



ОТЧЕТ

НАЦИОНАЛНА ПРОГРАМА „МЛАДИ УЧЕНИ И ПОСТДОКТОРАНТИ - 2“

Тема на проекта: **Високоэффективни радиочестотни усилватели**

Факултет: **Електротехника и електроника**

Постдокторант: **гл. ас. д-р инж. Мирослав Бориславов Томов**

Период на отчитане: **от 15.06.2023 г. до 14.12.2023 г.**

1. Актуалност на научното изследване и прилагане на нови решения или нови методически подходи:

Безжичните комуникации безспорно са едни от най-търсените и най-динамично усъвършенствани телекомуникационни технологии. Клетъчната безжична комуникационна индустрия доказва огромното си развитие през последните години с повече от 6 милиарда абонати на безжични услуги в света.

Тема на проекта са високоэффективните мощни радиочестотни усилватели.

Изследването е фокусирано върху непосредственото влияние на промените в някои параметри на елементите, изграждащи усилвателя върху неговите качествени показатели, както и симулационното и експериментално потвърждаване на теоретично изведените зависимости между тях.

Методите за изследване са обособени в три етапа- теоретични, симулационни и физически, и обхващат зависимостите на параметрите, характеризиращи реализацията на отделни модели.

Целта на изследването е да бъдат проучени възможностите за подобряване енергийните показатели на високоэффективен радиочестотен усилвател работещ в клас F_{∞} като крайно стъпало за източник на високочестотна енергия в HF лента, както и да бъдат потвърдени целесъобразността и потенциала на приложението на този специфичен ключов режим.

Актуалността на темата е и в това, че тя е насочена освен към нови теоретични разработки за анализиране и изследване на загубите, обусловени от нежелателните явления в усилвателя, така също и към създаване на систематизирани инженерни методики за приложно качествено проектиране на високоэффективни усилватели в оптимален режим за подобряване качеството на мобилните комуникации.

В днешно време основният дял на покритие на мобилните комуникации се поддържа от системи от трето поколение. Въпреки че успяват да осигурят само до около 2 Mbps, те все още покриват практически 100% от мрежите на всички доставчици. 3G все още е основната технология за гласови услуги, пренасяйки над 60% от този трафик. Следващият дял на покритие принадлежи на LTE и чисто 4-то поколение, а последният дял на обема принадлежи на 5G и на системите от 2-ро поколение (чието развитие е спряно, но те все още могат да се използват в много страни, когато е необходимо или когато няма друга опция). 4G технологията поддържа максимална скорост на обмен на данни до 100 Mbps при честотна лента от 20 MHz. 4G достъпът до данни е няколко пъти по-бърз от 3G, тъй като архитектурата му е специално

адаптирана за бърз трансфер на данни, което за потребителите означава по-високи скорости и интерактивни услуги. Системите 5G са актуални в днешно време и тяхното развитие е проектирано да осигурява много високи скорости на трансфер на данни от 5–250 Mbit/s. [1, 2] 5G технологията осигурява скорост на трафик на изтегляне в Gbit/s диапазон, сравнима с тази при пренос на данни по оптичен или коаксиален кабел. Проблемът е, че тези мрежи няма да бъдат целево развивани в рядко населени райони – села и вилни зони. Към днешна дата реалността показва, че дори 4G мрежите са крайно недоразвити в тези райони.

Поради по-високата им цена, плановете на доставчиците на мобилни услуги са да се разположат 4G и 5G базови станции, само в гъста градска среда и райони, където се събират тълпи от хора, като например спортни стадиони и конгресни центрове. Посочените скорости са тези, постигнати при реални тестове през 2022 г. и се очаква скоростите да се увеличат още по време на внедряването им.

Настоящото изследване показва и анализира някои практически резултати свързани с разработване и изследване на локална усилвателна система, която е предназначена за приемане, усилване и локално разпространение на LTE и 4G сигнали за радиочестотно покритие на селска къща с двор, разположени на сравнително малка площ (около 1 дка) [2], където наличният сигнал за 4G услуга е много слаб и практически неизползваем.

Основните изисквания към мобилните комуникационни системи, са висока скорост на данни, висока мобилност и безпроблемно покритие. Обикновено е трудно да се реализира една единствена система, която да отговаря на всички понякога противоречиви изисквания. Някои системи могат да осигурят високи скорости на трафик на данни, а други са проектирани да поддържат висока мобилност и широко покритие на услугата.

2. Изпълнение на поставените цели и задачи:

Поставената цел е да бъдат изследвани процесите в мощните радиочестотни усилватели при оптимални и критични режими на работа от гледна точка на тяхната енергийна ефективност при някои специфични приложения.

За постигане на зададената цел са поставени следните задачи:

- Да бъде синтезиран математически модел за аналитично изследване на някои характерни режими на работа на радиочестотните усилватели.
- Да бъде дефиниран математически критерий за сравнение на радиочестотни усилватели по ефективност и качество на преобразуването на сигнала.
- Да бъде синтезиран прецизен симулационен модел, чиято реализация е базирана на зададения математически модел.
- Да бъде симулационно и експериментално установено кои от параметрите на електронната схема и режимните параметри на усилвателя имат влияние върху тези два основни качествени показателя и колко значимо е то на фона на общата динамика на процесите.
- Да бъде симулационно и експериментално разработена и изследвана локална усилвателна система, която е предназначена за приемане, усилване и локално разпространение на LTE и 4G сигнали за радиочестотно покритие в слабо населени райони.

3. Извършена научно-изследователска и експериментална работа:

Обективни сравнителни критерии за оценка ефективността на радиочестотните усилватели.

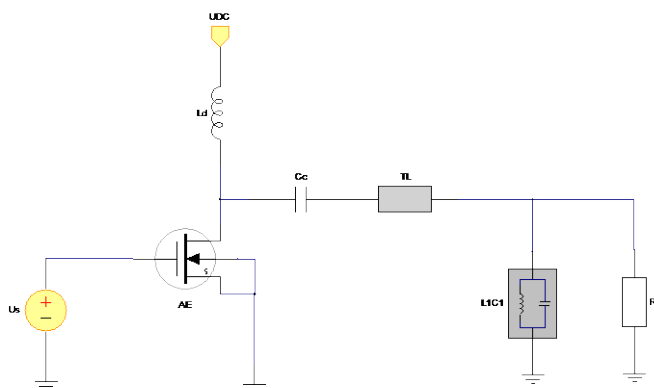
Инженерната задача за обективно сравнение на радиочестотни усилватели различни е достатъчно сложна като се има предвид тяхното огромно разнообразие според конкретното предназначение, за което са проектирани [2]. Необходимо е да бъдат математически изведени обективни критерии за ефективността и качеството, които са независими от абсолютните стойности на съответните параметри на реализираната схема, режим на работа, мощност, работна честота, захранващо напрежение, честотна лента и товар, но дават еднозначна количествена оценка, базирана на функционална зависимост от теоретично обосновани характерни съотношения между тези величини.

Така формулирани математически критерии дават възможност за съставяне на симулационни алгоритми, които оптимизират предварително всяка електронна схема на радиочестотен усилвател още в етапа на проектиране. Те стават особено полезни и практични, когато се приложат при проектиране с помощта на специализиран софтуер [9].

За да бъдат коректно изведени такива критерии е необходима следната последователност от стъпки:

- да бъдат формирани и теоретично обосновани базови съотношения на съответните характерни величини и параметри на усилвателите, които да обособят еднозначни критерии;
- да бъдат формулирани аналитичните математически изрази, описващи съответните физични величини според избрания режим на работа на активния елемент, които участват в съотношенията, подбрани в предишната стъпка;
- въз основа на предходните две стъпки да бъдат изведени математически изрази на формираните обективни сравнителни критерии;

За разработения математически модел, обаче е използвана схемата от фиг.1, в която серийно свързаните трептящи кръгове са заменени с четвърт - вълнова предавателна линия, която създава ефект на безкраен брой серийно свързани паралелни трептящи кръгове, които пропускат нечетните хармоници с номера до безкрайност [25]. Тази схема съответства в пълна степен на универсалния математически подход, заложен в представянето на изходния сигнал във вида на тригонометричен ред на Фурие.



Фиг. 1. Принципна схема на усилвателно стъпало за режим клас F с четвърт - вълнова предавателна линия в товарната верига

Ефективната стойност на напрежението дрейн-сорс на усилвател клас F с нечетни хармоници в изходната верига в съответствие с разлагането в ред на Фурие има вида:

$$U_{DS} = U_{DC} - U_m \cos \omega_o t + \sum_{n=3,5,7, \dots}^{\infty} U_{mn} \cos n \omega_o t ,$$

а ефективната стойност на дрейновия ток е:

$$I_D = I_{DC} + I_m \cos \omega_o t + \sum_{n=2,4,6, \dots}^{\infty} I_{mn} \cos n \omega_o t ,$$

Напрежението дрейн-сорс на усилвател клас F с четни хармоници в изходната верига в съответствие с разлагането по Фурие има вида:

$$U_{DS} = U_{DC} - U_m \cos \omega_o t + \sum_{n=2,4,6, \dots}^{\infty} U_{mn} \cos n \omega_o t ,$$

а дрейновият ток е:

$$I_D = I_{DC} + I_m \cos \omega_o t + \sum_{n=3,5,7, \dots}^{\infty} I_{mn} \cos n \omega_o t ,$$

Според избраната теоретична концепция, тази конфигурация на наличните хармонични съставлящи на напрежението и тока в товарната верига осигурява условието мощността на всеки един от висшите хармоници винаги да бъде 0 тъй като или напрежението е 0, или токът е 0 за всеки един от тях. Поради това и сумата от тези мощности, която представлява загубната мощност, ще бъде 0. Теоретичният коефициент на полезно действие ще бъде 100%. Това би се получило и на практика при две условия: 1. Ако активният елемент е в състояние да работи като идеален ключ – т.е. да преминава безкрайно бързо от наситено в отпушено състояние и обратно с честотата на усилвания сигнал и 2. Ако бъде постигнато перфектното ъглово разминаване по фаза между дрейновия ток и напрежението дрейн-сорс. Първото условие на практика е невъзможно поради инертността на полупроводника, изграждащ всеки транзистор. Второто теоретично се постига чрез представения по-долу математически модел, който числено да подсили желаното дефазирание на двете величини, чието произведение формира загубната мощност в транзистора. На практика изпълнението на второто условие е силно зависимо от първото и поради ограниченото бързодействие процесите в полупроводника, превключването между двете му крайни състояния отнема време за насищане и време за пълно отпушване, които макар и много малки, имат ненулеви стойности. Поради този факт става неизбежно да се получат „застъпвания“ по фаза между напрежението дрейн-сорс и дрейновия ток. Общата площ на тези застъпвания представлява загубната мощност на транзистора в ключов режим. Ето защо практическото неизпълнение (по обективни причини) на теоретично зададените условия води до известен спад на реалния дрейнов коефициент на полезно действие от теоретично максималния.

Във всеки случай, при правилен подбор на активния елемент според честотните му свойства и желаната изходна мощност, на практика бързината на превключване може да бъде достатъчно голяма, така че електронният (дрейновият) коефициент на полезно действие да има реална стойност от 95-99%.

Следният обобщен израз по Фурие описва съвсем прецизно вълновата форма на дрейновия ток:

$$i_D = I_{Dm} \left[\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \cos \omega_o t + \frac{2}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\cos\left(\frac{n\pi}{2}\right)}{1-n^2} \cos n \omega_o t \right],$$

който след като бъде развит (и ограничен) до желания брой хармонични съставки, придобива вида:

$$i_D = I_{Dm} \left[\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \cos \omega_o t + \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega_o t - \frac{2}{15\pi} \cos 4\omega_o t + \frac{2}{35\pi} \cos 6\omega_o t + \dots \right],$$

от където се вижда, че дрейновият ток съдържа постояннотоковата съставка, основния хармоник и само четните хармонични съставки. В същото време, напрежението дрейн-сорс (идеализирано) е правоъгълна вълна, която също съгласно разлагането по Фурие има вида:

$$u_{DS} = U_{DC} \left[1 + \frac{4}{\pi} \cos \omega_o t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_o t + \frac{4}{5\pi} \cos 5\omega_o t - \frac{4}{7\pi} \cos 7\omega_o t + \dots \right],$$

т.е. напрежението дрейн-сорс съдържа постояннотоковата съставка, основния хармоник и само нечетните хармонични съставки.

Спектрален баланс на мощностите при режим клас F.

Тъй като дрейновият ток и напрежението дрейн-сорс са описани във вида на тригонометрични редове по Фурие, за коректното аналитично представяне на мощностите в полихармоничния режим клас F е използвано правилото на Коши за умножение на редове. Пълната загубна мощност в транзистора поради обичайно сложната форма на дрейновия ток и напрежението дрейн сорс е съвкупност от мощностите - произведение на отделните хармонични съставлящи на токовете и напреженията през транзистора. Съгласно правилото на Коши произведението на два сходящи реда с произволни членове е също сходящ ред, членовете на който представляват произведения от членовете на двата първични реда и се подреждат по възходящ ред на сбора на индексите на отделните членове от първичните редове, участващи в съответното произведение.

Както бе посочено по-горе, режим клас A е избран поради доказаната линейност на изходната си волт-амперна характеристика и високото качество на изходния сигнал. Той се описва със следния опростен изчислителен модел за практически коректно балансиране на мощностите:

Поради това тя може да бъде пресметната съвсем точно чрез ефективните стойности на дрейновия ток и напрежението дрейн-сорс:

$$P_L = I_D U_{DS} = \frac{I_{Dm} U_{DSm}}{2},$$

При усилвателите, работещи в режими клас B, AB и C само дрейновият ток се описва математически като ред на Фурие, а напрежението дрейн-сорс в общия случай с висока точност се приема за монохармонична периодична функция - (ко)синусоида, поради което като обобщен аналитичен израз за загубната мощност ще получим произведението на монохармоничната функция с всеки от членовете на реда по Фурие, описващ спектъра на дрейновия ток [74]. Съгласно правилото на Коши и използвайки изразите (102) и (103), общият аналитичен вид на сумарната загубна мощност в транзистора, работещ като източник на ток в режими клас B, AB и C е:

$$p_L(\omega t) = I_{DC} U_{DC} \left[\left(I - \frac{U_m}{U_{DC}} \right) \frac{\pi(1 - \cos\theta)}{\sin\theta - \theta \cos\theta} \cos \omega t + \left(I - \frac{U_m}{U_{DC}} \right) \frac{\pi(1 - \cos\theta)}{\theta - \sin\theta \cos\theta} \cos^2 \omega t \right] + \left(I - \frac{U_m}{U_{DC}} \right) \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\pi n(n^2 - 1)(1 - \cos\theta)}{2 \sin n\theta \cos\theta - 2n \sin\theta \cos n\theta} \cos n\omega t \cos \omega t$$

В случаите, когато работната честота се отличава от резонансната, се получава дефазироване φ между дрейновия ток и напрежението дрейн-сорс, при което ефективната стойност на мощността отдадена на дрейна има вида:

$$P_{DS} = \frac{1}{2} I_D U_{DS} \cos \varphi,$$

Ефективната стойност на мощността, управляваща гейта е:

$$P_G = \frac{1}{2} I_{Gm} U_{GSm} \cos \varphi_G = \frac{U_{GSm}^2}{2R} \cos \varphi_G ,$$

Коефициенти на полезно действие

Дрейновият коефициент на полезно действие на радиочестотен усилвател на мощност клас А за основната честота е:

$$\eta_D = \frac{P_o}{P_{DC}} = \frac{1}{2} \left(\frac{I_m}{I_{DC}} \right) \left(\frac{U_m}{U_{DC}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{U_m}{U_{DC}} \right)^2$$

Теоретичният, абсолютно максимален дрейнов коефициент на полезно действие на мощен радиочестотен усилвател клас А за основната честота е:

$$\eta_{D, max} = \frac{1}{2} \left(\frac{U_{m, max}}{U_{DC}} \right) = 0.5$$

Действителният максимален дрейнов коефициент на полезно действие е:

$$\eta_{D, max} = \frac{U_{m, max}}{2U_{DC}} = \frac{U_{DC} - U_{DS, min}}{2U_{DC}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{U_{DS, min}}{U_{DC}} \right) < 0.5$$

Пълният коефициент на полезно действие на радиочестотен усилвател на мощност клас Е за основната честота при коефициент на запълване на управляващия импулс 0.5 се дава с израза:

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_L} = \left(1 + \frac{8R_{rLc}}{(\pi^2 + 4)R} + \frac{(\pi^2 + 28)r_{DS}}{2(\pi^2 + 4)R} + \frac{(\pi^2 - 4)r_{C1}}{2(\pi^2 + 4)R} + \frac{r_L + r_C}{R} + \frac{(2\pi f t_f)^2}{12} \right)^{-1}$$

Разширеният коефициент на полезно действие на мощен радиочестотен усилвател клас Е за основната честота е:

$$\eta_{PAE} = \frac{P_o - P_G}{P_{DC}} = \frac{P_o - P_G}{P_o + P_L}$$

4. Получени крайни резултати:

Сравнителни критерии за обективна оценка на ефективността на мощен радиочестотен усилвател.

Обективното сравняване на радиочестотни усилватели, които са безкрайно разнообразни по своите параметри и предназначение е трудна инженерна задача. За успешното ѝ решаване е необходимо да бъдат дефинирани обективни критерии, които позволяват да бъдат числено оценени качествено и количествено схемата и режимът на работа на усилвателя, без тази оценка да зависи от абсолютните стойности на тока, напрежението, мощността и параметрите на активните и пасивните елементи в електронната схема. Например, това че коефициентът на полезно действие на един усилвател е по-малък от този на друг усилвател при даден режим на работа, но при по-голяма изходна мощност, не потвърждава категорично, че вторият усилвател е „по-добър“.

С достатъчно висока за инженерната практика точност могат да бъдат въведени нормирани по определен начин критерии, които позволяват еднозначно да бъде оценено в числен вид качеството на схемата и режима на работа, което да покаже нагледно и

недвусмислено колко един усилвател е по-добър от друг [2]. Въз основа на тези аналитични резултати, може да бъде направен цялостен фактически обоснован сравнителен анализ между отделни групи мощни високоефективни усилватели или между конкретни усилватели в рамките на дадена група, обединяваща ги по определени признаци. Числените стойности на подобни критерии могат да бъдат предварително разчетени и представени във вид на таблици и графики за всички представляващи интерес схеми и техните режими на работа. Това позволява нагледно да бъде определено кои схеми и режими на работа са най-подходящи при зададените изходни условия. Нещо повече, обичайните разчетни величини (мощност, КПД и др.) могат да бъдат определени по избрани оптимални стойности на критериите и паспортните данни на активните елементи с помощта на сравнително прости инженерни формули, чрез които критериите да бъдат денормирани.

При решение на оптимизационната задача, на всеки избран работен режим трябва да бъде приписана конкретна числена стойност според съответния критерий, което да осигури математическа прецизност на понятието „работен режим“. Прието е работният режим на активния елемент, представен чрез система диференциални уравнения от първи ред, описващи процесите в радиочестотния усилвател при превключване в различни участъци на времевата ос, да са напълно определени от формата на тока и напрежението (т.е. от съотношенията на съответните величини, които я дефинират), а да не зависят от абсолютните им стойности. Вследствие на това, всеки режим на периодични трептения има определени съотношения между максималните и ефективните (усреднените) стойности на напрежението и тока под формата на нормиращи коефициенти, които характеризират формата на тези величини. В много случаи за идентифициране на работния режим са напълно достатъчни добре подбрани двойки подобни нормирани величини.

Сравнителен критерий по мощност

Добре аргументиран сравнителен критерий по мощност при зададени ограничения на максималните стойности на тока и напрежението е предложен от [2]. Изходната мощност се определя от максималните стойности на напрежението и тока, както и от параметрите на режима на работа на усилвателя:

$$k_p = \frac{P_o}{P_p} = 4\eta_D \left(\frac{U_{DC}}{u_{max}} \right) \left(\frac{I_{DC}}{i_{max}} \right),$$

Сравнителен критерий по икономичност (по коефициент на полезно действие)

Този критерий е разработен приоритетно за обективна оценка на ключовите режими на активния елемент по икономичност. Причината за това е, че при тези режими дрейновият коефициент на полезно действие винаги е много висок и разликите между отделните схемни конфигурации са от много малък порядък, което затруднява еднозначното им сравнение по този показател [2].

В общ случай загубите на електронен (дрейнов) КПД нарастват с увеличаване на изходната мощност, отдадена от активния елемент (при $U_{DSmax} = const.$). Поради това е целесъобразно да бъдат разглеждани загубите на КПД на единица изходна мощност, т.е.:

$$\overline{\Delta\eta_e} = \frac{\Delta\eta_e}{P_o}$$

Критерият по икономичност трябва да бъде безразмерна величина, поради което се налага да бъде нормиран по определен начин. За тази цел се дефинира аналогично

съотношение, което се изчислява за избран подходящ еталонен режим на работа, при който загубите са минимални или в близка околност на минимума си:

$$k_{\eta} = \frac{\overline{\Delta\eta_{e,pattern}}}{\Delta\eta_e} = k_P \frac{\Delta\eta_{e,pattern}}{\Delta\eta_e}$$

Високоэффективният мощен радиочестотен усилвател се конструира от реални активни елементи и върху неговия коефициент на полезно действие оказват непренебрежимо влияние напрежението на насищане, съпротивлението на насищане, паразитните реактивни елементи и времето на превключване. Тези фактори не позволяват коефициентът на полезно действие практически да достигне теоретичните 100%.

Сравнителен честотен критерий при зададено ограничение по максимално напрежение и максимален ток.

$$k_{\omega} = \frac{U_{max}\omega C_o}{i_{max}}$$

Този критерий показва обективно колко висока може да бъде честотата на усилвания сигнал при едно и също съотношение на максимално допустимите напрежение и ток според каталожните данни на активния елемент [2].

Сравнителен критерий по коефициент на използване на мощността.

Коефициентът на използване на мощността е важен качествен показател на всеки радиочестотен усилвател. За да бъде оценката му универсална въз основа на него е дефиниран сравнителен критерий. Избира се еталонен режим на работа на усилвателя, при който коефициентът на използване на мощността е максимален или в близка околност на максимума. Сравнителният критерий представлява безразмерна величина – съотношение на коефициента на използване при максимален дрейнов коефициент на полезно действие на максималната мощност към еталонния коефициент на използване

$$k_{cP} = \frac{P_{o,max}}{I_{DM} U_{DSM}} 4\eta_D \left(\frac{U_{DC}}{u_{max}}\right) \left(\frac{I_{DC}}{i_{max}}\right),$$

Сравнителен критерий по качество на изходния сигнал

Качеството на изходния сигнал може да бъде оценено чрез сравнителен критерий, който се дефинира като произведение от коефициентите на нелинейни, честотни и фазови изкривявания:

$$k_q = k_d M k_{\varphi} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} P_n^2}}{P_1} \frac{G_U(\omega)}{G_{U_0}} \frac{\varphi(\omega)}{\omega t_d}$$

Първоначално зададените стойности на гравивните елементи са изчислени предварително от докторанта въз основа на описания в предходната глава алгоритъм за проектиране. След сглобяването на схемата във виртуалната среда е зададен желаният ключов режим на работа на транзистора чрез задаване на времеви ограничения. В диалоговия прозорец от са зададени изходни ограничителни условия по ъгъл (време) на проводимост за вкарване на активния елемент в съответния режим клас на работа.

Използвана е възможността да бъде въведен „график“ на продължителността в наносекунди на отпушените и запушени състояния на активния елемент както и ограничения

по максимална амплитуда (ниво) на протичащия в двете състояния сигнал. Това позволява да бъдат подобрени формите на напрежението дрейн-сорс и дрейновия ток, получени в процеса на симулация към така че да бъдат максимално близки до идеалните, заложи в математическия модел.

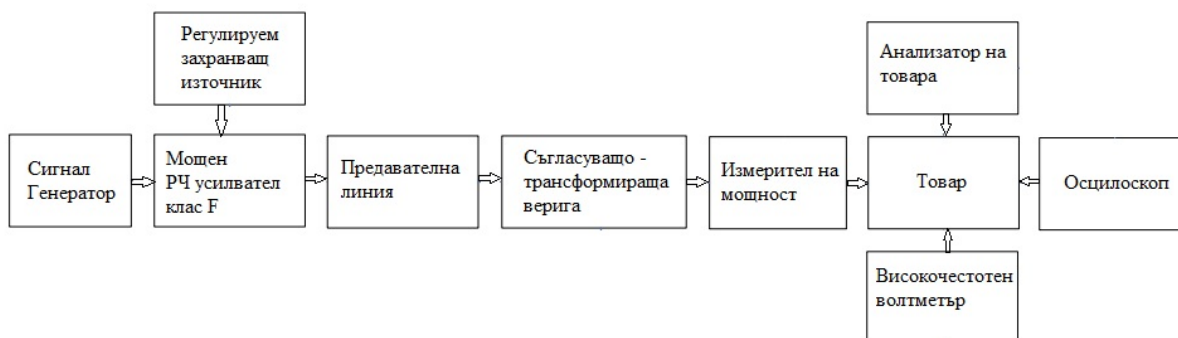
След провеждането на симулацията при така зададения ключов режим, е получена автентичната картина на формите на напрежението дрейн-сорс и на дрейновия ток. Важно е да се отбележи, че за прецизна настройка на избрания работен режим се налага оптимизация в относително тесни толерансни диапазони на изчислените електрически параметри на градивните елементи в схемата, на някои параметри на управляващия сигнал, както и точната стойност на захранващото напрежение.

След оптимизирането за осигуряване на условията за ключов режим на схемата като е постигнато Последователно и детайлно са проведени два типа анализа на избраната усилвателна схема в режим клас F.

Първият детайлен анализ по хармоничен състав на напреженията и токовете (съотв. и на мощностите) практически във всички възли и клонове на еквивалентната електрическа схема.

Алгоритъм за провеждане на експериментално изследване на радиочестотен усилвател.

Изграждане на опитна постановка за експериментално изследване на енергийните и качествените показатели на физически макет на симулационния модел за радиочестотен усилвател клас F. Подбор и подготовка на контролни точки в макета за включване на измервателна апаратура.



Фиг. 2. Блокова схема на опитната постановка

Представената опитна постановка (фиг.2) дава възможност експериментално да се направи качествена оценка на формата на сигналите в схемата на мощен усилвател клас F. Тя позволява да бъдат измерени (пряко или косвено) мощността на входния сигнал P_G , изходната мощност P_o отдавана от усилвателя върху товара R и върховата стойност на напрежението U_{DC} върху дрейна. Коефициентът на усилване по мощност G_P , електронният коефициент на полезно действие η_D , разширеният коефициент на полезно действие η_{PAE} се изчисляват съгласно описания във втора глава математически модел.

От експериментално получените резултати би могла да се направи количествена оценка на влиянието изменението на стойностите на елементите в схемата на мощен усилвател клас F.

Усилвателят клас F показва способността си да преобразува мощността на висшите хармоници във входните и изходните съгласуващи звена в полезна мощност. Хармоничните честоти вероятно биха били преобразувани обратно към основните честота, дължаща се на нелинейност на устройството и повторно принос към товара. Това е едно от основните предимства на мощните усилватели клас F пред другите видове високоефективни усилватели.

С достатъчна за практиката точност, коефициентите на усилване на отделните хармоници се получават чрез измерване и спектрален анализ на избран брой поредни хармонични съставлящи на напрежението, тока и респективно мощността. Точните съотношения между входните и изходните им големини осигуряват необходимото за малка загубна мощност дефазиране φ между дрейновия ток и напрежението дрейн-сорс.

Резултати от изследването на проектираната усилвателна система

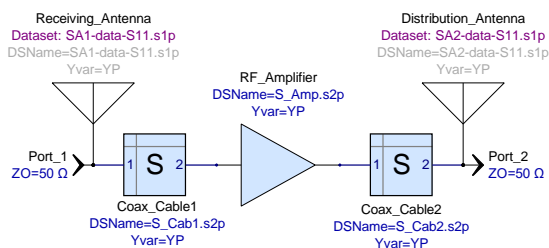
1. Измерване на S-параметрите на компонентите на усилващата система с помощта на NanoVNA-FV2.

Основната цел на измерването е да се събере матрицата с данни на S-параметрите на всеки от компонентите на усилвателната система, за да се подготви точен симулационен модел, за да се осигури максимално съвпадение между реалното и очакваното електромагнитно поведение на усилвателната система.

Измерването на S-параметрите се извършва индивидуално за всеки компонент от първоначалната схема на Фиг.3. [5,9]

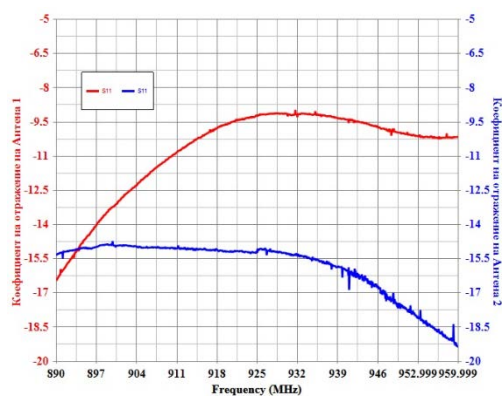
Както приемната антена, така и разпръскващата антена са устройства с един порт, така че коефициентът на отражение S_{11} се измерва и записва [8] във файлов формат *.s1p от софтуерния интерфейс на векторния анализатор:

Първоначалната блокова схема на проектираната система за усилване на RF сигнала е показана на Фиг 3. Компонентите са представени като двуполусни и четириполусни блокове с данни от измерването систематизирани под формата на S-матрица $\|S_{11}, S_{12}; S_{21}, S_{22}\|$.



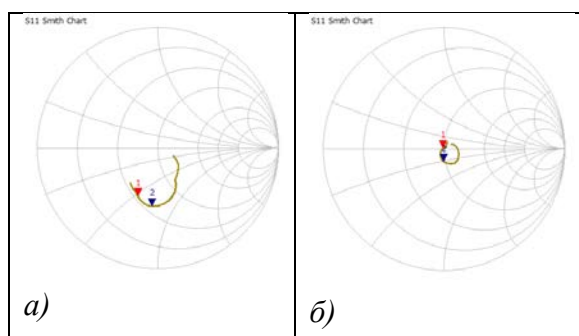
Фиг. 3. Блокова схема на проектираната система за локално усилване на GSM сигнала

На Фиг.4 е представена диаграма на коефициента на отражение S_{11} като функция на честотата на приемната и на разпръскващата антена.



Фиг. 4. Коефициент на отражение S_{11} в приемната антена и в разпръскващата антена

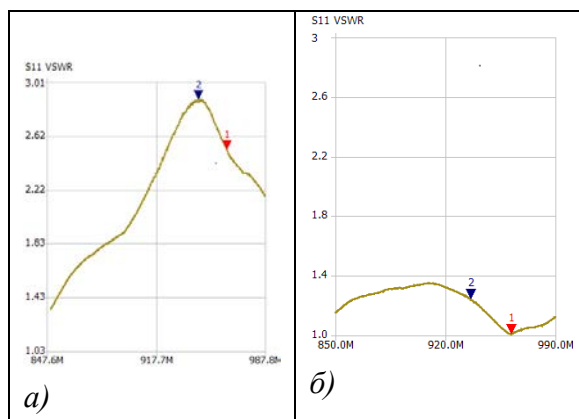
Диаграмата на Смит, снета за двете антени е показана на Фиг.5. [11,12]



Фиг. 5. Диаграма на Смит, снета за:
 а) приемната антена
 б) за разпръскващата антена

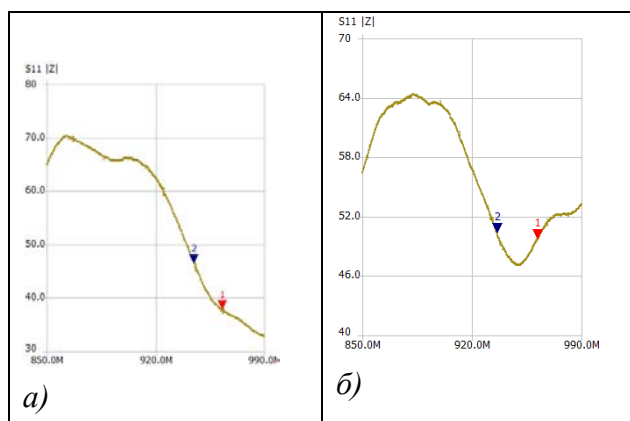
От графиката се вижда, че в рамките на изследваната честотна лента, коефициентът на отражение на разпръскващата антена се движи в много близка околност на центъра на диаграмата на Смит, което значително би улеснило проектирането на съгласуващо импеданса звено.[7, 10]

Останалите непосредствено отчетени от анализатора величини са: коефициент на стояща вълна (Фиг.6),



Фиг. 6. Коефициент на стояща вълна като функция на честотата за:
 а) приемната антена ;
 б) за разпръскващата антена

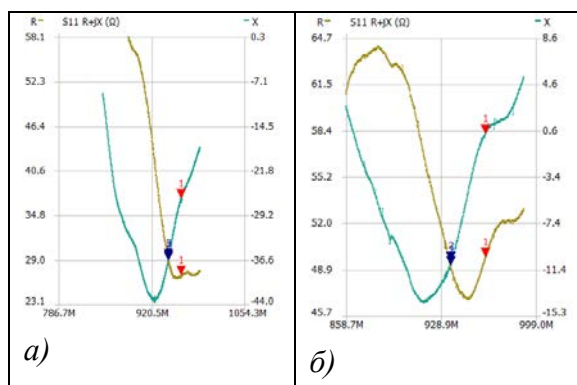
модул на характеристичния импеданс на приемната и разпръскващата антена (фиг.7)



Фиг. 7. Коефициент на стояща вълна за:
 а) приемната антена ;
 б) за разпръскващата антена

$R+jX$ (Фиг.8), фаза на входния сигнал, групово забавяне на входния сигнал, качествен фактор, индуктивност и капацитет на серийно свързан паралелен трептящ кръг.

Данните от измерените величини са използвани в изчисления за оптимизация на двуполусните модели и симулационните резултати, необходими проектиране на съгласуващите импеданса звена.



Фиг. 8. Активната и реактивната съставки на характеристичния импеданс като функция на честотата за: а) приемната антена ;
 б) за разпръскващата антена

RF усилвателят на мощност, както и двата свързващи коаксиални кабела са четириполусници (двупортови модели), така че измерените параметри се записват [8, 11] във файлов формат *.s2p от софтуерния интерфейс векторния мрежов анализатор: S_{11} (S_{22}), S_{21} (S_{12}). Измерването аналогично извежда числови стойности на следните величини: $|S_{11}|$, характеристичен импеданс, $R+jX$, фаза на входния сигнал, групово забавяне на входния сигнал, качествен фактор, индуктивност и капацитет на серийно свързан паралелен трептящ кръг, графично представяне на коефициента на предаване в полярни координати - S_{21} , коефициент на усилване, $|S_{21}|$, фаза на изходния сигнал, групово забавяне на изходния сигнал, сравнение S_{11} & S_{21} (LogMag) и графично представяне на формата на изходния сигнал като функция на времето (TDR).

Заклучение

Представената опитна постановка (фиг.2) дава възможност експериментално да се направи качествена оценка на формата на сигналите в схемата на мощен усилвател клас F. Тя позволява да бъдат измерени (пряко или косвено) мощността на входния сигнал P_G , изходната мощност P_o отдавана от усилвателя върху товара R и върховата стойност на напрежението U_{DC} върху дрейна. Коефициентът на усилване по мощност G_P , електронният коефициент на полезно действие η_D , разширеният коефициент на полезно действие η_{PAE} се изчисляват съгласно описания във втора глава математически модел.

От експериментално получените резултати би могла да се направи количествена оценка на влиянието изменението на стойностите на елементите в схемата на мощен усилвател клас F. Усилвателят клас F показва способността си да преобразува мощността на висшите хармоници във входните и изходните съгласуващи звена в полезна мощност. Хармоничните честоти вероятно биха били преобразувани обратно към основните честота, дължаща се на нелинейност на устройството и повторно принос към товара. Това е едно от основните предимства на мощните усилватели клас F пред другите видове високоефективни усилватели.

С достатъчна за практиката точност, коефициентите на усилване на отделните хармоници се получават чрез измерване и спектрален анализ на избран брой поредни хармонични съставлящи на напрежението, тока и респективно мощността. Точните съотношения между входните и изходните им големини осигуряват необходимото за малка загубна мощност дефазирание φ между дрейновия ток и напрежението дрейн-сорс.

Въз основа на направените измервания и изчисления става ясно, че за да се намалят загубите при преобразуването на сигнала в усилвателната система и да се осигури високоефективно и качествено усилване се налага да бъдат проектирани съгласуващо-трансформиращи импеданса звена между приемната антена и усилвателя, както и между усилвателя и разпръскващата антена. Импедансите на свързващите коаксиални кабели биха могли да бъдат отчетени и „включени“ в параметрите на еквивалентните схеми тези съгласуващи звена.

5. Използване и разпространение/внедряване на научните резултати (прилагат се към отчета):

- публикации, реферирани в Scopus и Web of Science

Научен доклад на тема: “Algorithm of Class F RF Amplifying Stage Design“, представен на Международната научна конференция International Conference on Electronics, Engineering Physics and Earth Science (EEPES, 2023), проведена от 21 до 23 юни 2023 г. в гр. Кавала, Гърция. Докладът е одобрен и очаква публикуване в SCOPUS.

Научен доклад на тема: “Local Area Improvement of GSM Network Coverage“, представен на Международната научна конференция “2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), 979-8-3503-3691-7/23/\$31.00 ©2023 IEEE DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378821, проведена от 23 до 25 ноември 2023 г. в гр. Пловдив. Докладът е одобрен и публикуван в научното списание MDPI, в тематичната секция „Engineering proceedings“.

- други публикации

Научен доклад на тема: “ Distributed GSM Signal Quality Improvement Across 890-960 MHz Band“, представен на Международната научна конференция UNITECH‘ 2023, проведена от 17 до 18 ноември 2023 г. в гр. Габрово. Докладът е одобрен и публикуван.

- патенти и полезни модели

...

Дата: 08.02.2024 г.

Изготвил:

(Гл.ас. д-р инж. М. Томов)