

Л. В. МАКАРОВА, Л. К. МАВРОДИ, Н. Д. МАМОНОВ

К ВОПРОСУ О ПРОЕКТИРОВАНИИ ВАРАКТОРНЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

В последнее время в связи с развитием СВЧ генераторов на полупроводниковых приборах большое внимание проектировщиков направлено на расчет и конструирование варакторных умножителей частоты.

В данной статье делается попытка помочь разработчикам в предварительной оценке возможностей диода для целей умножения частоты, если известен тип диода и его добротность, которую с учетом потерь на последовательном сопротивлении диода R_s можно представить как

$$Q = \frac{f_{\text{пр}}}{f_p}, \quad (1)$$

где $f_{\text{пр}}$ — предельная частота диода;

f_p — частота, которая подается на вход умножителя.

Ниже приведена серия графиков, описывающих поведение в режиме умножения наиболее широко применяемых типов диодов: из арсенида галлия (ЗА603В) и кремниевого (2А602Д).

Рассматривается последовательная схема умножения частоты, благодаря своим преимуществам перед параллельной схемой в СВЧ диапазоне, получившая наибольшее распространение на практике.

Для построения графиков использовался метод анализа варакторных умножителей частоты, предложенный в [1], который включает в себя аппроксимацию характеристики нелинейного элемента, гармонический анализ и энергетический расчет режима.

В основу анализа положены вольт-фарадные характеристики, снятые экспериментально на серии диодов 2А602Д и ЗА603В. Характеристики аппроксимировались полиномом пятой степени:

$$C(u) = B_0 + B_1u + B_2u^2 + B_3u^3 + B_4u^4 + B_5u^5, \quad (2)$$

где B_0, \dots, B_5 — коэффициенты аппроксимирующего полинома; u — прикладываемое к диоду мгновенное значение напряжения.

Гармонический анализ проводился в предположении, что к диоду приложено напряжение смещения $E_{см}$ и гармонические напряжения с частотами ω и $n\omega$:

$$u = U_0 + U_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + U_n \cos(n\omega t + \varphi_n), \quad (3)$$

где $U_0 = E_{см} + \varphi$ — постоянное напряжение, приложенное к $p-n$ переходу диода; φ — контактная разность потенциалов; φ_1, φ_n — начальные фазы гармонических колебаний с частотами ω и $n\omega$ соответственно.

При этом использовался метод модуляционных характеристик, основанный на аппарате двойных рядов Фурье. Предполагалось, что к диоду подводится максимальная мощность, при которой $p-n$ переход еще остается закрытым, то есть диод работает в чисто емкостном режиме, и мгновенное значение напряжения на диоде не превосходит пробивного $u < U_{пр}$.

При воздействии на диод, имеющий характеристику (2), напряжения (3) на $p-n$ переходе будем иметь спектр тока, определяемый из выражения:

$$i = C(u) \frac{du}{dt}. \quad (4)$$

При расчете умножителя учитывалось прохождение через диод всех гармоник тока.

Основной энергетической характеристикой умножителя является к. п. д., который определялся по формуле

$$\eta_{умн} = \eta_d \cdot \eta_{вх} \cdot \eta_{вых}, \quad (5)$$

где η_d — к. п. д. диода в контуре без собственных потерь; $\eta_{вх}, \eta_{вых}$ — к. п. д. входного и выходного контуров с идеальным диодом.

Коэффициент полезного действия диода равен:

$$\eta_d = 1 - \frac{P_{пот}}{P_{вх}}, \quad (6)$$

где $P_{пот} = \frac{1}{2} I_d^2 \cdot R_s = \frac{1}{2} (I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2) \cdot R_s$ — суммарная мощность потерь, которая теряется на последовательном сопротивлении диода $R_s = \frac{1}{2\pi C_{исп} \cdot f_{пр}}$ при протекании через диод тока I_d , содержащего гармоники I_1, I_2, \dots, I_n . $P_{вх} = \frac{1}{2} I_{1a} \cdot U_1 + P_{пот}$ — активная входная мощность, I_{1a} — активная составляющая тока первой гармоники; $C_{исп}$ — емкость перехода при напряжении смещения $U_0 = -6\phi$.

Входное и выходное сопротивление диода определялись соответственно:

$$R_{вх} = \frac{U_1^2}{2P_{вх}}; \quad R_{вых} = \frac{U_n^2}{2P_{вых}}, \quad (7)$$

где

$$P_{вых} = P_{вх} - P_{пот}. \quad (8)$$

По данным расчета были построены графики, характеризующие работу умножительного диода в последовательной схеме умножения. Задаваясь к. п. д. колебательной системы в зависимости от частотного диапазона, можно оценить основные параметры умножителя в целом. Ниже приводятся наиболее интересные для разработчиков зависимости.

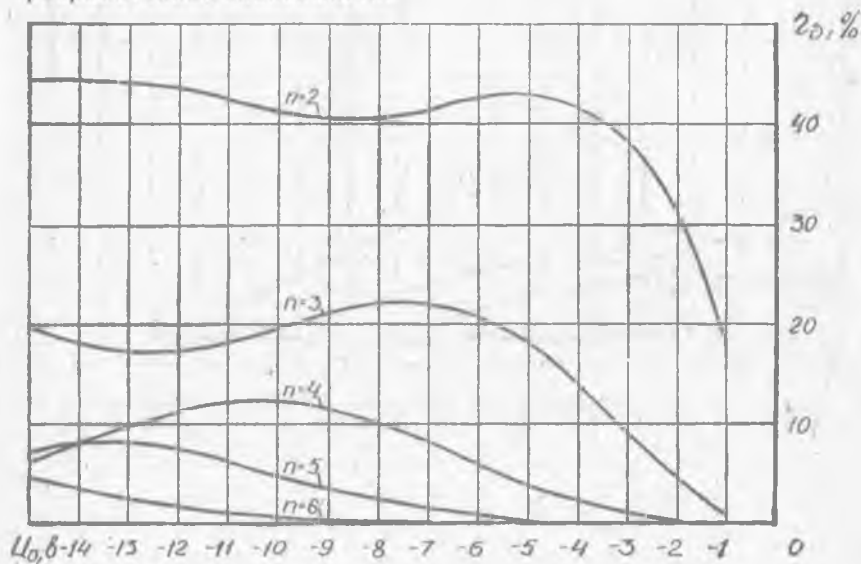


Рис. 1. Зависимость к. п. д. диода 2A602Д от напряжения смещения для различных номеров гармоник при добротности диода $Q_{\text{д}} = 20$.

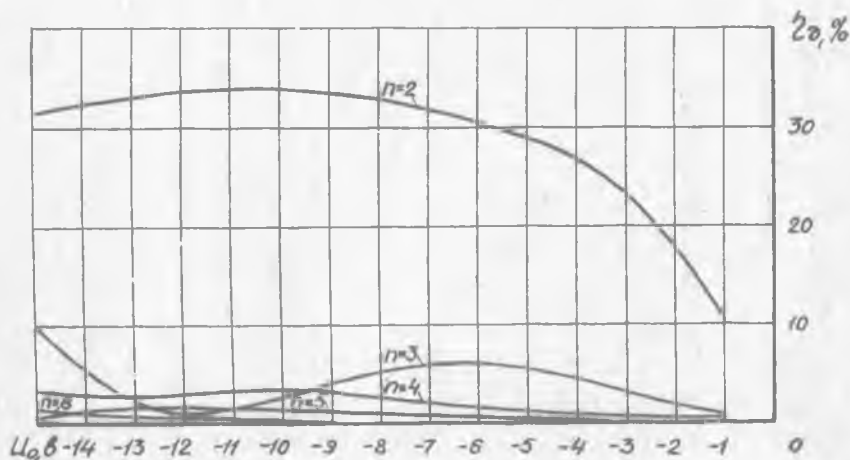


Рис. 2. Зависимость к. п. д. диода 3A603В от напряжения смещения для различных номеров гармоник при добротности диода $Q_{\text{д}} = 20$.

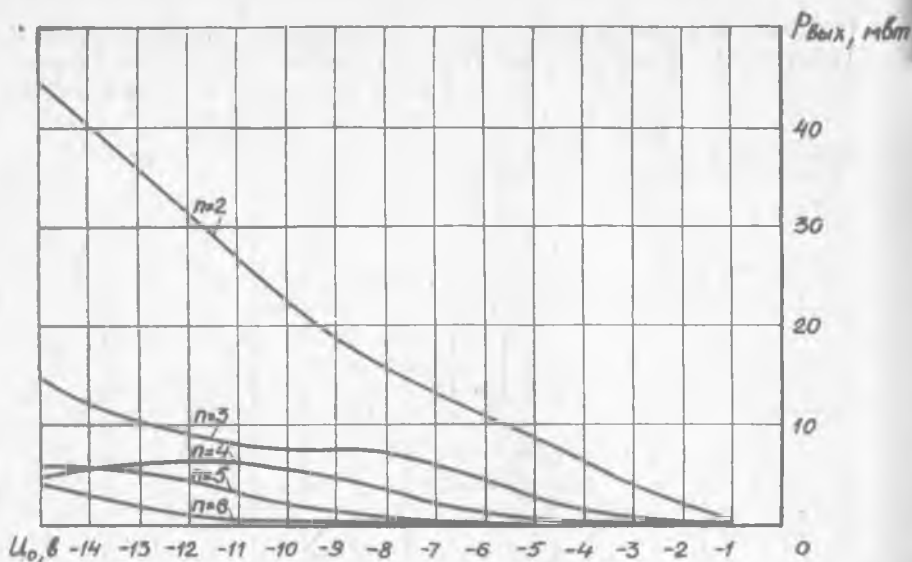


Рис. 3. Зависимость выходной мощности диода 2A602Д от напряжения смещения для различных номеров гармоник при добротности диода $Q_d = 20$.

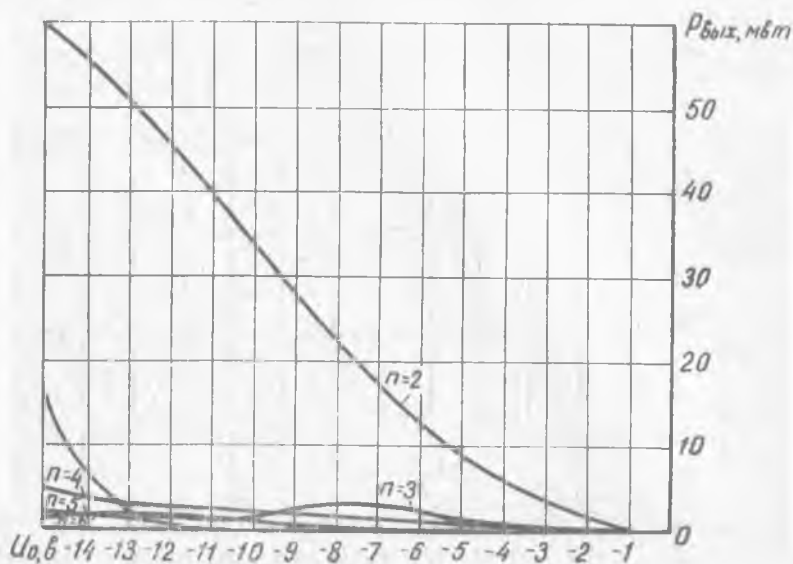


Рис. 4. Зависимость выходной мощности диода 3A603В от напряжения смещения для различных номеров гармоник при добротности диода $Q_d = 20$.

На рис. 1—4 представлены зависимости коэффициента полезного действия и выходной мощности диодов 2А602Д и 3А603В от напряжения смещения U_0 , подаваемого на диод, для коэффициентов умножения $n=2\div 6$ при добротности диода $Q_d=20$ (при изменении добротности диода кривые идут параллельно, поэтому оптимальное смещение остается постоянным). Основываясь на этих графиках, можно предварительно оценить смещение для режима оптимального к. п. д. и режима максимальной выходной мощности. Величина выходной мощности при изменении напряжения смещения носит осциллирующий характер, величина же мощности потерь в варакторе меняется монотонно. Поэтому максимумы к. п. д. диода располагаются вблизи максимумов преобразуемой мощности, хотя и несколько смещены.

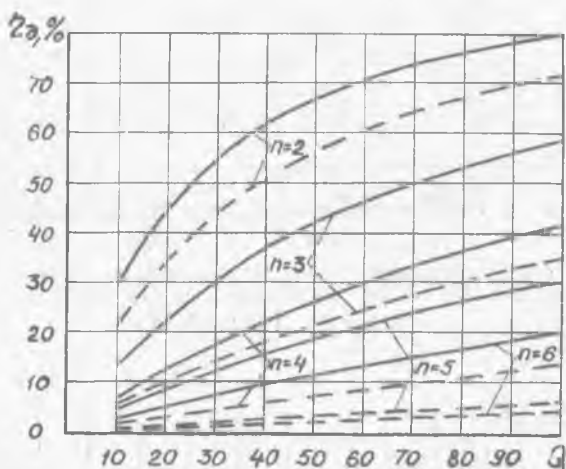


Рис. 5. Зависимость оптимального к. п. д. диода от добротности для различных номеров гармоник
 -----2А602Д, — — — 3А603В

На основании графиков рис. 1÷4 были построены зависимости оптимального коэффициента полезного действия и максимальной выходной мощности от добротности диода для разных номеров выделяемых гармоник (рис. 5÷7). Для работы на высоких частотах необходимы диоды с высокой критической частотой, а это приводит к малой емкости и малому распределенному сопротивлению. Требование малой емкости, необходимой для работы на высоких частотах, противоречит требованию работы при больших мощностях. Обычно выбирается компромиссное решение.

Для получения максимальной мощности преобразования необходимо согласование входного и выходного сопротивлений варактора соответственно с генератором и нагрузкой, поэтому зна-

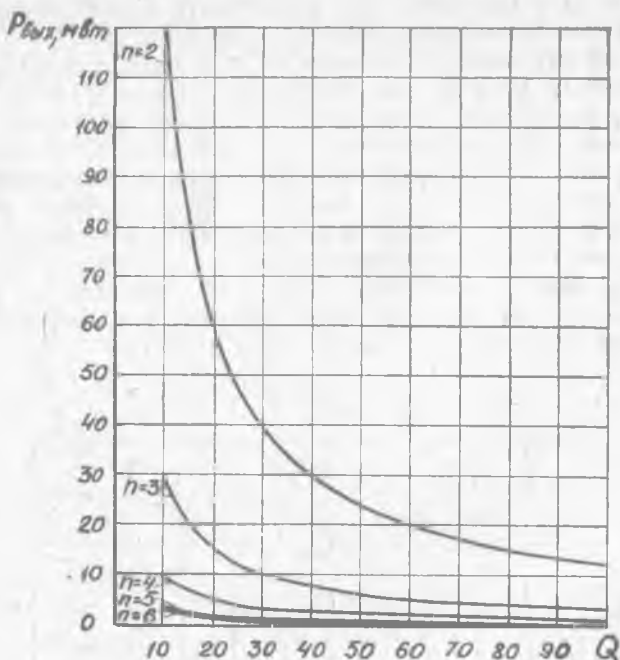


Рис. 6. Зависимость максимальной выходной мощности диода 2А602Д от добротности Q_0 для различных номеров гармоник.

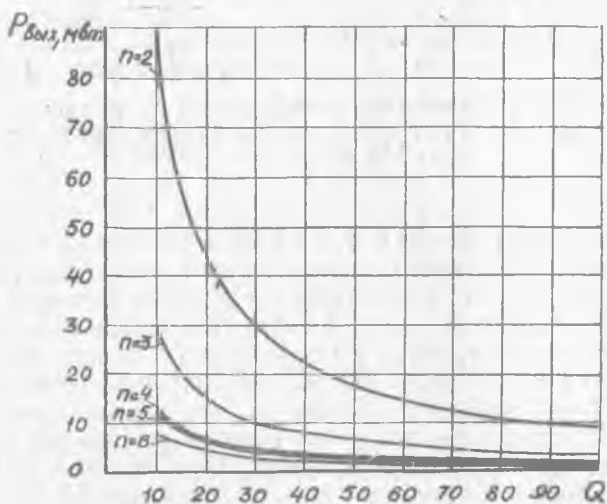


Рис. 7. Зависимость максимальной выходной мощности диода 3А603В от добротности Q_0 для различных номеров гармоник.

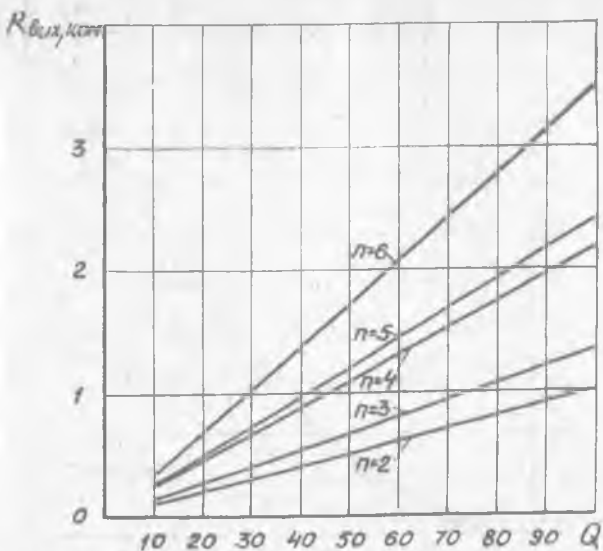


Рис. 8. Зависимость выходного сопротивления диода 2A302Д от добротности Q_0 для различных номеров гармоник в режиме оптимального к. п. д.

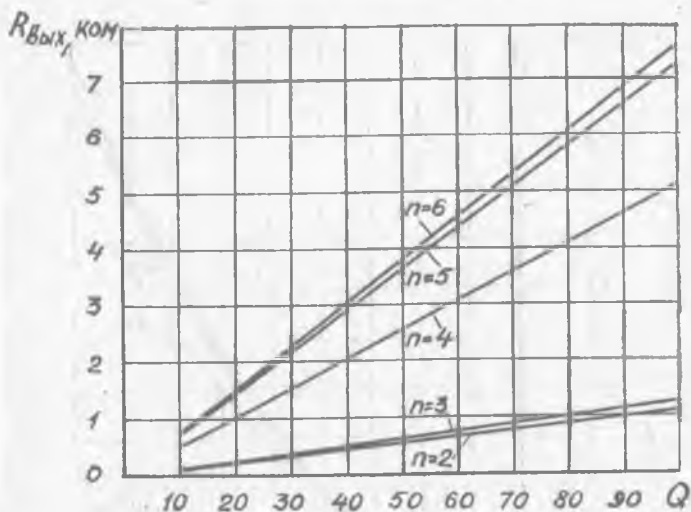


Рис. 9. Зависимость выходного сопротивления диода 3A603В от добротности Q_0 для различных гармоник в режиме оптимального к. п. д.

ние этих величин очень важно для разработчиков. Расчетные зависимости входных и выходных сопротивлений диодов от добротности для разных номеров гармоник в режиме оптимального к. п. д. представлены на рис. 8÷11.

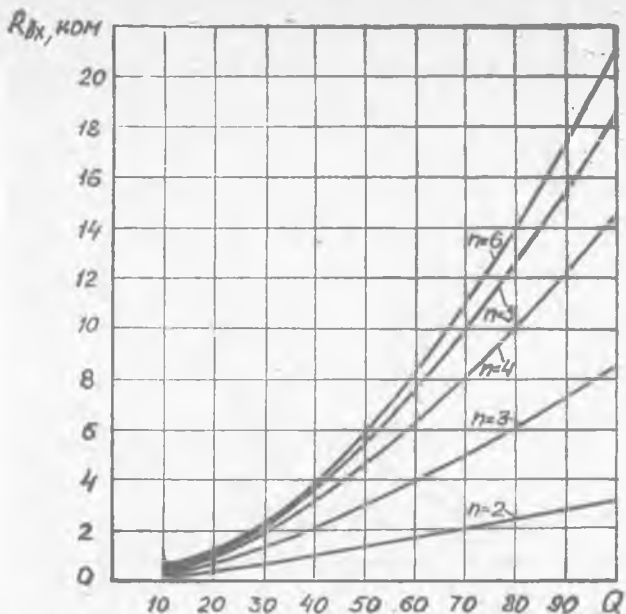


Рис. 10. Зависимость входного сопротивления диода 2A602Д от добротности диода для различных номеров гармоник в режиме оптимального к. п. д.

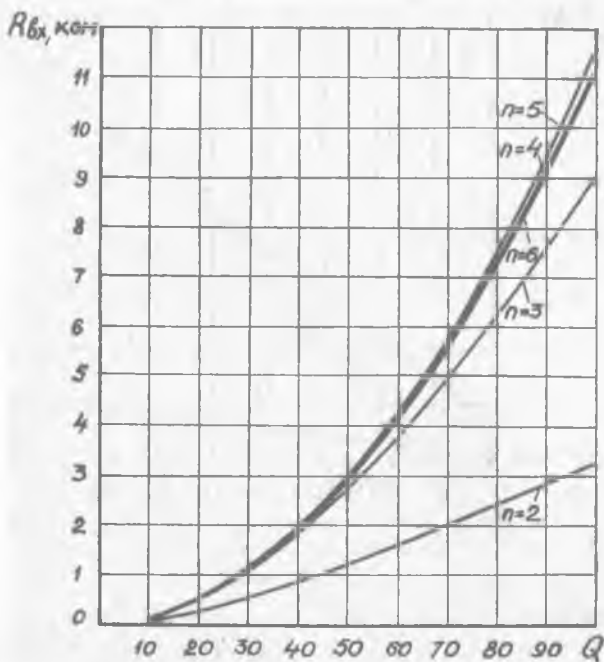


Рис. 11. Зависимость входного сопротивления диода 2A603В от добротности Q для различных номеров гармоник в режиме оптимального к. п. д.

На основании рассмотренных графиков можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент полезного действия варактора возрастает с увеличением добротности диода и падает с увеличением номера гармоники.

2. Выходная мощность варактора в режиме умножения падает с увеличением добротности диода и коэффициента преобразования.

3. Входное и выходное сопротивление варактора возрастает с увеличением добротности диода и коэффициента преобразования.

Полученные в данной работе результаты могут быть использованы разработчиками при проектировании варакторных умножителей частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макарова Л. В. Метод анализа варакторных умножителей частоты. Сборник КуАИ, вып. 61, 1973.

2. Полупроводниковые приборы в технике электросвязи. Сборник статей под редакцией И. Ф. Николаевского, вып. 5, Москва, изд-во «Связь», 1970.