

НАМАЛЯВАНЕ НА ШУМОВЕТЕ В ЕЛЕКТРОМЕТРИЧНИТЕ ТОКОВИ ИЗМЕРВАНИЯ

Димитър ТОДОРОВ

* Технически университет – София, София 1000, България, бул. “Кл. Охридски”
No. 8, Бл. 1, E-mail: dgt@tu-sofia.bg

Abstract: This article discusses the basic approaches when building electrometric devices. Discussed are the possible noise sources in measuring circuits. Discuss the physical reasons for their occurrence and their ways for reduction. Defined are the basic principles for the construction of the measuring devices to reduce noise in the electrometric current measurements.

Keywords: electrometric devices, noise, measuring circuits, current measurements

Основен фактор при реализирането на високочувствителни измервателни процедури на физични величини и ограничаващ чувствителността на измервателните процедури са шумовете който се наслагват в измервателния тракт и във веригите от измервателния обект до момента на цифровото преобразуване на сигнала. В така образуваната измервателната верига могат да се обособят два обобщени клона. Единият клон е веригата образувана от измервателния обект и свързващи веригите до входния преобразувател на измервателя. Другият клон на веригата е от входния преобразувател до преобразувателя на аналоговата информация в цифров вид (ADC).

Докато първата верига е строго специфична за всяка измервателна процедура и зависи от много външни фактори, то втората характеризира свойствата на самия измервател и неговата разрешаваща способност. Ограничението за самия измервател в разрешаващата му способност в крайна сметка се определя от това какво е нивото на шума генерирано в неговите вериги и по-специално от шума в първото му стъпало което се определя от формулировката на Фиркс [2].

В [1,2,4] е направен обзор на почти всички възможни източниците на шум в електроните вериги. породени в пасивните и активните компоненти от който са изградени, както и външните фактори който оказват влияние върху тях.

В настоящата статия е направен анализ на крайните възможностите за намаляване на „фликер” и взривните шумове в електрометричните преобразуватели на ток с цел повишаване на тяхната чувствителност и разрешаваща способност.

Характерна особеност на тези измерватели е високоомността на измервателните вериги (от порядъка на $G\Omega$ и $T\Omega$) който дори с минимални паразитни капацитети (части от pF) ограничават горната измервателна честотна лента в обхвата до 1kHz. Именно в тази честотна област се проявяват „фликер” и „взривните” шумове притежаващи спектрална плътност многократно по-голяма от тази на „белия” шум.

Анализа извършен в [4] дава категорично потвърждение, че за намаляване на шума в усилвателните стъпала е по-удачно да се използват активни прибори с p-n преход отколкото MOSFET. Особено внимание трябва да се обърне на факта, че шумовите съставки трябва да се разглеждат съвместно с постояннотоковия дрейф.

Всеки опит посредством външни вериги да се намали или компенсира дрейфа на входното стъпало посредством външни компенсиращи вериги или обратни връзки, само принципно увеличава общия шум и главно тези със „фликер” и „взривен” шум заради допълнително добавените елементи.

Намаляването на относителния дял на спектралната на мощностите на „фликер” и „взривния” шум в електрометричните усилватели е принципно възможно при изграждането на входните им стъпала с прибори използващи управляващ p-n преход. В такъв вид прибори горепосочените спектрални плътности са с много по-ниски стойности, в обхвата до 1kHz и се генерират в областта на пространствения заряд на p-n прехода.

По-нататъшното намаляване на спектралната плътност на „фликер” и „взривния” шум е възможно посредством намаляване на областта на пространствен заряд в обратно поляризираните p-n преходи. Това принципно е възможно да се извърши в две насоки.

Едната е колкото е възможно по-голяма миниатюризация на градивните структури което е направление в наноелектрониката и молетрониката и се определя от достиженията на съвременните технологии.

Другата насока е принципна и е свързана с възможността поляризацията на p-n преходите да се сведе до до възможния минимум до този на термодинамичното равновесие. Това е принципно възможно и този минимум се постига когато p-n преходите в „активния” прибор работят с нулево преднапрежение. С намаляването на преднапрежението върху обратно поляризирания „активен” p-n преход се постига намаляване на спектралната плътност на „взривния” и „шотки” шум. Практически оптимално възможно намаляване се постига за работни поляризиращи преднапрежения по-малки от 20 mV, при което собствените „фликер” и „взривни” шумове се свеждат до нивото на „белия” шум и тяхното влияние практически може да се пренебрегне.

Принципно теоремата на Найкуист [Ван дер Зил] в нейната нискочестотна форма е справедлива за каквото и да е прибор и се интерпретира като

съпротивление, независимо от неговата природа, при условие че се намира в термодинамично равновесие. За p-n преход активиран с нулево преднапрежение и подържан при температура θ може да се разглежда като шумово съпротивление $R_{p-n}=dV/dI$ имащо същата температура.

За p-n преход гейт-сорс на JFET транзистор поляризиран в напржителния диапазон $\pm 10\text{mV}$ при 300°K стойността на $R_{p-n}=1.5T\Omega$ с еквивалентен шумов ток генериран от p-n прехода е $\overline{i_n^2} = 0.106 fA / \sqrt{Hz}$

Въз основа на горе изложения анализ за принципно намаляване на шумовата мощност посредством намаляване поляризиращите напрежения върху използваните полупроводникови прибори, по специално на тези в първото усилвателно стъпало и съобразявайки се с работните честотни ленти на електрометричните усилватели е препоръчителна структура на изграждане по принципа на МДМ.

Използването на зависимостта на промяната на бариерния капацитет на p-n преход от приложеното комплексно напрежение върху него в областта под 10mV за извършване на двустранна балансна модулация на променливо напрежение с постояннотокков сигнал, позволява във входната верига на усилвателя да се работи практически при минимално минимално постояннотокково преднапрежение върху модулиращия елемент (p-n прехода), определен главно от коефициента на усилване на променливотоковия усилвател в МДМ веригата.

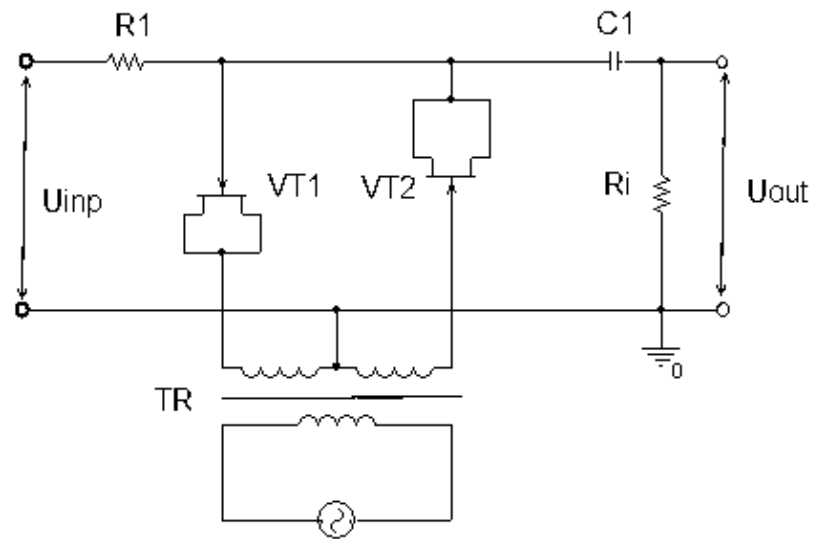
По този начин се намаляват до възможния практически минимум спектралните плътности на мощностите на шумовете още в първото стъпало, определящо шумовите качества в съответствие с формулировката на Фрис.

Същевременно с това още в първото стъпало се транслира работната честотна лента в областта на по-високите честоти . Пренасянето на честотната лента на сигнала в в областта на по-високите честоти (над 100kHz) позволява усилването на сигнала да се извършва в областта на типично действие на „белия” шум, там където влиянието на „фликер” и „взривните” шумове е съизмеримо и е под нивото на „белия” шум и като цяло да се минимизира паразитната шумовата мощност. Допълнителни намаляване на шума в променливотоковия тракт може да се постигне при използване на лентова филтрация за честотата на модулирания сигнал.

Последващото синхронно детектиране на получения променливотоков сигнал с честотата на модулиращия сигнал за възтановяване на сигнала, допълнително намалява шумовите компоненти до нива на общия шум определен честотната лента на лентовия филтър и синхронния детектор[3].

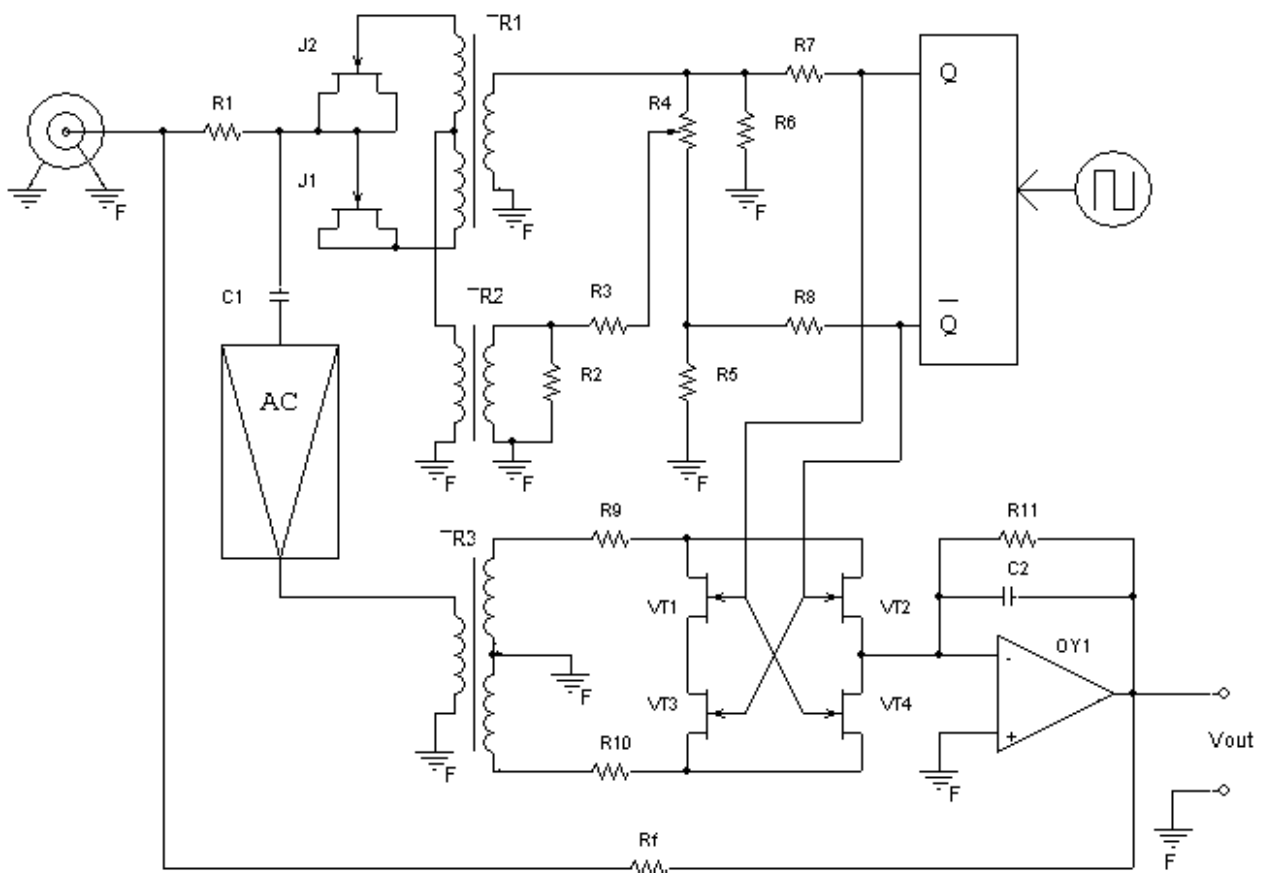
Въз основа на горе изложения анализ е изграден електрометричен усилвател показан на фиг.1, при който входното стъпало е реализирано на

принципа на импедансен мост реализиран с използването на вариаканните свойства на фабрично изграден сдвоени JFET транзистори от две съседни структури от една пластина.



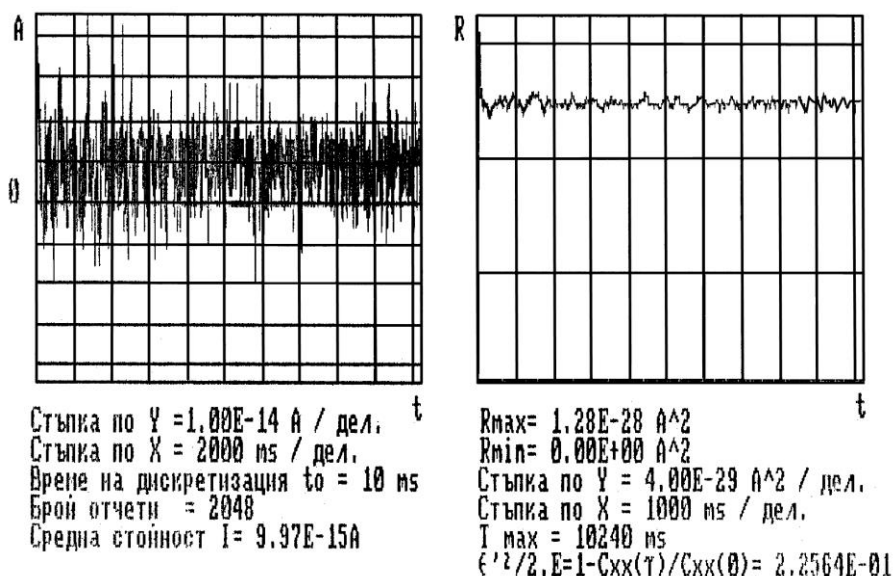
Фиг.1. Входното стъпало е реализирано на принципа на импедансен мост.

Цялостната структурна схема на електрометричен I-V преобразувател изграден въз основа на описаните по-горе принципи е показана на фиг.2

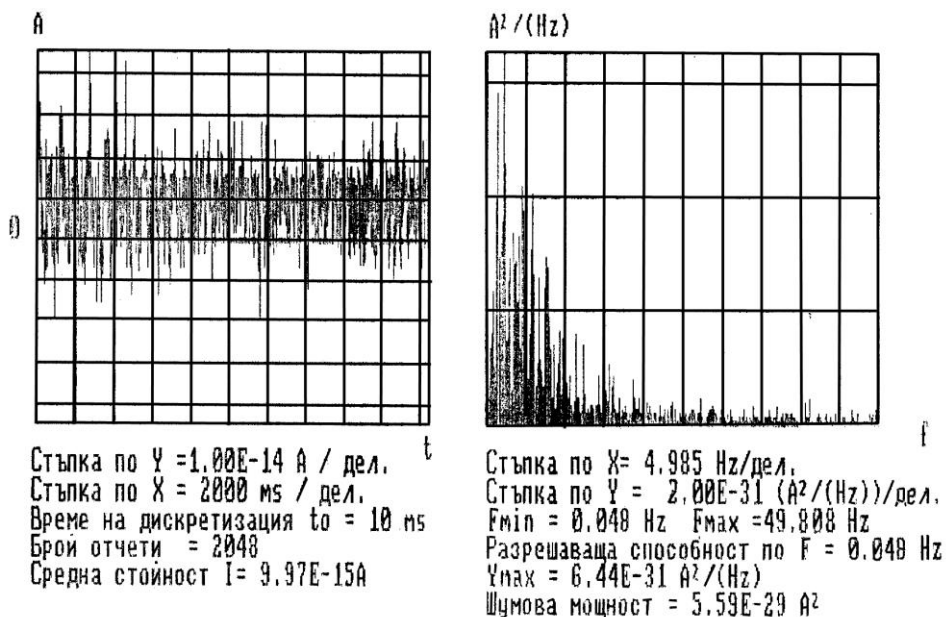


Фиг.2. Електрометричен I-V преобразувател.

За балансиране на производствените толеранси на сдвоеня JFET транзистор и трансформатора TR1 и пълно симетризиране на импеданския мост се прилага дебалансираща променливотокова съставна определена от R4 и атакуваща индуктивното рамо на моста. Усилването на получения след импеданския мост променливотоков сигнал причинен от неговия дебаланс вследствие входната величина се извършва от високочестотния тесноленто АС усилвател. Възстановяването на сигнала се извършва посредством синхронно детектиране от VT1-VT4 с последваща филтрация от ОУ1. Отрицателната обратна връзка определяща измервателния обхват се затваря от високоомния резистор Rf.



Фиг.3. Изходен сигнал от I-V преобразувателя и неговата автокорелационна функция.



Фиг.4. Изходен сигнал от I-V преобразувателя и неговата спектрална характеристика.

Постигнатите резултати са илюстрирани на фиг.3 и фиг.4 където са показани изходния сигнал от I-V преобразувателя при измерване на калибрационен ток 10fA, неговата спектрална и автокорелационна характеристика. От автокорелационната функция на изходния сигнал проличава липсата на „брумови” компоненти в изходния сигнал, съсредоточаването на мощността на шумовите компоненти в честотния диапазон под 10 Hz с характеристика от тип $1/f^2$ отразява влиянието на компонентите на взривния шум генерирани главно във входната верига.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направен е анализ на физическите възможности, ограниченията и пътищата за подобряване на шумовите качества на електрометричен I-V преобразувател.

Въз основа на анализа за възможните пътища за намаляване на шумовите компоненти в усилвателните вериги е синтезирано входно стъпало на електрометричен I-V преобразувател, използващ вариационните свойства на фабрично сдвоен JFET транзистор.

Постигната е разрешаваща способност от няколко fA с ограничаване спектъра на собствената шумова мощност и са показани постигнатите резултати.

Резултатите в настоящата статия са във връзка с работата по проект ДФНИ-И01/99

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ван дер Зил А. „Шумы при измерениях” М.: Мир, 1979
- [2] Букинген И.; „Шум в електронних приборах и системах”, М.Мир 1986.
- [3] J Max; “Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques”; Paris 1982
- [4] Robinson F. N. H, “Noise and Fluctuations in Electronic Devices and Circuits” Clarendon Press, Oxford, 1974