

**МАКРОМОДЕЛЬ ТУНЕЛЬНОГО ДІОДА В СИСТЕМАХ
СХЕМОТЕХНІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ¹**

*Зіньковський Ю. Ф., д.т.н., професор; Коваль А. В., к.т.н., доцент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна,
vkovali@voliacable.com*

**TUNNEL DIODE MACRO-MODEL IN THE ELECTRONIC CIRCUITS
MODELING SYSTEMS**

*Zinkowsky J.F., Doktor of Science (Techics), professor;
Koval A.V., PhD, associate professor
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine,
vkovali@voliacable.com*

Вступ

За умови комп'ютерного схемотехнічного моделювання принципів схем розробники апаратури користуються моделями електронних компонентів і пристроїв, які входять до бібліотек систем [1, 2, 3]. Моделі цих компонентів побудовані на основі принципів схем макромоделей виду Macro [4] або текстових описів типу Subckts [5]. У зв'язку з відсутністю в системах схемотехнічного моделювання макромоделей тунельних діодів розробка останніх є актуальною задачею, оскільки їх часто використовують в задачах створення генераторів і підсилювачів на основі активних елементів з від'ємним опором.

Теоретичні викладки

Побудова макромоделі тунельного діода передбачає створення принципової схеми, яка має вольт-амперну характеристику, що відповідає статичній характеристиці з відповідними параметрами реального діода. Статична вольт-амперна характеристика тунельного діода окреслюється координатами в характерних точках з вираженою областю від'ємного опору в діапазоні напруг на діоді від U_1 до U_2 (рис. 1).

Координати цих точок визначають: I_1 — максимальний струм тунельного діода; U_1 — напруга на діоді в точці максимуму струму; I_2 — мінімальний струм (струм западини); U_2 — напруга в точці мінімального струму; U_3 — напруга на другій зростаючій (дифузійній) ділянці вольт-амперної характеристики, яка відповідає максимальному струму I_1 ; I_{on} —

¹ Електронний варіант статті: <http://radar.kpi.ua/index.php/radiotechnique/article/view/826>

струм в точці перегину вольт-амперної характеристики; U_{on} — напруга в точці перегину.

Запропонована принципова схема макромоделі тунельного діода в по-

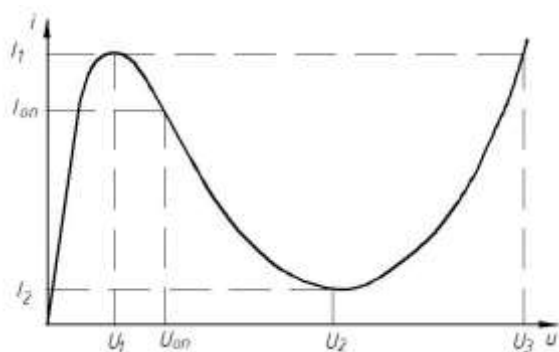


Рис. 1. Типова статична вольт-амперна характеристика тунельного діода

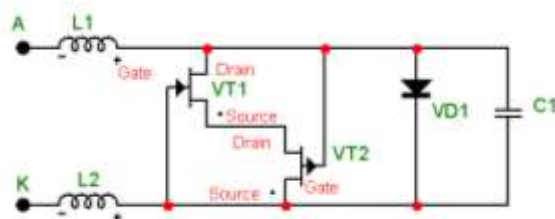


Рис. 2. Принципова схема макромоделі тунельного діода

знаках елементів системи Micro-Cap 10 наведена на рис. 2.

Вона складається з двох паралельно увімкнених кіл. Перше коло утворено двома послідовно увімкненими польовими транзисторами VT1 і VT2 з керуючим р-п-переходом та різною провідністю каналів. Транзистори VT1 і VT2 утворюють схему λ -діода з так званою λ -характеристикою [6].

Друге коло складається з діода VD1 та конденсатора C1, який моделює паразитну ємність тунельного діода. Транзистори VT1 і VT2 призначені для формування ділянки вольт-амперної характеристики тунельного діода від напруги $0 \leq U \leq U_2$, а діод VD1 — для утворення дифузійної ділянки в області напруг $U \geq U_2$. Індуктивності L1 та L2 враховують паразитну індуктивність виводів та конструкції тунельного діода.

Як відомо [7], в системах схемотехнічного моделювання моделі польових транзисторів з керуючим р-п-переходом характеризуються 25 параметрами. В позначках параметрів системи PSpice струм стоку I_{drain} польового транзистора з керуючим р-п-переходом визначається трьома рівняннями:

$$I_{drain} = \begin{cases} 0 & \text{за умови } V_{gs} - V_{TO} \leq 0; & (1a) \\ BETA(1 + LAMBDA \cdot V_{ds}) \cdot (V_{gs} - V_{TO})^2 & \text{за умови } & (1б) \\ 0 < V_{gs} - V_{TO} \leq V_{ds} & \text{(режим насичення);} \\ BETA(1 + LAMBDA \cdot V_{ds}) \cdot V_{ds} \cdot [2(V_{gs} - V_{TO}) - V_{ds}] & \text{за умови } & (1в) \\ V_{ds} < V_{gs} - V_{TO} & \text{(лінійний режим),} \end{cases}$$

де V_{gs} — внутрішня напруга еквівалентної схеми затвор-витік; V_{gd} — внутрішня напруга еквівалентної схеми затвор-стік; V_{ds} — внутрішня на-

пруга стік-витік.

Для схемотехнічного моделювання вольт-амперної характеристики λ -діода в якості транзистора VT1 застосована модель польового транзистора з каналом n-типу і керуючим p-n-переходом (Junction FET) типу 2N3819 (аналог КП303Д), а в якості транзистора VT2 — модель транзистора 2N5461(аналог КП103И) з каналом p-типу. В моделях польових транзисторів встановлена напруга відсікання каналів $V_{TO}=-3$ В, опір стоку $R_S=0$ Ом та опір витоку $R_D=0$ Ом, а також відредагований параметр модуляції довжини каналу $LAMBDA=0$. Міжелектродні ємності польових транзисторів встановлюється нульовими, оскільки ємність тунельного діода моделюється ємністю C1.

За умови побудови вольт-амперної характеристики λ -діода напруга між заслоном і стоком V_{gs} кожного транзистора зростає від нуля до напруги джерела $V_1/2$. При цьому транзистори VT1 і VT2 переходять від лінійного режиму до режиму насичення.

На рис. 3 наведена вольт-амперна характеристика λ -діода, отримана шляхом моделювання з вище зазначеними параметрами транзисторів при різних порогових напругах і коефіцієнті пропорційності $BETA=0,3$ в рівняннях (1).

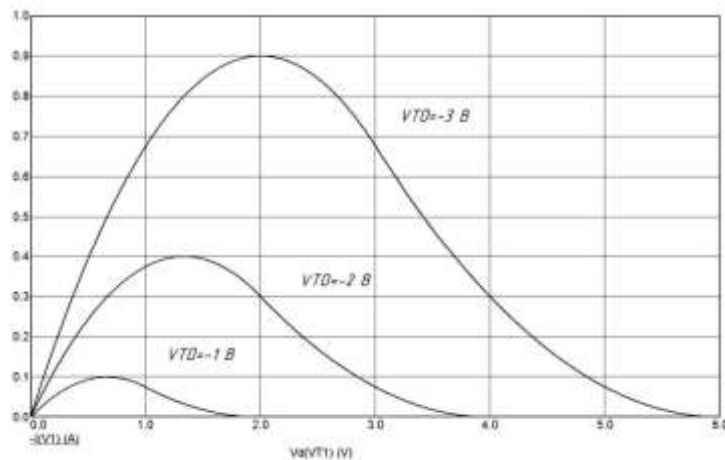


Рис. 3. Вольт-амперна характеристика λ -діода при різних порогових напругах

Від'ємний опір на вольт-амперній характеристиці λ -діода спостерігається на ділянці від $(2/3)V_{TO} \leq V_{ds} = 2V_{TO}$. На рис. 3 максимум струму відповідає значенню напруги джерела $V_1 = (2/3)V_{TO}$. Струм через λ -діод припиняється при напрузі $V_1 = 2V_{TO}$. Наприклад, при значенні порогової напруги -2 В розкрив вольт-амперної характеристики складає 4 В.

Обчислення значення струму за формулами (1) при пороговій зі -3 В показує повну ідентичність з результатами моделювання. При напрузі між стоком і витоком $0 \leq V_{ds} \leq 1,25$ В транзистора VT1 його струм

витоку I_{drain} розраховується за формулою (1в), а при напрузі $1,5 \leq V_{ds} \leq 3$ В за формулою (1б).

Напругу між витком і стоком V_{ds} , при якій забезпечується максимальне значення струму витоку I_{drain} , можна визначити, прирівнявши до нуля першу похідну у виразі (1в). Обчислення дає значення напруги між витком і стоком транзистора VT1 $V_{ds} = VTO/3$. При цьому максимальне значення струму транзистора VT1 (максимальне значення струму λ -діода) за умови $V_{ds} = VTO/3$ визначається за формулою

$$I_{drain \text{ макс}} = \frac{1}{3} BETA \cdot VTO^2 . \quad (2)$$

При відомому значенні напруги U_1 тунельного діода порогову напругу транзисторів розраховують за формулою

$$VTO = -(3/2)U_1 . \quad (3)$$

За отриманим значенням порогової напруги, визначають і другу напругу U_2 на вольт-амперній характеристиці тунельного діода як $U_2 = -2VTO$.

Струм тунельного діода I_1 встановлюється розрахунком параметра $BETA$ моделі польових транзисторів за умови $I_1 = I_{drain \text{ макс}}$. Підставивши у формулу (2) значення порогової напруги, визначимо параметр $BETA$

$$BETA = 4I_1 / 3U_1^2 . \quad (4)$$

Дифузійна гілка вольт-амперної характеристики тунельного діода на схемі, що на рис. 2, формується діодом VD1. Струм при напрузі U_2 визначає струм I_2 . Для знаходження параметрів елементів дифузійної гілки вольт-амперної характеристики тунельного діода скористуємось вольт-амперною характеристикою діода, яка в системі PSpice за умови нульового струму рекомбінації визначається рівнянням

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{U_\delta - I_\delta r_\delta}{N\varphi_T}\right) - 1 \right] , \quad (5)$$

де $\varphi_T = kT/q$ — тепловий потенціал, ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/°С — постійна Больцмана; T — абсолютна температура; $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд електрона; I_0 — тепловий струм; r_δ — опір бази; N — коефіцієнт інжекції.

Струм при напрузі U_2 значно менший порівняно зі струмом при напрузі U_3 . Тому падіння напруги на базі діода $U_\delta = I_\delta r_\delta$ мале і в рівнянні (5) цим доданком можна знехтувати. За цієї умови можна визначити

струм I_0 , який відповідає струмові тунельного діода при напрузі U_2

$$I_0 = \frac{I_2}{\exp\left(\frac{U_2}{N\varphi_T}\right) - 1}. \quad (6)$$

Розраховане значення струму I_0 потрібно ввести в параметр діода IS .

З рівняння (5) знайдемо опір бази за умови, що при напрузі на тунельному діоді U_3 струм через діод дорівнює фіксованому значенню I_1

$$r_{\bar{\sigma}} = \left[U_3 - N\varphi_T \ln\left(\frac{I_1}{I_0} + 1\right) \right] / I_1. \quad (7)$$

Значення опору бази вводиться в параметр діода RS .

При роботі тунельного діода на частотах, вищих за 150...200 МГц, потрібно враховувати паразитну індуктивність виводів. Значення цих індуктивностей на низькій частоті розраховується за формулою

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a+b} + 0,5 + 0,2235 \frac{a+b}{l} \right),$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м) — магнітна стала; l — довжина, a — ширина, b — товщина виводів відповідно.

На низькій частоті індуктивність виводів довжиною 10 мм прямокутного перерізу шириною 1мм і товщиною 0,3 мм складає близько 6,52 нГн. На високій частоті за умови врахування поверхневого ефекту паразитна індуктивність зменшується і становить близько 5,9 нГн на 10 мм довжини.

Наведемо параметри макромоделі арсенід-галієвого тунельного діода АИЗ01Г, який характеризується: $I_1 = 10$ мА, $U_1 = 0,18$ В; $I_2 = 1,26$ мА, $U_2 = 0,54$ В; $U_3 \geq 0,8$ В.

Порогову напругу польових транзисторів розраховуємо за формулою (3): $V_{TO} = -1,5U_1 = 1,5 \cdot 0,18 = -0,27$ В. Параметр $BETA$ — за формулою (4): $BETA = 4 \cdot 0,01 / (3 \cdot 0,18^2) \approx 0,4115$. Струм діода I_0 — за формулою (6): $I_0 = 0,00126 / [\exp(0,54 / (1,11 \cdot 0,026)) - 1] \approx 810E-15$ нА. Опір бази діода — за формулою (7): $r_{\bar{\sigma}} = 0,8 - 1,11 \cdot 0,026 \cdot \ln[(0,01 / 810E-15) - 1] / 0,01 \approx 20$ Ом

На рис. 4 наведена вольт-амперна характеристика схема моделі тунельного діода АИЗ01Г.

Параметри елементів моделі розраховані за вище зазначеними формулами. При напрузі на діоді 0,32 В модель має від'ємний опір близько -26 Ом.

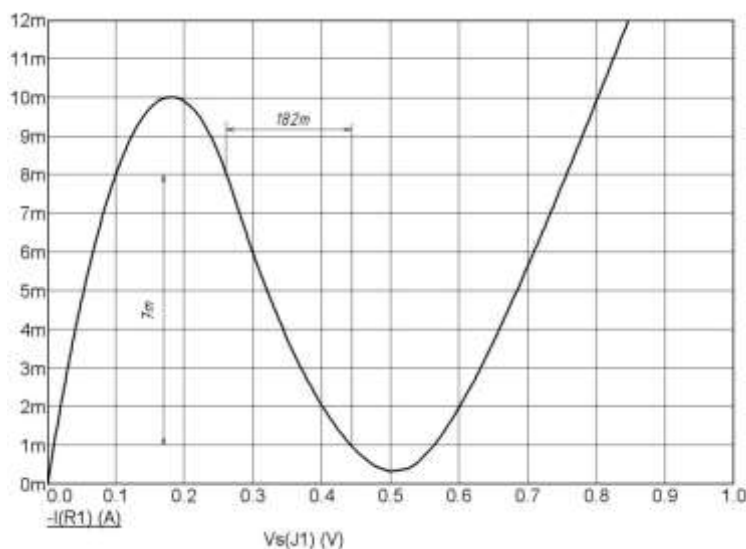


Рис. 4. Вольт-амперна характеристика моделі тунельного діода АІ301Г

На рис. 5 наведена схема розробленого генератора послідовного типу на макромоделі тунельного діода без паразитних індуктивностей.

В генераторі послідовний коливальний контур утворений ємністю тунельного діода, який моделюється конденсатором С2 з ємністю 50 пФ та індуктивністю L1 20 мкГн. Напруга джерела живлення V1 вибрана таким чином, щоб робоча точка на вольт-амперній характеристиці моделі тунельного діода в стаціонарному стані відповідала напрузі 0,32 В, де від'ємний опір тунельного діода має максимальне значення.

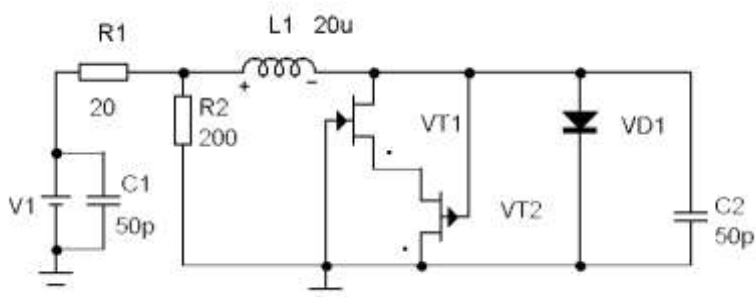


Рис. 5. Схема генератора на тунельному діоді

На рис. 6 наведені епюри напруг, які отримані в результаті моделювання генератора на макромоделі арсенід-галієвого тунельного діода типу АІ301Г.

Як видно з рис. 6, напруга на тунельному діоді змінюється від 800 мВ до 5 мВ, що відповідає траєкторії руху робочої точки на вольт-амперній характеристиці діода відповідно до рис. 4.

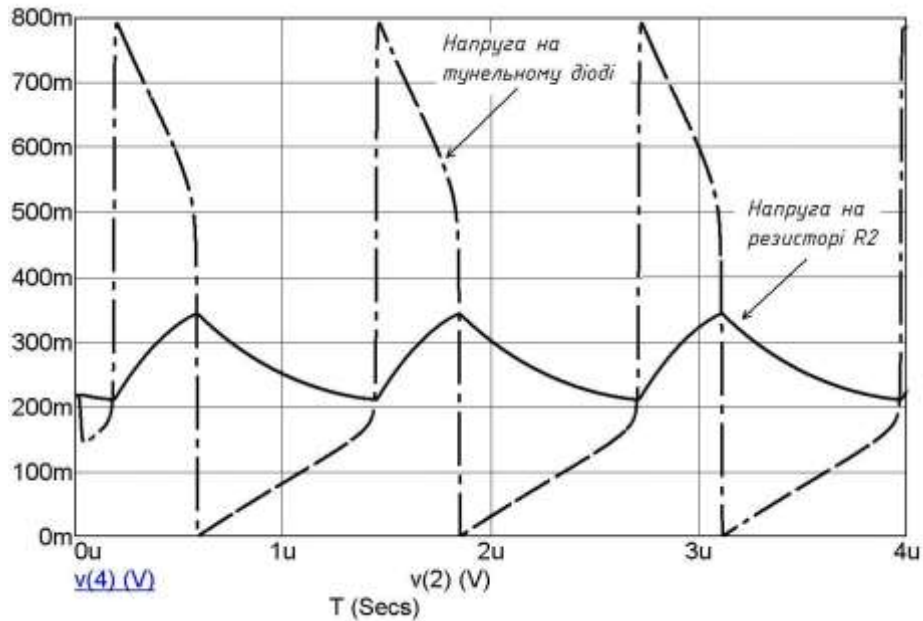


Рис. 6. Епюри напруг в різних точках моделі генератора

Висновки

Розроблена макромодель тунельного діода типу Масро. Виводяться формули для розрахунку параметрів елементів макромоделей різних типів. Моделювання генератора з використанням розробленої макромоделі тунельного діода демонструє працездатність прийнятих принципів моделювання. Викладені принципи моделювання можуть бути ефективно розповсюджені на інші класи електронних приладів.

Перелік посилань

1. Хайнеман Р. PSPICE. Моделирование работы электронных схем / Р. Хайнеман. – М. : ДМК, 2005. – 325 с.
2. Амелина М.А. Программа схемотехнического моделирования Micro Cap 8 / М.А. Амелина, С.А. Амелин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 464 с.
3. Micro-Cap 10 Electronic Circuit Analysis Program [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.spectrum-soft.com>.
4. Петраков О.М. Создание аналоговых PSPICE – моделей радиоэлементов / О.М. Петраков. – М. : ИП РадиоСофт, 2004. – 208 с.
5. W. M. Leach, Jr. SPICE Models for Vacuum-Tube Amplifiers / W. M. Leach, Jr. // J. Audio Eng. Soc. – 1995. – Vol 43, No 3. – pp. 117-126.
6. Молотков В.И. Исследование ВАХ маломощных полевых транзисторов и лямбда-диодов и расчет амплитуд автогенератора на лямбда-диоде / В.И. Молотков, Е.И. Потапов // Радиоэлектроника. – 1991. – Т. 34, No 11. – pp. 108-110.
7. Зіньковський Ю.Ф. Комп'ютерне схемотехнічне моделювання елементів радіоелектроніки. Ч. 2 / Ю.Ф. Зіньковський, А.В. Коваль. – Київ, 2013. – 376 с.

References

1. Khaineman R. (2005) PSPICE. Modelirovanie raboty elektronnykh skhem [PSPICE. Modeling of electronic circuits]. Moscow, DMK Publ., 325 p.
2. Amelina M.A. and Amelin S.A. (2007) Programma skhemotekhnicheskogo mod-

elirovaniya Micro Cap 8 [Circuit simulation software Micro Cap 8]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 464 p.

3. Micro-Cap 10 Electronic Circuit Analysis Program. Available at: <http://www.spectrum-soft.com>.

4. Petrakov O.M. (2004) Sozdanie analogovykh PSPICE – modeli radioelementov [The creation of analog pspice - models radioelements]. Moscow, IP RadioSoft Publ., 208 p.

5. W. M. Leach, Jr. (1995) SPICE Models for Vacuum-Tube Amplifiers. J. Audio Eng. Soc., Vol 43, No 3, pp. 117-126.

6. Molotkov V.I. and Potapov E.I. (1991) Issledovanie VAKh malomoshchnykh polevykh tranzistorov i lyambda-diodov i raschet amplitud avtogeneratora na lyambda-diode [Study of current-voltage characteristics of low-power field-effect transistors and diodes lambda and the calculation of the amplitudes of the oscillator on the lambda diode]. Radioelektronika. Vol. 34, No 11, pp. 108-110.

7. Zinkovskiy Iu.F. and Koval A.V. (2013) Komp'yuterne skhemotekhnichne modelivannia elementiv radioelektroniky. Ch. 2 [Computer simulation of electronics circuit elements. Part. 2]. Kyiv, 376 p.

Зінковський Ю. Ф., Коваль А.В., Макромодель тунельного діода в системах схемотехнічного моделювання. В роботі розглянута та досліджена схема макромоделі тунельного діода. Отримані рівняння для розрахунку параметрів елементів макромоделі тунельних діодів. Наведені результати моделювання генератора на макромоделі тунельного діода типу АІЗ01Г.

Ключові слова: тунельний діод, макромодель, від'ємний опір.

Zinkovskiy Yu. F., Koval A. V. Makromodel tunnelnogo dioda v sistemakh skhemotekhnicheskogo modelirovaniya. V rabote rassmotrena i issledovana skema makromodeli tunnelnogo dioda. Polucheny uravneniya dlya rascheta parametrov elementov makromodelей tunnelnykh diodov. Privedeny rezultaty modelirovaniya generatora na makromodeli tunnelnogo dioda tipa AI301G.

Ключевые слова: туннельный диод, макромодель, отрицательное сопротивление.

Zinkowskiy J. F., Koval A. V., Tunnel Diode Macro-model in the Electronic Circuits Modeling Systems.

Introduction. The circuit simulation programs that are currently in use do not have tunnel diodes macro-models in their standard libraries. So it is important to create and examine a circuit diagram of tunnel diode macro-model, because tunnel diodes are often used for oscillators and amplifiers developing.

Theoretical statement. The tunnel diodes macro-models are based on current/ voltage characteristics that correspond to the real static characteristics and parameters. The static current/voltage characteristic of the device is defined by coordinates in characteristic points and contains a region of negative dynamic resistance.

The suggested circuit diagram of tunnel diode macro-model consists of two parallel circuits. One of them forms so called λ -diode, and the other represents diode with parasitic capacitance.

Conclusions. The tunnel diode macro-model was created. A set of equations for parameter computation of macro-models of different types were derived. The oscillator simulation with using created tunnel diode macro-model shows availability of adopted simulating principles.

Keywords: Tunnel Diode, Macro-model, negative resistance