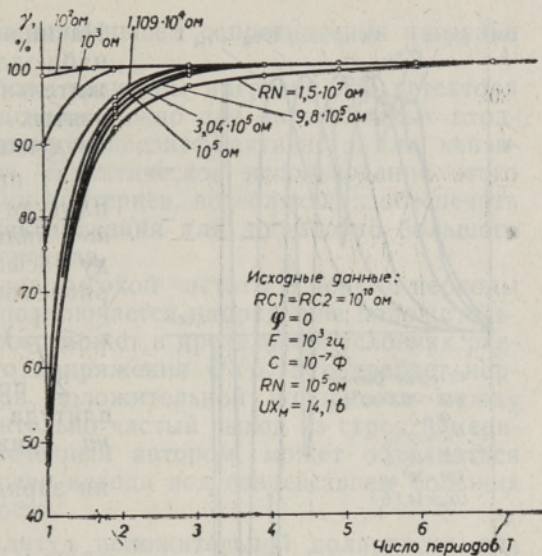


Рис. 8. Относительное установление выходного напряжения детектора при разных значениях  $RN$ .

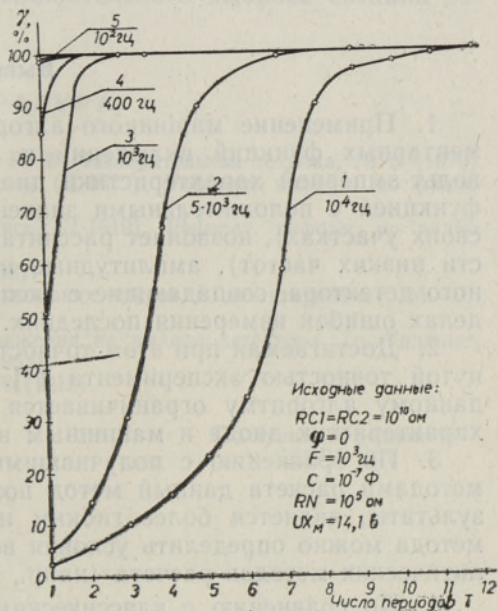


Рис. 9. Относительное установление выходного напряжения детектора при разных значениях  $F$ .

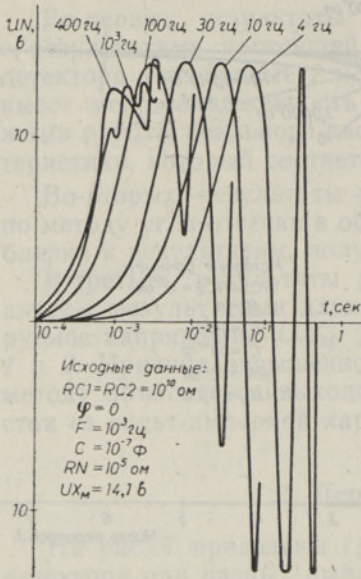


Рис. 10. Установление мгновенного выходного напряжения детектора.

Начиная от частоты  $F \sim 400$  гц и выше наблюдается уменьшение первого положительного импульса. Такое явление при взятых исходных данных объясняется следующими причинами:

1) при  $F < 100$  гц положительная амплитуда первого импульса напряжения  $u_n$  является постоянной величиной ввиду насыщения тока катода (для рассматриваемого случая характерно, что  $\tau < \frac{1}{F}$ );

2) при  $F > 400$  гц положительная амплитуда первого импульса напряжения  $u_n$  снижается за счет инерционности цепи заряда конденсатора ( $\tau > \frac{1}{F}$ ).

## Выводы

1. Применение машинного алгоритма метода приспособывания элементарных функций включений к линейно-сегментной аппроксимации вольт-амперной характеристики диода (которая является непрерывной функцией с положительными значениями первой производной на всех своих участках), позволяет рассчитать нагрузочные, частотные (в области низких частот), амплитудные и переходные характеристики диодного детектора, совпадающие с экспериментальными значениями в пределах ошибок измерения последних.

2. Достижимая при этом точность расчета одного порядка с достигнутой точностью эксперимента [1]. В принципе точность расчета по данному алгоритму ограничивается точностью снятия вольт-амперных характеристик диода и машинным временем расчета.

3. По сравнению с получившимися распространение аналитическими методами расчета данный метод позволяет получить более точные результаты, является более гибким и универсальным. На основе этого метода можно определить условия возможного применения других аналитических методов расчета (напр., [4, 5]) детекторов.

4. По сравнению с классическим аналитическим методом приспособывания, предложенным в 1912 году Н. Папалекси [7], данный метод расчета позволяет при помощи ЭЦВМ вести расчет в случае большого количества сегментов и в течение многих периодов детектирования, чем достигается большая точность, что ранее было недостижимо из-за трудоемкости аналитического расчета.

5. На основе конкретных примеров расчета можно сделать следующие, представляющие общий интерес, выводы.

а) Наибольшее быстроедействие детектора с заданным выходным напряжением  $UN$  можно обеспечить при средних значениях амплитуды

входного напряжения  $UX_M$  и при наименьшем сопротивлении нагрузки  $RN$ .

б) При соответствующем выборе величины нагрузки  $RN$  детектора или частоты  $F$  детектируемого сигнала можно для определенных входных сигналов добиться квазипикового, квазиэффективного или квазисреднего режима детектирования. Практическое использование этого явления возможно при нахождении критериев, позволяющих обеспечить один из указанных режимов детектирования для достаточно большого диапазона параметров входного сигнала.

в) При детектировании сигналов высокой частоты в первые периоды между анодом и катодом диода подключается напряжение положительной полярности, амплитуда которого может в предельных условиях равняться амплитуде детектируемого напряжения  $UX_M$ . Это требует нормирования дозволённых сигналов положительной полярности между катодом и анодом диодов. Относительно частый выход из строя измерительных диодов типа Н-66, замеченный автором, может объясняться именно разрушением активного слоя катода под воздействием больших сигналов положительной полярности.

г) Одинаковый уровень амплитуд положительной полярности для первых периодов детектирования, когда  $\frac{1}{F} > \tau$  и значение  $UX_M$  заходит в область насыщения тока катода, может быть использован при создании аperiodического ограничителя для управления системами, срабатываемыми начиная с первого положительного выброса сигнала заданного уровня.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рождественская Т. Б., Акнаев Р. Ф., Измерительная техника, № 6 (1970).
2. Роосе Э. Ф., Депонированная рукопись (Д-1622). Реферат. информ. по радиоэлектр., № 9 (1970).
3. Роосе Э. Ф., Депонированная рукопись (Д-1619). Реферат. информ. по радиоэлектр., № 9 (1970).
4. Aiken Ch. V., Proc. IRE, 26, No. 7 (1938).
5. Гуткин Л. С., Преобразование сверхвысоких частот и детектирование. М.—Л., 1953.
6. Силламаа Х. В., Установление напряжения на выходе детектора. Тр. Таллинск. политехн. ин-та, Сер. А, № 207 (1963).
7. P a r a l e k s i N., Ann. Physik, Nr. 39, 976 (1912).

Институт кибернетики  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
29/V 1970

E. ROOSE

#### DIOODDETEKTORITE STAATILISTE JA DÜNAAMILISTE KARAKTERISTIKUTE ARVUTAMINE ELEMENTAARSETE LÜLITUSFUNKTSIOONIDE SOBIVUSMEETODIL

Artiklis esitatakse poolperiood-tippdetektori staatilised ja siirdekarakteristikud, mis on arvutatud erinevate sinusoidaalsete sisendsignaalide ning detektori parameetrite alusel. Arvutamisel asendati detektordioodi voltamperkarakteristika lineaarsete segmentidega. Arvutustulemused ühtuvad detektori mõõtmisandmetega. Karakteristikute analüüs võimaldab tunnetada mõningaid rakendusliku iseloomuga uusi momente detektori töös ja otsustada kasutatud algoritmi universaalsuse määra ja rakendamisevõimaluste üle.



E. ROOSE

BERECHNUNG DER STATISCHEN UND NICHTSTATIONÄREN CHARAKTERISTIKEN DES DIODEDETEKTORS MIT ANLÖTEN DER ELEMENTAREN SCHALTFUNKTIONEN

In der vorliegenden Arbeit werden statische und nichtstationäre Charakteristiken des halbperiodischen Spitzendetektors angebracht, welche bei verschiedenen sinusoidalen Signalen (Amplituden und Frequenzen) und bei Belastung des Detektors berechnet wurden. Bei der Berechnung wurden die bemessenen Stromspannungscharakteristiken des Diodes einer Anzahl von Segmentlinien approximiert. Die Berechnungsergebnisse stimmen mit den experimentellen Resultaten am Ende des nichtstationären Prozesses des Detektors überein, was indirekt die Richtigkeit der angewandten Berechnungsmethode bei den gewählten Berechnungsbeispielen bestätigt. Die Analyse der Charakteristiken des nichtstationären Prozesses läßt einige neue Momente der Wirkungsweise des Detektors erkennen.