



DOI: 10.31388/2220-8674-2023-2-32

УДК 621.316.929

І. О. Попова, к.т.н.

ORCID: 0000-0001-5429-8269

С. В. Чаусов, к.т.н.

ORCID: 0000-0003-3811-9077

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного,

e-mail: iryna.popova@tsatu.edu.ua, тел.: 098-376-55-19

e-mail: sergii.chausov@tsatu.edu.ua, тел.: 096-743-76-21

ПОБУДОВА РОЗРАХУНКОВОЇ СХЕМИ ТРАНЗИСТОРНОГО НЕГАТРОНУ АНАЛОГА ЛЯМБДА-ДІОДА НА ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРАХ

Анотація. У статті представлена розрахункова схема транзисторного негatronу, який розроблений на комплементарній парі уніполярних (польових) транзисторів, який є еквівалентом (аналогом) лямбда-діода, що використовується в якості датчика, проведено дослідження для отримання рівняння вольт-амперної характеристики залежності струму стоку від напруги на негatronі в залежності від параметрів опорів розрахункової схеми. Лямбда-діод - це напівпровідниковий прилад, який складається з пари уніполярних транзисторів, виконаних на одному кристалі, з'єднаних в певну схему. Лямбда-діод має функцію перемикачання, що забезпечує його широке використання.

Була побудована повна розрахункова схема негatronа еквівалента лямбда-діода, проаналізовано значення опорів для типових кремнієвих уніполярних транзисторів, в результаті канали та затвори уніполярних транзисторів представлені диференціальними опорами на спрощеній еквівалентній аналоговій схемі лямбда-діода, де між електродні ємності не враховуються через їх малий розмір, що при подальшому дослідженні дозволили отримати рівняння вольт-амперної характеристики аналога лямбда-діода. Практичний інтерес має використання негatronа аналога лямбда-діода в якості вимірювального перетворювача будь-якої фізичної величини, для чого в роботі аналог лямбда-діода був застосований у мостовій схемі вимірювача температури: у одній з діагоналей мостового вимірювача використовуються нелінійні елементи, опір яких залежить від температури.

Рівняння вольт-амперної характеристики еквівалента лямбда-діода дозволяє визначати параметри мостового вимірювача негatronу,



і, відповідно, дає змогу застосовувати його в якості датчика. Область застосування еквівалента лямбда-діода велика: як в якості контролю неелектричних величин (температури, вологості, інтенсивності освітлення), так і електричних (відхилення напруги в електричній мережі, несиметрії напруги тощо). *Ключові слова:* комплементарна пара, уніполярні транзистори, первинний перетворювач, аналог лямбда-діода.

Постановка проблеми. Існує народно - господарча проблема: підвищення експлуатаційної надійності асинхронних двигунів в АПК, яких у виробництві переважна більшість. Головною причиною існуючої проблеми є експлуатаційні аварійні режими роботи асинхронних двигунів в сільськогосподарському виробництві, тому розробка і удосконалення пристроїв діагностування режиму роботи асинхронних двигунів є одним з шляхів рішення проблеми їх експлуатаційної надійності.

Розробку сучасних приладів діагностування та захисту електрообладнання проводять із використанням новітньої елементної бази, що дозволяє значно спростити схемотехніку порівняно із застосуванням класичних рішень. Завдяки цьому можливе розширення функціональних властивостей таких пристроїв.

Одним з таких перспективних напівпровідникових елементів є негatron – електронний напівпровідниковий пристрій, який в певному режимі роботи має від’ємне значення основного диференційного негативного активного опору, ємності або індуктивність [1].

Науковий напрям в області електроніки, пов'язаний з теорією і практикою створення і застосування негatronів отримав назву «негатроніка» – електронних пристроїв, що мають у визначеному режимі роботи негативний диференційний опір, а електронні пристрої на напівпровідних кристалах мають значну кількість схемотехнічних рішень для широкого класу як аналогових так і цифрових електронних пристроїв різних функціональних призначень.

В області низьких частот більше розповсюдження мають різні модифікації негatronів на базі структури з декількома $p-n$ переходами, лямбда-діоди. Лямбда-діод, що виконаний на одному кристалі, це електронний пристрій, з парою уніполярних транзисторів з керованими $p-n$ переходами, у яких об'єднані стоки або витоки. Цей негatron лямбда-діод має чотири різновиди, що виготовляється промисловістю, та має характеристику перемикача.

Негатрон лямбда-діод, що виконаний на одному кристалі, є двохполюсником, вольт-амперна характеристика має ділянку з позитивним диференційним опором, яка властива звичайному діоду, та ділянку з негативним диференційним опором, як у тунельного

діоду. При збільшенні прикладеної напруги позитивної полярності до лямбда-діода (анод позитивний) сила струму через негatron лямбда-діод спочатку зростає і досягає максимального значення, але якщо продовжувати збільшувати напругу і далі, то це викличе зменшення струму. В наслідок подальшого збільшення напруги струм майже зникає (дорівнює наноамперам), тобто лямбда-діод запирається. Якщо напруга на негatronі буде рости і в подальшому, то він буде перебувати у зачиненому стані аж до напруги пробоя, при якій один з затворів пробивається. Перевагою негatronу лямбда-діода, що випускається радіопромисловістю, є висока технологічність та простота виготовлення, порівняно зі звичайними приладами з негативним опором, що дає можливість застосовувати його з іншими напівпровідниковими пристроями; мізерно мале електроспоживання в закритому стані; малі втрати енергії; висока температурна стабільність; значна і стабільна амплітуда вихідного сигналу [2]. Але у негatronа лямбда-діода, що виробляється промисловістю, неможливо регулювати вольт-амперну характеристику (ВАХ), це є його головним недоліком. [3].

Аналіз останніх досліджень. Технологія виробництва напівпровідникових пристроїв сьогодні досягла високої досконалості, однак процес їх виготовлення достатньо трудомісткий. З цієї точки зору більш цікавим є застосування аналогів негatronів на базі різних схемотехнічних комбінацій активних пристроїв, наприклад, аналогів лямбда-діоду на базі уніполярних транзисторів.

Розроблений еквівалент (аналог) лямбда-діода (рис.1), на відміну від промислового зразка лямбда-діода, містить два уніполярних транзистори, які є комплементарною, ретельно підбраною парою уніполярних транзисторів з керуючими *p-n* переходами. Комплементарний від англійської *complementation* доповнення.

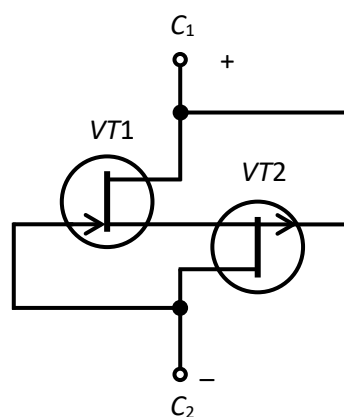


Рисунок 1. Принципова схема негatronу аналога лямбда-діода



Транзистори, що є комплементарною парою, мають схожі параметри (напруги стоку, затвору, струми витоку затворів, крутизна ВАХ, вхідна, прохідна ємності тощо), але мають різні типи провідностей: один має канал p -типу, а інший – канал n -типу. У транзисторів можуть бути об'єднані стоки або витоки [1].

Негатрон аналога лямбда-діода, виконаний на двох уніполярних транзисторах: один з уніполярних транзисторів має канал p -типу (КП303Г, КП303Б, КП303Е), а другий – канал n -типу (КП103Л, КП103М). Таким чином, для побудови розрахункової схеми прийнятій негатрон аналог лямбда-діода, виконаний на комплементарній парі КП303Г-КП103Л з об'єднаними витоками [4].

Формулювання цілей статті. Побудувати розрахункову схему негатрона аналога лямбда-діода з метою визначити можливість застосування його в якості вимірювального перетворювача і визначення його параметрів.

Результати досліджень. Для обґрунтування використання аналога лямбда-діода в якості вимірювального перетворювача і визначення його параметрів, розглянемо повну розрахункову схему аналога лямбда-діода, яка приведена на рис. 2. До речі, розрахункова схема лямбда-діода показує фізичні явища та фізичну процеси, які відбуваються у ньому при проходженні по лямбда-діоду електричного струму.

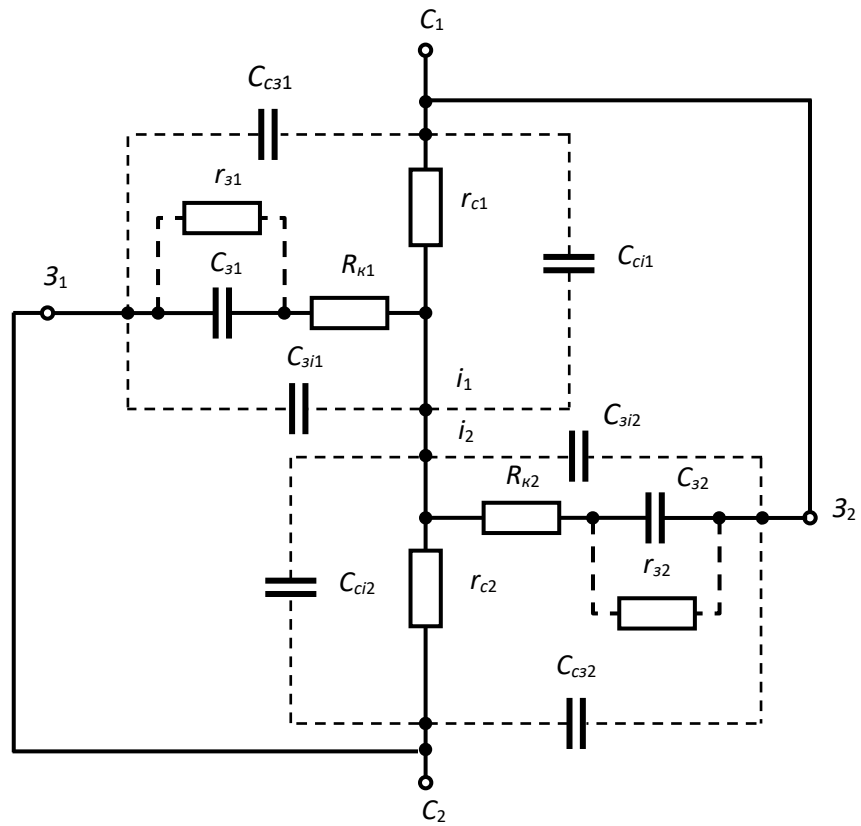


Рисунок 2. Повна розрахункова схема негatronу аналогу лямбда-діода



На розрахунковій схемі канал кожного уніполярного транзистора і $p-n$ перехід подані у вигляді ділянок послідовно з'єднаних активних опорів і ємностей ($r-c$), що мають зосереджені параметрами. Канали уніполярних резисторів мають диференціальні опори r_{c1} і r_{c2} , затвори мають опори r_{z1} і r_{z2} і між-електродні ємності сток-виток C_{ci1} і C_{ci2} , величина яких залежить від геометрії (розмірів) і матеріалу уніполярних транзисторів. Затвори аналога лямбда-діода представлені на схемі опорами r_{z1} та r_z [2, 5, 6].

Заряд ємностей затворів проходить через опори каналів і залежить від віддаленості ділянки від витоків, припустимо, що ємності затворів отримують заряд через усереднені опори каналів R_{k1} і R_{k2} , що і визначить усталену часу τ_z аналога лямбда-діода.

Прийmemo, величини параметрів кремнієвих уніполярних транзисторів [2] при напрузі $U_{ci} = 10$ В і $U_{zi} = 0$ наступними:
 $C_z = 3 \dots 10 \cdot 10^{-9}$ Ф; $C_{zi} = 0,5 \cdot 10^{-9}$ Ф; $C_{cz} = 1 \cdot 10^{-9}$; $C_{ci} = 0,3 \dots 1 \cdot 10^{-9}$ Ф; $r_z = 10^{10}$ Ом; $r_c = 0,1 \dots 1 \cdot 10^6$ Ом; $R_{k1} \approx 200$ Ом; $R_{k2} = 75 \dots 200$ Ом [1, 2].

Оскільки значення ємностей C_z , C_{zi} , C_{cz} , C_{ci} дуже малі, то ними можна зневажити, а отже еквівалентна розрахункова схема еквівалента лямбда-діода приймає вигляд, зображений на рис. 3.

Згідно [7] затвори транзисторів мають доволі значні опори – $10^9 \dots 10^{10}$ Ом, тому на диференціальні опори каналів r_{c1} і r_{c2} еквівалента лямбда-діода робить вплив напруга на їх затворах, а не сили струмів на затворах уніполярних транзисторів (бо вони дуже замалі).

Рівняння стокової вольт-амперної характеристики лямбда-діода, згідно розрахункової схеми

$$I = \frac{1}{R_{ko1}} \frac{U_{c1}(U_{zo1} - U_{z1} - 1/2U_{c1})}{U_{zo1}} = \frac{1}{R_{ko2}} \frac{U_{c2}(U_{zo2} - U_{z2} - 1/2U_{c2})}{U_{zo2}}, \quad (1)$$

де R_{ko1} , R_{ko2} – диференціальні опори каналів уніполярних транзисторів;

U_{c1} , U_{c2} – падіння напруги між стоком і витком уніполярних транзисторів;

U_{zo1} , U_{zo2} – напруга відсічки уніполярних транзисторів;

U_{z1} , U_{z2} – напруга між затвором і витком уніполярних транзисторів.

Виходячи з розрахункової схеми: падіння напруги між затвором і витком транзистора $VT1$ і падіння напруги між стоком і витком транзистора $VT2$ рівні за величиною $U_{z1} = U_{c2}$, а падіння напруги між затвором і витком транзистора $VT2$ і падінню напруги між стоком і витком транзистора $VT1$ теж рівні між собою $U_{z2} = U_{c1}$, то загальна напруга на еквіваленті аналогу лямбда-діода буде дорівнювати

$$U_\lambda = U_{c1} + U_{c2}. \quad (2)$$

Після підстановки (2) у (1) одержимо рівняння

$$I = \frac{1}{R_{ko2} U_{zo2}} \cdot U_{c2} \cdot U_{zo2} - \frac{1}{R_{ko2} U_{zo2}} \cdot U_{c2} \cdot U_{c1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{R_{ko2} U_{zo2}} \cdot U_{c2}. \quad (3)$$

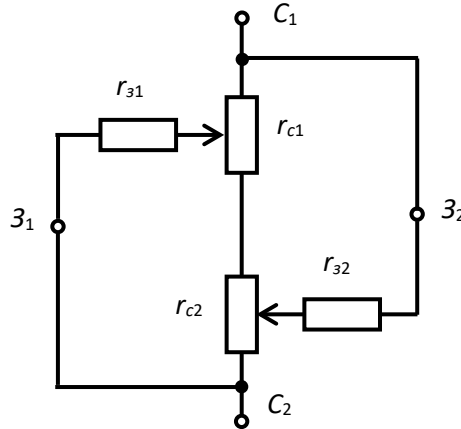


Рисунок 3. Спрощена розрахункова схема аналогу лямбда-діода

За умови компліментарності уніполярних транзисторів в еквіваленті лямбда-діода зробимо наступні припущення $I_{c1} = I_{c2}$, $U_{c1} = U_{c2}$, $U_{zo1} = U_{zo2}$, $R_{ko1} = R_{ko2}$, що дозволить спростити рівняння вольт-амперної характеристики еквівалента лямбда-діода

$$I = \frac{1}{2R_{ko}} \cdot U_{\lambda} - \frac{3}{8} \cdot \frac{1}{R_{ko} U_{zo}} \cdot U_{\lambda}^2. \quad (4)$$

Щоб негатрон аналога лямбда-діода, виконував функцію перетворювача температури, використаємо мостову схему його з'єднання (рис. 4) [8]. В цьому випадку опори терморезисторів R_1 і R_3 із збільшенням температури будуть змінюватися, в наслідок цього будуть змінюватися потенціали затворів уніполярних транзисторів, опори каналів, і, змінюватиметься сила струму витoku аналога лямбда-діода.

На рисунку 5 наведена розрахункова схема аналога лямбда-діода, що використаний в якості первинного перетворювача температури.

На схемі резистори R_1 і R_3 – терморезистори з негативним (термістори) або позитивним (позистори) температурним коефіцієнтом опору, опір цих нелінійних елементів залежить від значень температури середовища [9, 10].

Рівняння напруги на затворах лямбда-діода в залежності від величин опорів терморезисторів R_1, R_3 і резисторів R_2, R_4 . має вигляд

$$U_3 = \frac{U_\lambda}{2} - U_\lambda \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_\lambda}{2} - U_\lambda \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4}. \quad (5)$$

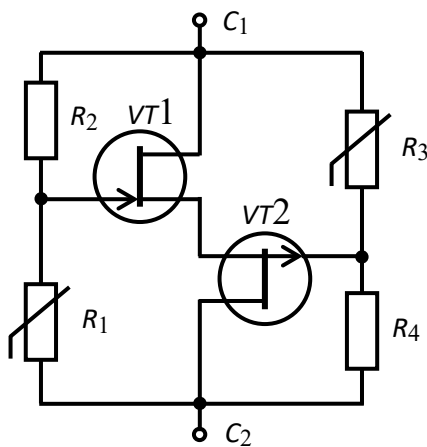


Рисунок 4. Схема аналогу лямбда-діода в якості перетворювача температури

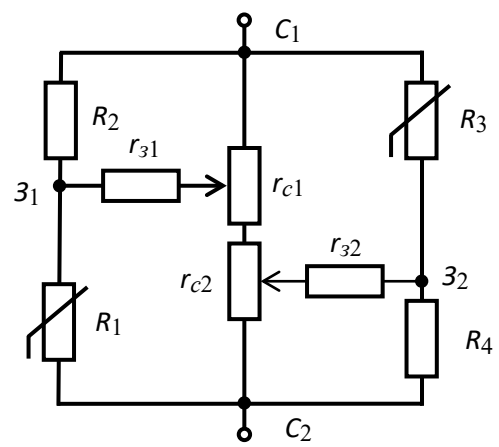


Рисунок 5. Схема заміщення аналогу лямбда-діода в якості перетворювача температури

Якщо припустити, що терморезистори R_1 і R_3 одного типу (або термістори, або позистори) і знаходяться в однакових температурних умовах, а опори резисторів R_2 і R_4 рівні між собою, то це спростить розрахунок значень параметрів аналогу лямбда-діода і рівняння вольтамперної характеристики аналога лямбда-діода в якості вимірювального перетворювача температури

$$I_C = \frac{1}{2R_{к0}} \cdot U_\lambda - \frac{U_\lambda^2}{2R_{к0} \cdot U_{30}} \left(\frac{3}{4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right). \quad (6)$$

Використавши технічні дані уніполярних транзисторів аналогу лямбда-діода на компліментарній парі КП303Г-КП103Л, має наступні значення параметрів: постійна часу затвору $\tau_3 = 0,5 \dots 2 \cdot 10^{-9}$ секунди, крутизна ВАХ $S = 0,3 \dots 3 \cdot 10^{-3}$ А/В, середня ємність затворів $C_3 = 3 \dots 10 \cdot 10^{-12}$ Ф, середнє значення опорів каналів аналогу лямбда-діода $R_{к\lambda} = 0,2 \dots 2 \cdot 10^6$ Ом [10].

Використовуючи розрахункову схему можна розрахувати силу



струму стоку, напругу, при який відбудеться запирання лямбда-діода, тобто ширину ВАХ, а також здійснити вибір параметрів резисторів для використання аналога лямбда-діода в якості перетворювача температури.

Висновки. З аналізу рівнянь вольт-амперної характеристики негатрона аналога лямбда-діода можна зробити висновок, що ширину ВАХ аналога лямбда-діода можна регулювати за рахунок використання різних за величиною резисторів R_1 – R_4 , тобто здійснювати контроль температури розосереджених об'єктів.

Список використаних джерел

1. Філінюк М. А. Основи негатроніки. Т.1. Теоретичні і фізичні основи негатроніки. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. 456 с.
2. Філінюк М. А. Основи негатроніки. Т.2. Прикладні аспекти негатроніки. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. 306 с.
3. Філінюк М. А. Інформаційні пристрої на основі потенційно-нестійких багатоелектродних напівпровідникових структур Шоттки : [монографія] / Філінюк М.А., Куземко О.М., Ліщинська Л.Б. Вінниця : ВНТУ, 2009. 274 с.
4. Курашкін С. Ф., Попова І. О., Чураков А. Я. Експериментальне дослідження аналогу лямбда-діода на біполярних транзисторах. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. Мелітополь: 2007. Вип. 45. С. 40–44.
5. Погосов В. В., Корніч Г. В., Васютін Е. В. та ін. Основи нанофізики і нанотехнологій: Навчальний посібник. Запоріжжя: НТУ, 2008. 632 с.
6. Vendelin G. D., Pavidio A. M., Rohde U. L. Microwave circuit design using linear and nonlinear techniques. *Wiley Interscience*. 2005. pp. 1057.
7. Філінюк М. А., Войцеховська О. В. Конструювання та технологія мікроелектронної апаратури. Частина 1. Конструювання елементів мікроелектронної апаратури : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2011. 189 с.
8. Hove J., Manusov V. Technical diagnostics of electric equipment with the use of fuzzy logic models. *Applied Mechanics and Materials: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 792. P. 324–329.
9. Касимов Ф. Д. Перспективы развития и применения микроэлектронной негатроніки. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2008. №5. С. 5–8.
10. Попова І. О., Курашкін С. Ф., Попрядухін В. С. Експериментальне дослідження вольт-амперних характеристик аналога лямбда-діода на уніполярних транзисторах. *Енергетика і*



автоматика. 2018. №5(39). С. 59–67.

Стаття надійшла до редакції 27.01.2023 р.

I. Popova, S. Chausov
Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university

CONSTRUCTION OF THE CALCULATION CHART OF THE TRANSISTOR NEGATRON ANALOGUE OF A LAMBDA-DIODE ON FIELD TRANSISTORS

Summary

The work is devoted to the development of a transistor negatron replacement circuit - a lambda diode analog on complementary field-effect transistors as a primary converter and its research in order to obtain an equation for the dependence of the drain current on the voltage on the clamps of a lambda diode analog depending on the parameters of the replacement circuit. A lambda diode is a semiconductor device that consists of a pair of field-effect transistors connected in a certain circuit and made on one crystal. The lambda diode has a switching function, which ensures its wide use.

A full equivalent negatron analog lambda diode replacement circuit was built, its parameters were analyzed in view of the typical parameters of the applied silicon field-effect transistors, which made it possible to simplify the circuit in which the channels and gates of the field-effect transistors are represented by differential resistances on the simplified equivalent analog lambda-diode circuit. and the capacitors between the electrodes are not taken into account due to their small size, which during further research made it possible to obtain the equation of the current-voltage characteristic of the analog of the lambda diode. The use of a negatron analog of a lambda diode as a measuring converter of any physical quantity is of practical interest, for which the analog of a lambda diode was used in the bridge circuit of a temperature meter: for which nonlinear elements whose resistance depends on temperature are used in one of the diagonals of the bridge meter.

The equation of the current-voltage characteristic was obtained taking into account the parameters of the bridge meter, which makes it possible to assert the possibility of using a lambda-diode analogue as a measuring converter. The field of application of the lambda-diode analogue is wide. The authors received patents that use an analogue of the lambda diode: devices for temperature control, voltage deviation in the electrical network and voltage asymmetry.

Key words: complementary pair, polytransistors, first converting device, negatron, analogue of lambda-diode