

УДК 621.382

Д.А.Усанов, А.В.Скрипаль, А.В.Бабаян

ВЗАИМОСВЯЗЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДИОДОВ ГАННА В СЛАБЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ С ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬЮ И ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ ГЕНЕРАТОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

Теоретически описана экспериментально наблюдающаяся взаимосвязь сопротивления диодов Ганна в слабых электрических полях с термостабильностью и выходной мощностью генераторов на их основе. Анализ величины долговременной нестабильности характеристик генератора на диоде Ганна, обусловленной изменением условий теплопередачи и температуры окружающей среды, проведен на основе совместного с системой уравнений Кирхгофа решения нестационарного уравнения теплового баланса.

Введение

Известно, что в генераторах на диодах Ганна наблюдается существенное различие генерируемой мощности, долговременной нестабильности мощности и частоты при использовании диодов Ганна одного и того же типа в одной и той же конструкции генератора и при одном и том же источнике питания. Было установлено [1], что это различие связано с разбросом параметров диодов по сопротивлению в слабых электрических полях, который, в свою очередь, может

быть обусловлен неконтролируемыми факторами технологического процесса создания диодных структур.

Из результатов экспериментальных исследований следует также, что стремление повысить уровень выходной мощности генераторов на диодах Ганна (типа AA703) путем использования низкоомных диодов ведет к существенному увеличению долговременной нестабильности мощности и частоты генераторов. Установленная экспериментально закономерность представляет значительную практическую ценность, так как оказывается возможным по легко измеряемым параметрам диодов на постоянном токе прогнозировать основные характеристики диодных СВЧ-генераторов.

В работе [1] было высказано предположение об определяющей роли влияния установления теплового режима диода на величину долговременной нестабильности характеристик генератора. Однако теоретическое описание взаимосвязи сопротивления полупроводниковой структуры в слабых электрических полях с термостабильностью и выходной мощностью генераторов на диодах Ганна отсутствовало, что затрудняло понимание физических причин ее существования.

Целью данной работы являлось теоретическое обоснование взаимосвязи сопротивления диодов Ганна в слабых электрических полях с термостабильностью и выходной мощностью генераторов на их основе.

1. Модель, используемая при расчете

Теоретический анализ работы генератора на диоде Ганна основывался на математическом описании процессов в многоконтурной эквивалентной схеме [2], представленной на рис. 1, элементы которой моделируют полупроводниковую структуру диода Ганна в виде параллельно соединенных емкости C_3 и активного нелинейного сопротивления, определяемого по ВАХ диода $i(U)$, элементы корпуса диода L_3 , C_4 , СВЧ-резонатор в виде последовательного C_2 , L_2 и параллельного L_1 , Y_1 , C_1 контуров, низкочастотную (НЧ) часть схемы, состоящую из последовательного L_7 , C_6 и параллельного C_7 , R_5 , L_6 контуров, дросселя L_5 в цепи питания, шунтирующей емкости C_5 и индуктивности связи L_4 диода с НЧ-схемой. Эквивалентная схема описывалась системой из четырнадцати дифференциальных уравнений, составленных с использованием законов Кирхгофа.

С целью выяснения взаимосвязи сопротивления полупроводниковой структуры в слабых электрических полях с характеристиками выходного сигнала генератора на диоде Ганна, анализировался процесс саморазогрева диода Ганна на основе совместного с системой уравнений Кирхгофа решения нестационарного уравнения теплового баланса, представленного в виде [3]:

$$C_m \frac{dT}{dt} = i(U_{cf}, T)U - \frac{T - T_0}{R_T},$$

где T и T_0 - температура кристалла диода и окружающей среды, R_T - полное тепловое сопротивление прибора, C_m - теплоемкость полупроводникового кристалла.

Нелинейная зависимость мгновенных значений активной составляющей тока i , протекающего через полупроводниковую структуру, от мгновенных значений напряжения U на ней [4] аппроксимировалась выражением вида [2]:

$$i(U) = R_0^{-1} \frac{d}{\mu(T)} \cdot \frac{\mu(T) \frac{(U+D)}{d} + V_S(T) \left[\frac{U+D}{U_n} \right]^4}{1 + \left[\frac{U+D}{U_n} \right]^4},$$

где $R_0 = [qn_0\mu(T)S/d]^{-1}$ - сопротивление полупроводниковой структуры в слабых электрических полях, n_0 - концентрация полностью ионизованных доноров, S и d - эффективные площадь поперечного сечения и длина диода соответственно, $D=0$ при $U \leq U_n$, $D=2$ при $U > U_n$. Учитывалось, что саморазогрев кристалла приводит к изменению вольт-амперной характеристики диода [5]. При этом зависимости $\mu(T)$ и $V_S(T)$ аппроксимировались соотношениями вида

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot 300/T$$

и

$$V_S(T) = V_0 / \left[T(1 - 5.3 \cdot 10^{-4} \cdot T) \right]$$

соответственно.

Расчеты, проведенные в [4], свидетельствуют о возможности применения данной зависимости $i(U)$ в качестве динамической вольт-амперной характеристики диода Ганна на частотах до 10-12 ГГц. Возможность успешного использования динамических ВАХ для описания режимов работы СВЧ-генераторов на диодах Ганна иллюстрирована результатами, приведенными в [2,6,7].

В результате численного моделирования были рассчитаны мощность выходного СВЧ-сигнала:

$$P = \frac{1}{T_{\sim}} \int_0^{T_{\sim}} U_{dg}^2(t) Y_1 dt,$$

изменение величины падения постоянного напряжения на активном сопротивлении R_3 , включенном последовательно с полупроводниковой структурой, вследствие возникновения эффекта автодинного детектирования [8]:

$$\Delta U = R_3 \left(\frac{1}{T_{\sim}} \int_0^{T_{\sim}} i_7(t) dt - i_0 \right),$$

где i_0 - ток через диод Ганна, при отсутствии СВЧ-генерации, и частота выходного СВЧ-сигнала f , определяемая как величина обратная периоду колебаний T .

2. Результаты расчета

На основе вышеприведенной модели были проведены расчеты переходного процесса установления стационарного режима работы генератора на диоде Ганна с учетом его саморазогрева. В качестве параметров, определяющих время установления стационарного режима работы генератора на диоде Ганна и его выходные характеристики, были выбраны легко измеряемое на практике сопротивление диода Ганна R_0 в слабых электрических полях, тепловое сопротивление прибора R_T и температура окружающей среды. При численном моделировании учитывалось, что причинами, вызывающими изменение сопротивления R_0 могут быть изменение концентрации носителей заряда n_0 , их подвижности μ или геометрических размеров полупроводниковой структуры.

На рис. 2 представлены зависимости P , ΔU , T от времени t после включения постоянного смещения для диодов с различными значениями сопротивления R_0 и теплового сопротивления R_T .

При аппроксимации зависимостей $P(t)$, $\Delta U(t)$, $f(t)$, $T(t)$ соотношениями вида [3]:

$$P(t) = P_c + (P_0 - P_c) \exp\left(-\frac{t}{\tau_P}\right),$$

$$\Delta U(t) = \Delta U_c + (\Delta U_0 - \Delta U_c) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\Delta U}}\right),$$

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right),$$

$$T = T_0 + P_{ef} R_T \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_T}\right)\right],$$

где P_c , ΔU_c , f_c - значения P , ΔU , f при $t \rightarrow \infty$, P_0 , ΔU_0 , f_0

- значения P , ΔU , f при $t \rightarrow 0$, P_{ef} - эффективная мощность рассеяния, из

расчетных данных были определены характерные времена τ_P , $\tau_{\Delta U}$, τ_f

установления основных характеристик выходного сигнала генератора на диоде

Ганна.

Расчеты показали, что характерные времена установления

τ_P , $\tau_{\Delta U}$, τ_f , τ_T определяются величиной теплового сопротивления R_T ,

сопротивлением R_0 и температурой окружающей среды T_0 . При этом, если увеличение значений R_T и уменьшение R_0 приводит к росту величин τ_P , $\tau_{\Delta U}$, τ_f , τ_T , то увеличение T_0 может приводить в зависимости от значений R_T и R_0 либо к увеличению, либо к уменьшению, или к немонотонному изменению характерных времен.

Величина долговременной нестабильности основных характеристик выходного сигнала генератора на диоде Ганна, обусловленная изменением условий теплопередачи R_T и температуры окружающей среды T_0 , анализировалась после установления стационарного режима работы генератора.

Расчеты температурных коэффициентов частоты ($TKЧ = \Delta f / \Delta T$), мощности ($TK_P = \Delta P / \Delta T$), сигнала автодинного детектирования ($TK_{\Delta U} = \Delta U / \Delta T$) показали, что абсолютные значения величин долговременной нестабильности основных характеристик, обусловленной изменением температуры окружающей среды, уменьшаются с ростом теплового сопротивления прибора R_T и сопротивления полупроводниковой структуры диода R_0 в слабых электрических полях. На рис. 3 приведены зависимости абсолютных значений $TKЧ$, TK_P и $TK_{\Delta U}$ от сопротивления диода R_0 для различных значений величины теплового сопротивления R_T .

Для определения величины долговременной нестабильности характеристик выходного сигнала генератора на диоде Ганна, обусловленной изменением условий теплопередачи, были проведены расчеты модуляционной

чувствительности по тепловому сопротивлению частоты ($\Delta f/\Delta R_T$), мощности ($\Delta P/\Delta R_T$) и сигнала автодинного детектирования ($\Delta U/\Delta R_T$), показавшие, что абсолютные значения модуляционных чувствительностей генератора по тепловому сопротивлению уменьшаются с ростом температуры окружающей среды и сопротивления полупроводниковой структуры диода R_0 . Это иллюстрируется зависимостями абсолютных значений $\Delta f/\Delta R_T$, $\Delta P/\Delta R_T$ и $\Delta U/\Delta R_T$ от сопротивления диода R_0 для различных температур окружающей среды, приведенными на рис. 4.

Проведенные численные расчеты показали, что величина долговременной нестабильности характеристик генератора на диоде Ганна, обусловленная изменением условий теплопередачи R_T и температуры окружающей среды T_0 , определяется изменением температуры T кристалла диода вследствие его саморазогрева, зависящего от сопротивления полупроводниковой структуры диода R_0 .

Сравнение расчетных данных с экспериментальными результатами, приведенными в работе [1], показывает их качественное совпадение. Достижение количественного совпадения при определении величин долговременной нестабильности характеристик генератора, получается, как это следует из результатов расчета, приведенных на рис. 3 и 4, при учете одновременного действия со своими знаками нескольких дестабилизирующих факторов, например, изменения условий теплопередачи R_T и температуры окружающей среды T_0 . Определение взаимосвязи этих параметров в реальном приборе является самостоятельной, достаточно сложной задачей.

Следует отметить также, что количественное изменение величины долговременной нестабильности характеристик генератора на диоде Ганна зависит от причин, вызывающих изменение величины сопротивления диода R_0 в слабом электрическом поле. Так, например, уменьшение величины R_0 в 2 раза, вследствие увеличения $\mu(T)$, приводит к двукратному увеличению нестабильности характеристик выходного сигнала генератора по сравнению с аналогичным уменьшением R_0 , вследствие увеличения S или n_0 . Расчеты показывают, что это связано с меньшим саморазогревом кристалла диода, происходящим при увеличении μ , по сравнению с саморазогревом, происходящим при аналогичном увеличении S или n_0 . Следует также принять во внимание, что увеличение S или n_0 приводит к более значительному увеличению выходной мощности генерируемого излучения, чем увеличение $\mu(T)$.

Авторами работы [1] экспериментально была показана возможность уменьшения нестабильности выходных характеристик генератора при использовании импульсного питания. При этом длительность импульса питания определяется электрическим сопротивлением кристалла в слабых полях. В настоящей работе такая возможность обоснована на основе математического моделирования.

Как следует из результатов расчета, максимальная длительность импульса питания t_P , $t_{\Delta U}$, при которой обеспечивается определенное значение нестабильности выходных характеристик генератора на диоде Ганна P и ΔU , обусловленной изменением условий теплопередачи и температуры окружающей

среды (рис. 5), увеличивается с ростом сопротивления полупроводниковой структуры диода.

Заключение

Теоретически описана экспериментально наблюдающаяся взаимосвязь сопротивления диодов Ганна в слабых электрических полях с термостабильностью и выходной мощностью генераторов на их основе, что открывает возможность по легко измеряемым параметрам диодов на постоянном токе прогнозировать основные характеристики диодных СВЧ-генераторов.

Характерные времена установления основных характеристик выходного сигнала генератора на диоде Ганна увеличиваются с уменьшением сопротивления диода и увеличением теплового сопротивления прибора.

Длительность импульса питания, обеспечивающая определенное значение нестабильности выходных характеристик генератора, тем больше, чем больше электрическое сопротивление кристалла в слабых полях.

Работа выполнена при финансовой поддержке, осуществляемой в рамках гранта Министерства общего и профессионального образования РФ № 95-3-67 (МИЭТ ТУ).

Библиографический список.

1. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Авдеев А. А. О взаимосвязи характеристик диодов Ганна, работающих в режиме генерации, с их сопротивлением в слабых электрических полях. // ЖТФ. 1995. Т.65. Вып.10. С.194-198.
2. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Авдеев А. А., Бабаян А. В. Эффект автодинного детектирования в генераторе на диоде Ганна с низкочастотным колебательным контуром в цепи питания // Радиотехника и электроника. 1996. Т.46. №12. С.1497-1500.
3. Билько М. И., Томашевский А. К, Шаров П. П, Баймуратов Е. А. Измерение мощности на СВЧ. М.: Сов.радио, 1976. 168 с.
4. Murayama K., Ohmi T. Static Negative Resistance in Highly Doped Gunn Diodes and Application to Switching and Amplification // Japan. J.Appl.Phys. 1973. Vol.12. P.1931-1940.
5. Mulmou P. J., Hobson G. S., Taylor B. C. Transferred electron devices. London, New York: Academic Press, 1972. 402 p.
6. Микроэлектронные устройства СВЧ / Г. И. Веселов, Е. Н. Егоров, Ю. Н. Алехин и др. М.: Высш. шк., 1988. 280 с.
7. Усанов Д. А., Вениг С. Б., Горбатов С. С., Семенов А. А. Влияние нелинейности характеристик импеданса диодов Ганна на работу СВЧ-генераторов на их основе // Изв. ВУЗов. Сер. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т.2. №5. С.35-45.
8. Усанов Д. А., Тупикин В. Д., Скрипаль А. В., Коротин Б. Н. Использование эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых СВЧ-генераторах для создания устройств радиоволнового контроля // Дефектоскопия. 1995. №5. С.16-20.

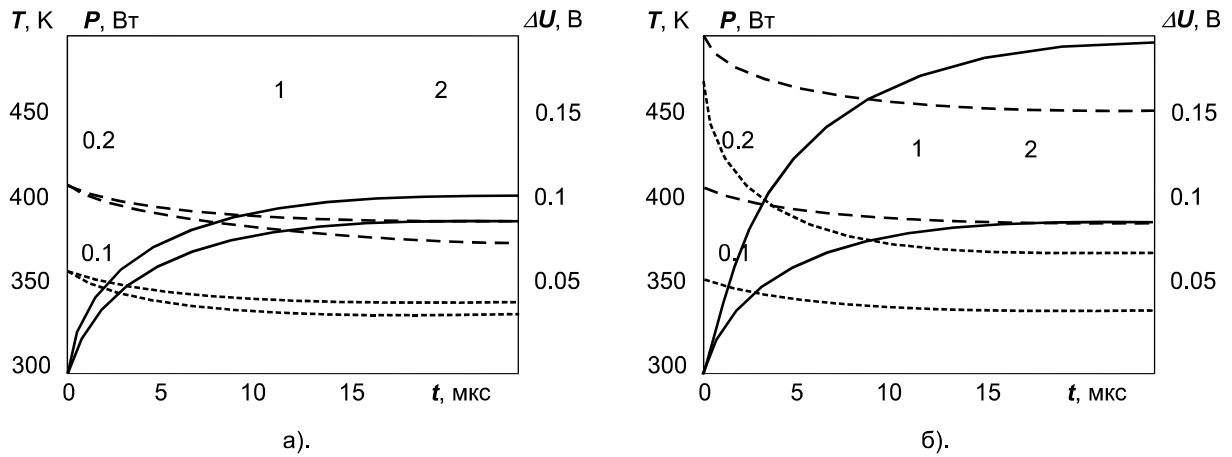


Рис. 2.

Зависимости генерируемой мощности (\rightarrow), величины протекти-рованного сигнала (\rightarrow), температуры диода (\rightarrow) от времени t после включения постоянного смещения для диодов с различными значениями сопротивления R_0 и теплового сопротивления R_7 .

а). $R_0=10$ Ом, (1- $R_7=100$ град/Вт, 2- $R_7=150$ град/Вт),

б). $R_7=100$ град/Вт, (1- $R_0=10$ Ом, 2- $R_0=5$ Ом).

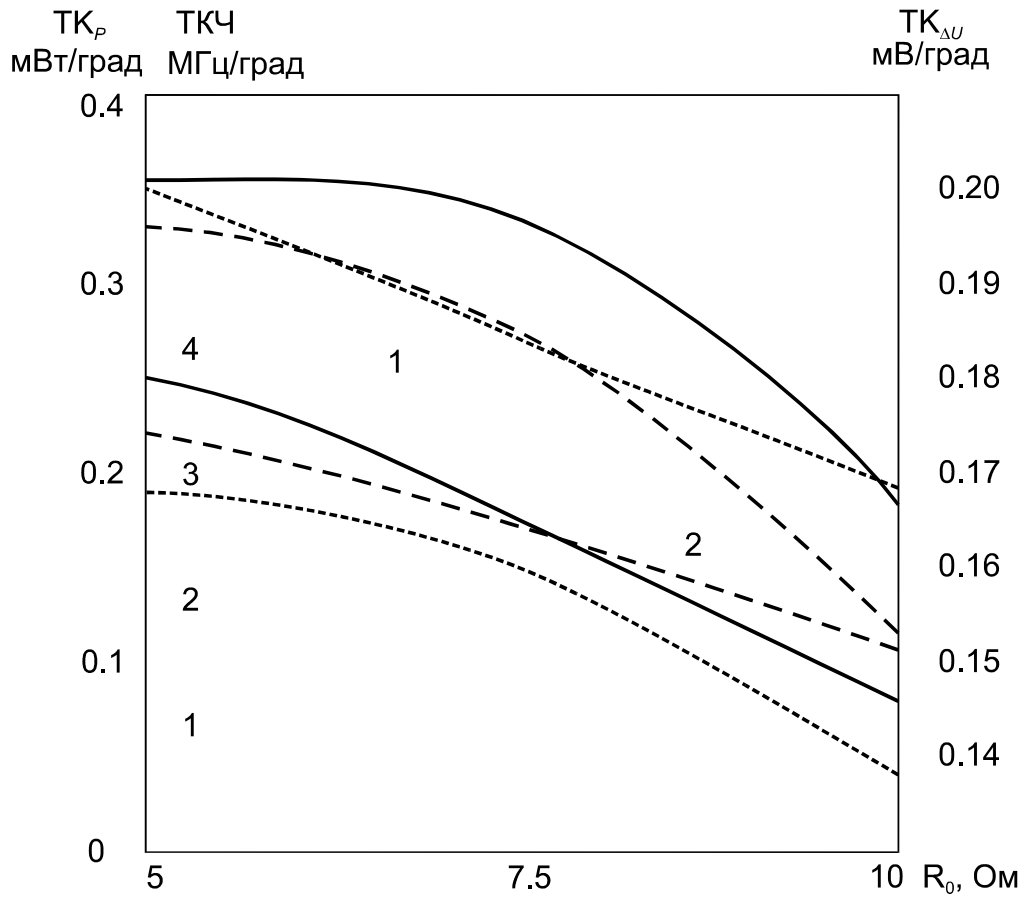


Рис. 3.

Зависимости абсолютных значений TK_{Ch} (—), TK_p (- - -) и $TK_{\Delta U}$ (·····) от сопротивления диода R_0 для различных значений величины теплового сопротивления R_T .

1 - $R_T=150$ град/Вт,

2 - $R_T=100$ град/Вт.

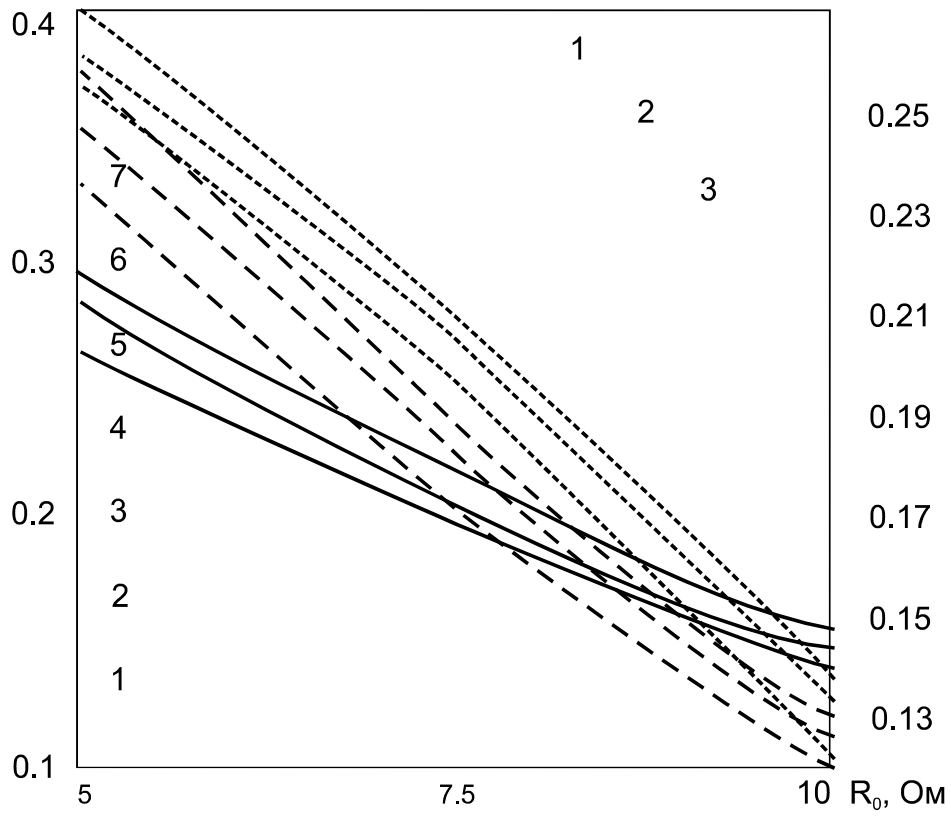


Рис. 4.

Зависимости абсолютных значений $\Delta f / \Delta R_T$ (—), $\Delta P / \Delta R_T$ (- - -) и $\Delta U / \Delta R_T$ (·····) от сопротивления диода R_0 для различных температур окружающей среды

1 - $T_0 = 290$ К,

2 - $T_0 = 300$ К,

3 - $T_0 = 310$ К.

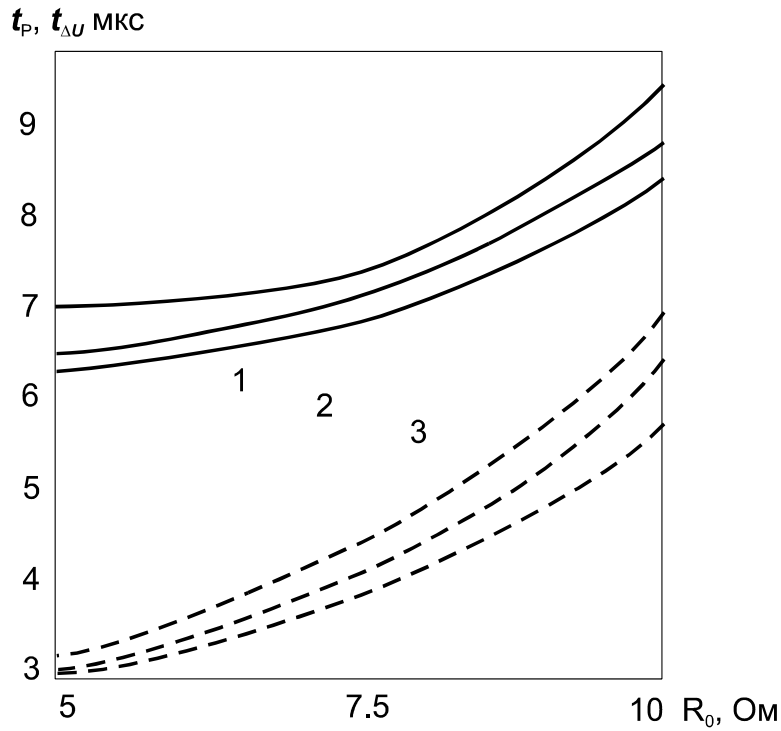


Рис. 5.

Зависимости максимальной длительности импульса питания t_P (—), $t_{\Delta U}$ (---) при которой обеспечивается определенное значение нестабильности выходных характеристик генератора на диоде Ганна P и ΔU , обусловленной изменением условий теплопередачи и температуры окружающей среды, от сопротивления диода R_0 .

1 - $T_0=290$ К,

2 - $T_0=300$ К,

3 - $T_0=310$ К.