

NANOELEKTRON QURĞULARDA KÜYLƏRİN TƏSVİRİ METODLARI

E.Ə. KƏRİMOV

Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Azadlıq pr. 16/21, AZ 1010

e-mail: E_Kerimov.fizik@mail.ru

Nanoelektron cihazlarda gedən proseslər determinə olunmuş proseslər olsa da, bu proseslərə cihaz dövrələrində cərəyan və gərginlik fluktuasiyaları yaradan müxtəlif təsadüfi faktorlar təsir edir. Nanoelektron cihaz və qurğuların çıxışlarındakı gərginlik fluktuasiyaları küyləndirir. Küylər bütün nanoelektron cihazlara aid olub, onların daxilində yük daşıyıcıların hərəkətinin təsadüfi xarakterli olması ilə şərtlənir. Küylərə çox zaman nanoelektron qurğuların xarakteristikalarına - ən çox da həssaslıqlarına məhdudiyətlər qoyan faktorlar kimi baxılır. Bəzən küyü sistemin özünün elektrik xarakteristikalarını tədqiq etmək üçün istifadə etmək mümkündür.

Açar sözlər: sürətlənmiş ionlar, lokal enerji, hədəf, ion bombardmanı, neytral atom, səpilməmiş ionlar.

UOT: 621.383.5

PACS: 73.40.Ns, 73.40.Sx

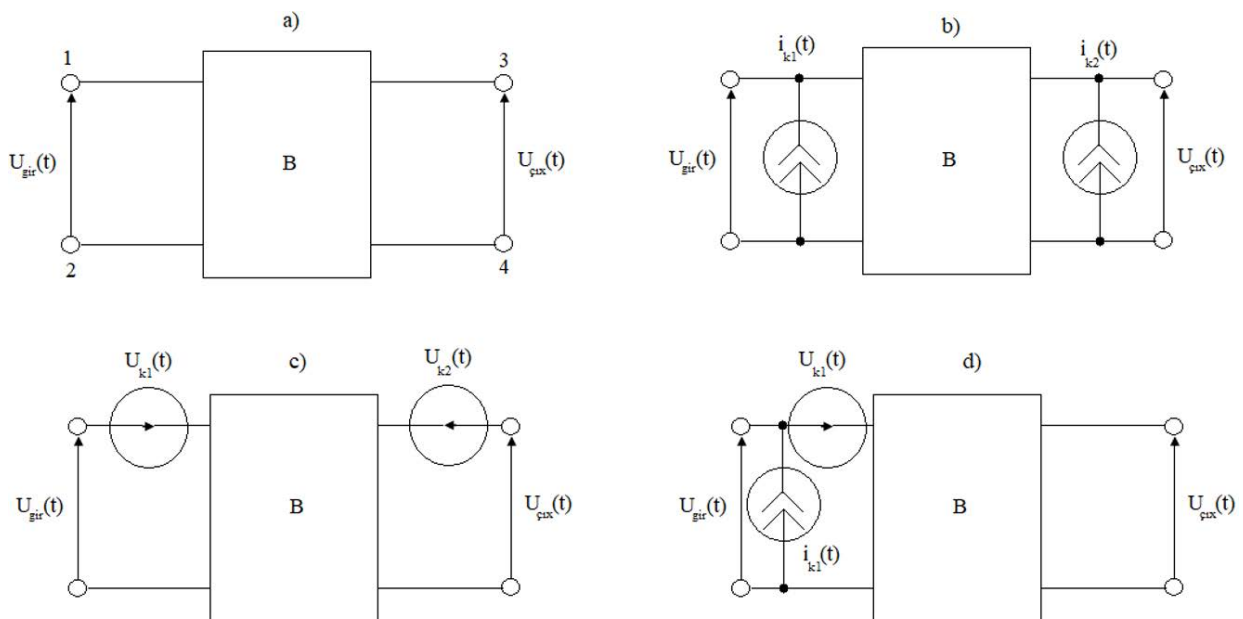
Nanoelektron cihazlarda küylərə adətən zaman və ya tezlik oblastlarında stasionar təsadüfi proseslər kimi baxılır. Belə olan halda küylərin əsas xarakteristikaları aşağıdakılardır: bu təsadüfi prosesin reallaşmasının orta qiyməti (riyazi gözləmə); fluktuasiya edən siqnalın orta spektral toplananını təşkil edən spektral sıxlıq; riyazi gözləməsi sıfır olan küyün enerjisini xarakterizə edən dispersiya; $x(t)$ təsadüfi funksiyasının t zaman intervalı ilə ayrılan iki qiyməti arasında statistik əlaqəni təyin edən avtokorrelasiya funksiyası.

Küylərin nəzəri analizi üçün ən effektiv metod Furye metodudur. Bu metodda fluktuasiya olunan $x(t)$ kəmiyyəti $\overline{S_x(f)}$ - spektral sıxlıq ilə təsvir oluna bilər. Məsələn, tezliklərin böyük olmayan intervalında (zolaqda) küy e.h.q. olan $U(t)$ – gərginliyi $\overline{S_u(f)}$ spektral sıxlıq vasitəsilə təsvir olunur, Δf tezliklər zolağında $i(t)$ fluktuasiya cərəyanı mənbəyi isə orta kvadratik küy cərəyanı generatoru ilə əvəz edilir:

$$\overline{i_k^2} = \overline{S_i(f)} \Delta f$$

Burada, $\overline{S_i(f)}$ kəmiyyəti $i(t)$ cərəyanının spektral sıxlığıdır.

Furye metodunun üstünlüyü ondan ibarətdir ki, küyün intensivliyini (gücünü) təyin edən kəmiyyətin orta kvadratik qiymətlərini dəyişən cərəyan dövrləri nəzəriyyəsinin köməyi ilə hesablamaq mümkündür. Küylü nanoelektron cihaz adətən küylü iki- və ya dördqütblü (çoxqütblü) şəklində verilir (şəkil 1). Belə küylü sistemin analizini sadələşdirmək üçün çoxqütblü “ideal” yəni, küydən azad çoxqütblü kimi götürülür (şəkil 1a). Küy adətən $\|Y\|$ - keçiricilik matrisi ilə xarakterizə olunur. Küy ya girişə və çıxışa $i_{s1}(t)$ və $i_{s2}(t)$ – cərəyanlarının küy generatoru birləşdirmək (şəkil 1b), ya da aralarında korrelyasiya edə bilən ardıcıl birləşdirilmiş (şəkil 1c) $U_{s1}(t)$ və $U_{s2}(t)$ küy e.h.q. ilə modelləşir.



Şəkil 1. Küylü nanoelektron cihazın küylü dördqütblü şəklində verilməsi.

Konkret cihaz və qurğularda küylərin rolu müəyyən olunarkən, tez-tez yuxarıda göstərilənlərdən əlavə, küysüz dördqütblünün girişində eyni zamanda giriş küy cərəyanı generatoru və giriş küy gərginliyinin generatorları birləşdirilir. Bu zaman fərz edilir ki, belə generatorların küyləri korrelyasiya etməmişdir (şəkil 1d). Çıxış küyləri küysüz dördqütblünün məlum parametrləri vasitəsi ilə çox asanca hesablanır [1,2].

Cərəyan və e.h.q.-nin küy generatorlarının hər bir cihaz üçün olan parametrləri bu cihaza aid olan küy mənbələri ilə təyin olunur. Əgər hər bir cihaz ayrı-ayrılıqda analiz edilərsə, bi cihazların müxtəlifliyi səbəbindən küylərin rolunun müəyyən olunması çox çətinləşir. Vəziyyəti etalon və misbətən universal olan, bir çox cihazların küylərinin analizində istifadə edilən cərəyan və gərginlik küy generatorları tətbiq etməklə sadələşdirmək mümkündür. Bundan əlavə, küy mənbələrinin müxtəlifliyi çox böyük olduğu zaman daha mürəkkəb ekvivalent sxemlər istifadə edilir. Etalon küy mənbələri kimi, adətən, diodun doyma rejimində küyü və T temperaturunda R müqavimətinin istilik küyü götürülür.

Əgər istənilən ikiqütblü və ya ikiqütblü kimi baxıla bilən cihaz (diodlar, müqavimətlər və s.) nəzərdən keçirilirsə, küy cərəyanı mənbəyi \dot{Y} kompleks giriş keçiriciliyinə paralel, küy

$$\sqrt{U_k^2} = \sqrt{i_k^2 \cdot |\dot{Z}|^2}$$

e.h.q. mənbəyi isə \dot{Z} kompleks müqaviməti ilə ardıcıl birləşdirilir.

Küy cərəyanının orta kvadratik qiyməti aşağıdakı bərabərliklə təyin olunur:

$$\overline{i_k^2} = 2qI_{ekv}\Delta f, \quad (1)$$

burada, I_{ekv} – verilmiş dövrə və ya cihaz üçün diodun ekvivalent doyma cərəyanı, q – mütəhərrik daşıyıcının (elektron və ya deşik) yüküdür. I_{ekv} cərəyanının mənası ondan ibarətdir ki, əgər dövrənin küyünün qiyməti ölçülsə və onun girişinə paralel olaraq I_{ekv} cərəyanlı doyma rejimində diod birləşdirilibsə, çıxışda küyün gücü iki dəfə artacaqdır.

Naykvist teoreminə əsasən Δf tezlik zolağında T temperaturunda R müqavimətinin istilik küyü ya bu müqavimətə ardıcıl birləşdirilmiş e.h.q.

$$\sqrt{U_k^2} = \sqrt{4kTR\Delta f}$$

küylü gərginlik generatoru, və ya

$$\sqrt{i_k^2} = \sqrt{\frac{4kTR\Delta f}{R}}$$

küy cərəyanı mənbəyi ilə verilə bilər.

Küyün P_k – gücü üçün hf və kT arasındakı istənilən münasibətdə daha ümumi ifadə aşağıdakı kimi yazıla bilər:

$$dP_k = \frac{hf}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1} df.$$

Nəzərə alsaq ki, R yükünə generator tərəfindən verilən P gücü

$$P = \frac{U^2}{4R}$$

olduğunu nəzərə alaraq, Δf zolağında

$$\overline{U_k^2} = \frac{4hf\Delta fR}{\left[\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1\right]} \quad (2)$$

şəkilində küy e.h.q.-nin orta kvadratik qiymətini tapırıq.

Aldığımız bu ifadə optik diapazonda da küyləri qiymətləndirməyə imkan verir.

$hf \ll kT$ olduğu şərt daxilində (1) ifadəsi Naykvist düsturuna çevrilir. Əgər bu nəticələri elektron ikiqütblü cihaza köçürsək, cihazın aktiv $G_{keç}$ – küy keçiriciliyində küy cərəyanə aşağıdakı ifadə ilə təyin olunacaqdır:

$$\overline{i_k^2} = 4kTG_{keç}\Delta f. \quad (3)$$

Çıxış küy e.h.q. isə belə hesablanacaqdır:

$$\overline{U_k^2} = \overline{i_k^2} |\dot{Z}|^2 = 4kTR_{cih}\Delta f. \quad (4)$$

burada, $R_{cih} = 1/G_{keç}$ cihazın T temperaturunda ekvivalent həqiqi (aktiv) küy müqavimətidir.

Doyma rejimində istilik küy cərəyanını diodun ekvivalent cərəyanına çevirmək mümkündür. Bunu üçün (1) ifadəsini (3) düsturunda nəzərə almaq lazımdır:

$$2qI_{ekv} = 4kTG_{keç} \rightarrow I_{ekv} = \frac{2kT}{qR_{cih}}. \quad (5)$$

Bir çox hallarda küyləri təsvir etmək üçün doyma rejimində diodun cərəyanından və küy müqavimətindən başqa ekvivalent T_{ekv} – küy temperaturu anlayışı daxil edilir. T_{ekv} -nin daxil edilməsi cihazda istilik küyü üstünlük təşkil etdiyi zaman daha faydalı olur.

Nanoelektron cihazın küylərini təsvir edərkən, T – həqiqi temperaturun əvəzinə hər hansı T_0 – “dayaq” temperaturu istifadə edilir. Bu onunla əlaqədardır ki, cihazın temperaturunu çox zaman, müxtəlif elementlərinin temperaturlarının fərqli olması səbəbindən, müəyyən etmək çox çətin olur. Məsələn, vakuum cihazlarında bütün elektrodların temperaturları bir qayda olaraq müxtəlifdir. Bunun səbəbindən sadəlik üçün fiksə olunmuş, standart otaq temperaturu götürülür: $T_0 = 290K$ [3].

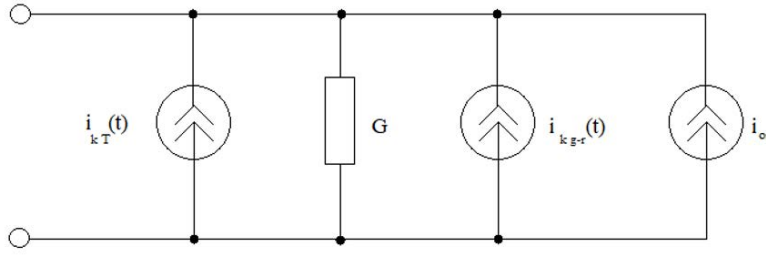
Çoxqütblü cihazlarda (tranzistorlar, çoxelektrodlu lampalar və s.) küyləri analiz edən zaman ekvivalent sxemlər üçün cərəyan və gərginlik generatorları və ya onların kombinasiyası - məsələn, giriş müqavimətinə paralel birləşdirilmiş küy cərəyanı generatoru və ardıcıl birləşdirilmiş, onunla korrelyasiya olunmuş küy gərginliyi generatoru şəkilində bir neçə küy mənbəyi daxil edilir (şəkil 1d).

Küy fonunda zəif siqnalların ayrılması zamanı radioqəbuledici qurğuların qiymətləndirilməsi və müqayisəsi üçün F küy əmsalı anlayışından geniş istifadə olunur.

Küy əmsalı girişdə siqnal mənbəyinin $P_{mən}$ – gücünün küy mənbəyinin $P_{m.k}$ – gücünə nisbətini çıxışda analogi nisbətdən neçə dəfə çox olduğunu göstərir. Riyazi şəkildə ifadə etsək:

$$F = \frac{\left(\frac{P_{mən}}{P_{m.k}}\right)_{gir}}{\left(\frac{P_{mən}}{P_{m.k}}\right)_{çix}} \quad (6)$$

Küy əmsalı adətən desibellərlə ölçülür (dB):



Şəkil 2. Küy generatorları nəzərə alınmaqla fotorezistorun ekvivalent sxemi.

Şəkildə:

- 1) $\sqrt{i_{kT}^2}$ cərəyan generatoru

$$\overline{i_{kT}^2} = 4kTG\Delta f$$

istilik küyləri modeləşdirir. Burada, G – istilik cərəyanı, fon cərəyanı və fotocərəyan ilə şərtlənən keçiricilikdir.

- 2) $\sqrt{i_{kgr}^2}$ küy generatoru generasiya – rekombinasiya küyü modelləşdirir:

$$\sqrt{i_{kgr}^2} = \left(\frac{\tau}{t_{uç}}\right) \left[\frac{4qI_0\Delta f}{1+\omega^2\tau^2}\right] \quad (9)$$

burada, τ – fotodaşıyıcıların yaşama müddəti; I_0 – stasionar çıxış fotocərəyanı; $t_{uç}$ – kontaktlar arasında daşıyıcıların uçuş müddəti; $\omega = 2\pi f$ optik siqnalın moduliyasının tezliyidir.

- 3) i_{or} – generatoru faydalı orta kvadratik cərəyan siqnalıdır.

Fotodetektorların keyfiyyəti çox zaman 1 Hs tezlik zolağında vahidə bərabər siqnal/küy nisbətini almaq üçün lazım olan düşən şüalanmanın orta kvadratik gücü

$$F(dB) = 10\lg F = 10\lg \left(\frac{P_{mən}}{P_{m.k}}\right)_{gir} \quad (7)$$

Sistemin T_{ekv} - ekvivalent küy temperaturu F – küy əmsalı ilə aşağıdakı münasibətlə əlaqədardır:

$$T_{ekv} = T_0(F - 1) \quad (8)$$

(7) ifadəsindən gördüyümüz kimi, küy əmsalının minimal qiyməti vahidə bərabərdir ($F_{min}=1$).

Fotoqəbuledicilərdə küylərin tədqiqi isə daha böyük maraq kəsb edir. Burada əsas küy mənbələri – istilik, generasiya-rekombinasiya mənbələridir. Küy generatorları nəzərə alınmaqla fotorezistorun ekvivalent sxemi şəkil 2-də verilmişdir.

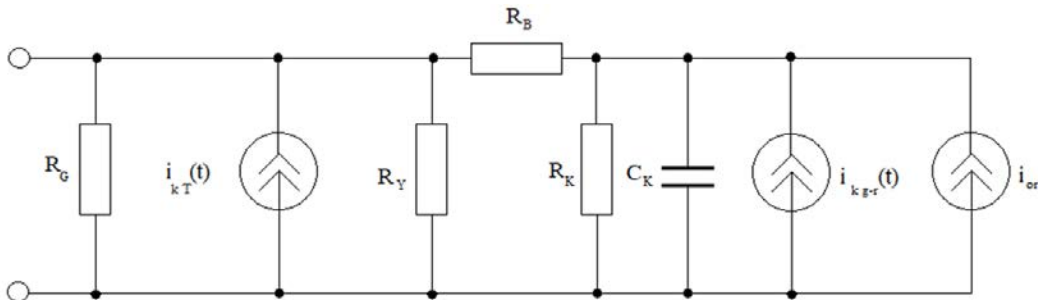
kimi təyin olunan küyün ekvivalent gücü (*noise equivalent power*) ilə qiymətləndirilir.

Bütün tip fotodiodların ($p-i-n$ fotodiodlar, Şottki çəpərli və heteroqəçidli) küyləri əsasən generasiya – rekombinasiya və istilik fluktuasiyaları aid olan eyni bir mənbəyə malikdir. Bu mənbələr digər cihazların küy xarakteristikaları öyrənilən zaman olduğu kimi küy cərəyanları generatorları ilə modelləşir [4,5].

Optik siqnalın və fon şüalanmasının udulması zamanı fotodiodlarda elektrik sahəsi tərəfindən ayrılan və $p-n$ keçiddən ayrı-ayrı tərəflərə dreyf edən elektron – deşik cütləri generasiya edir. Bu zaman optik siqnal ilə şərtlənən fotocərəyan I_F , fon şüalanması ilə şərtlənən fotocərəyan I_{fon} , elektron – deşik cütlüyünün termik generasiya cərəyanı I_T olur. Daşıyıcıların generasiya prosesi təsadüfi xarakter daşdığı və onların güclü sahədən keçdikləri səbəbindən aşağıdakı ifadə ilə təyin olunan küy yaranır:

$$\overline{i_k^2} = 2q(I_F + I_{fon} + I_T)\Delta f \quad (10)$$

Baxdığımız küylərdən başqa diod oblastlarının həcmi müqavimətləri istilik küyləri əlavə edir. Fotodiodun şəkil 3-də göstərilən ekvivalent sxeminə fotodiodların parametrləri ilə təyin olunan cərəyanların küy generatorları və sxemin digər elementləri yer almışdır.



Şəkil 3. Fotodiodların parametrləri ilə təyin olunan cərəyanların küy generatorları.

Sxemdə C_K və R_K – keçidin uyğun olaraq tutum və müqaviməti; R_B – diodun bazası həcmi müqaviməti; R_Y – yükün müqaviməti; R_G – faydalı siqnal gücləndiricisinin giriş müqavimətidir. İstilik küyləri fotodiodun tam keçiriciliyi ilə təyin olunur:

$$\overline{i_{kT}^2} = 4kTG_{\Sigma}\Delta f, \quad (11)$$

burada:

$$G_{\Sigma} = \frac{1}{R_{\Sigma}} = \left(\frac{1}{R_G}\right) + \left(\frac{1}{R_Y}\right) + \left(\frac{1}{R_K}\right).$$

Nəticə olaraq onu deyə bilərik ki, Naykvist düsturu ya küy tezliyində, ya da baxılan spektral diapazonda yəni, $hf \ll kT$ olduqda (burada, h – Plank sabiti; k – isə Bolsman sabitidir) istilik hərəkətinin kT enerjisi istilik şüalanması kvantının hf enerjisindən böyük olduqda doğrudur. Optik tezliklərə kimi bütün radiodiapazonda bu münasibət doğru olacaqdır. Həqiqətən də, yalnız $f = 10^{13}$ Hz ($\lambda = 30$ mkm) tezliyində kvantın hf enerjisi dərəcəyə görə kT kəmiyyətinə bərabər olacaqdır ($T = 300$ K üçün).

- | | |
|--|--|
| <p>[1] <i>E.Ə. Kərimov, S.N. Musayeva.</i> Şottki çəpərli fotoqəbuledicilərin küyləri. Fizika, volume XXIV, №1, section: Az, 2018, March, s. 31-36.</p> <p>[2] <i>V.П. Драгунов, И.Т. Неизвестный, В.А. Гридчин.</i> Основы нанoeлектроники. - м" 2006.</p> <p>[3] <i>И.П. Степаненко.</i> Основы микроэлектроники. - М.; СПб.: Лаб. баз. знаний «Невский Диалект», физматлит, 2001.</p> | <p>[4] <i>А.Н. Пухтин.</i> Оптическая и квантовая электроника. - М.: Высшая школа, 2001.</p> <p>[5] <i>Е.А. Керимов, S.N. Musayeva.</i> Russian Microelectronics, 2017, vol. 46, No. 5, pp. 329–333.</p> |
|--|--|

E.A.Kerimov

METHODS OF NOISE DESCRIPTION IN NANOELECTRONIC DEVICES

The physical processes which are considered at study of electronic devices are designated as deterministic ones, though in fact the different random factors, causing the current fluctuations and voltages in device circuits, influence on these processes. The voltage fluctuations on outputs of electronic devices are usually called noises. All electronic devices have noises and they are caused by random nature of current carrier movement inside electronic devices. The noises are often factor limiting the electronic device characteristics, in particular, their sensitivity. Sometimes, the noise can be used for investigation of electric characteristics of the system itself.

Э.А. Керимов

МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ ШУМОВ В НАНОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

Физические процессы, которые были рассмотрены при изучении электронных приборов, считались детерминированными, хотя на самом деле на эти процессы оказывают влияние различные случайные факторы, вызывающие флуктуации токов и напряжений в цепях приборов. Флуктуации напряжения на выводах электронных приборов и устройств обычно называются шумами. Шумы внутренне присущи всем электронным приборам, и они обусловлены случайным характером движения носителей заряда внутри электронных приборов. Шумы часто являются фактором, накладывающим ограничения на характеристики электронных устройств, в частности, на их чувствительность. Иногда шум можно использовать как средство для исследования электрических характеристик самой системы.

Qəbul olunma tarixi: 22.09.2020