



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „Електротехника и електроника ”

маг. инж. Мирослав Бориславов Томов

**МОЩНИ РАДИОЧЕСТОТНИ УСИЛВАТЕЛИ
С ПОВИШЕНИ ЕНЕРГИЙНИ ПОКАЗАТЕЛИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3. Комуникационна и
компютърна техника

Докторска програма: Комуникационни мрежи и системи

Научни ръководители: доц. д-р инж. Илия Веселинов Неделчев
проф. д-р инж. Станимир Михайлов Садинов

Рецензенти: доц. д-р инж. Кирил Радев Койчев
доц. д-р инж. Боян Димитров Карапенов

Габрово, 2022 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Комуникационна техника и технологии” към факултет „Електротехника и електроника” на Технически университет – Габрово, проведен на 17.03.2022 г.

Дисертационният труд съдържа 144 страници. Научното съдържание е представено в увод и четири глави, и включва 77 фигури, 14 таблици и 251 математически изрази. Цитирани са 186 литературни източника.

Изследванията по дисертационния труд са извършени в катедра „Комуникационна техника и технологии” към факултет „Електротехника и електроника” на Технически университет – Габрово и на територията на гр. Габрово.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на __.__. 2022 г. от __:__ ч. в Заседателна зала, сграда Ректорат на Технически университет – Габрово.

Материалите по защитата са на разположение за интересуващите се в кабинет 3209, корпус №3 на Технически университет – Габрово.

Номерацията на формулите, фигурите, таблиците и цитираната литература в автореферата, съответства на тази в дисертационния труд.

© Мирослав Бориславов Томов – автор, 2022

e-mail: mirtomov@gmail.com

Заглавие: Мощни радиочестотни усилватели с повишени енергийни показатели



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „Електротехника и електроника ”

маг. инж. Мирослав Бориславов Томов

**МОЩНИ РАДИОЧЕСТОТНИ УСИЛВАТЕЛИ
С ПОВИШЕНИ ЕНЕРГИЙНИ ПОКАЗАТЕЛИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3. Комуникационна и
компютърна техника

Докторска програма: Комуникационни мрежи и системи

Научни ръководители: доц. д-р инж. Илия Веселинов Неделчев
проф. д-р инж. Станимир Михайлов Садинов

Рецензенти: доц. д-р инж. Кирил Радев Койчев
доц. д-р инж. Боян Димитров Карапенов

Габрово, 2022 г.

Списък на използваните съкращения

| | |
|------------------------|---|
| AM | Амплитудна модулация |
| CW | Непрекъсната вълна |
| F₃₅₇ | Клас F с филтрация на 3-ти, 5-ти и 7-ми хармоник |
| F_∞ | Клас F с предавателна линия в товарната верига |
| FM | Честотна модулация |
| FSK | Честотна манипулация |
| GaN | Галиев нитрид |
| GMSK | Гаусова манипулация с минимална замяна |
| MOSFET | Метал-оксиден полупроводников полевî транзистор |
| OFDM | Ортогонално мултиплексиране с честотно разделяне |
| PAE | Разширен коефициент на полезно действие |
| PLL | Фазово заключен контур |
| PWM | Широчинно-импулсна модулация |
| QPSK | Квадратурна фазова манипулация |
| QAM | Квадратурна амплитудна модулация |
| SSB | Модулация с една странична лента |
| ZVS | Включване при нулево напрежение на клемите на ключа |
| ZCS | Изключване при нулев ток през ключа |

Списък на използваните символни означения

| | |
|----------------|---|
| P_o | Радиочестотна мощност на изходния полезен сигнал |
| P_{DC} | Постояннотокова (активна) мощност от захранващия източник |
| P_G, P_i | Радиочестотна мощност на входния (управляващия) сигнал |
| P_L | Загубна мощност |
| U_{DC} | Напрежение на захранващия източник |
| $U_{DS, min}$ | Минимално напрежение дрейн-сорс |
| U_{th} | Прагово напрежение на транзистора |
| U_o | Ефективна стойност на изходното радиочестотно напрежение |
| R_{DC} | Активно съпротивление на усилвателя |
| R | Полезен товар |
| r | Сумарно активно съпротивление на градивните елементи |
| R_L | Сумарно активно съпротивление на товарната верига |
| I_{DM} | Максимум на дрейновия ток |
| a_P G_P | Коефициент на усилване по мощност |
| η_D | Електронен (дрейнов) коефициент на полезно действие |
| η_{PAE} | Разширен коефициент на полезно действие |
| η | Пълнен коефициент на полезно действие |
| C_P | Коефициент на използване на мощността |
| \bar{U}_m | Амплитуда, нормирана към напрежението на захранващия източник |
| θ | Ъгъл на проводимост на транзистора. |

А. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

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 високоефективни усилватели в оптимален режим

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е да бъдат изследвани процесите в мощните радиочестотни усилватели при оптимални и критични режими на работа от гледна точка на тяхната енергийна ефективност. За реализирането на формулираната 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.

Методи на изследване

Методите за изследване са обособени в отделните глави, като теоретични, симулационни и физически, и обхващат зависимостите на параметрите, характеризиращи реализацията на отделни модели.

Приложимост

на изследване е 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.

Апробация на дисертационния труд

Резултати от дисертационния труд са докладвани на следните научни форуми:

- Международна научна конференция UNITECH – Габрово, България: 2 публикации през 2016 г., 1 публикация през 2017 г., 1 публикация през 2019 г. и 1 през 2021 г.;
- Научна конференция на Русенския университет “А. Кънчев”, Русе, България, 2016 г., 1 публикация през 2016 г.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд съдържа увод, четири глави, заключение, класификация на приносите по дисертационния труд, списъци на използваните съкращения и символни означения, списък с публикациите по дисертационния труд и използваната литература, в общ обем от 144 страници. Научното съдържание включва 77 фигури, 14 таблици и 251 математически изрази. Цитирани са 186 литературни източника.

Б. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. Анализ на състоянието и съвременното приложение на радиочестотните усилватели

В първа глава е направено проучване на публикувани изследвания, подобрения и сравнителен анализ на практическо приложение на различни класове усилватели, работещи в радиочестотния диапазон. Според режима на работа на активния елемент, мощните радиочестотни усилватели са разделени на две големи групи: като зависим източник на ток или като електронен ключ, превключващ с честотата на носещото трептение.

В заключение на направеното проучване и анализ на състоянието, проблемите и перспективите за качествено проектиране на мощни радиочестотни усилватели е от ключово важно значение да бъде постигнато възможно най-рационално използване на активния елемент по мощност за зададената работна честота и желаната честотна лента. Схемната конфигурация, елементния състав на схемата и режимът на работа се определят според тази цел.

Всички разгледани класове на работа имат своето място при избор за конкретно конструкторско решение според предназначението на радиочестотния усилвател.

Въз основа на направеното проучване анализ на съвременните проблеми, свързани с ефективността на мощните радиочестотни усилватели, представени в глава I и направените изводи, са формулирани целта и задачите пред дисертационния труд, представени по-горе.

ГЛАВА 2. Математически модел за изследване и сравняване на радиочестотни усилватели според енергийната им ефективност

2.1. Теоретична концепция за формиране на 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. 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.

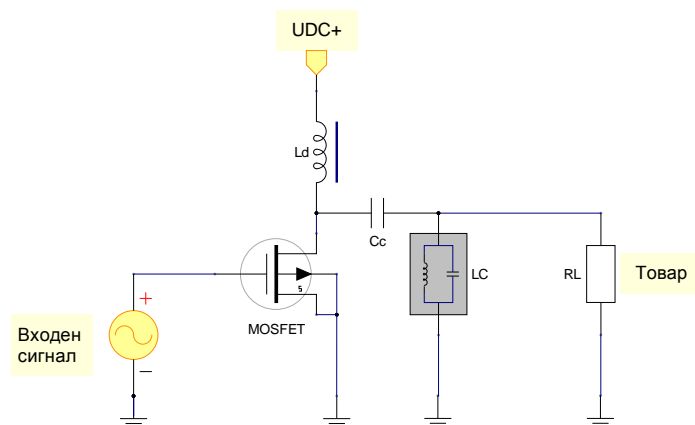
За да бъдат коректно изведени такива критерии е необходима следната последователност от стъпки:

- 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;

2.2. Обобщен математически модел за анализ на режимите на мощен радиочестотен усилвател.

Форми и спектър на напреженията и токовете.

Аналитично математическо описание на формите и значимите хармонични съставлящи в спектрите на напреженията и токовете в активния елемент, в товарната и в трансформиращо-съласуващите импеданса вериги на типична схемна топология на усилвател в режими класове А, В, АВ и С. Подходяща принципна схема за изброените класове на работа е показана на фиг.2.1.



Фиг. 1.1. Принципна схема на мощен РЧ усилвател клас А

Това позволява да бъдат опростени значително аналитичните изрази за изчисляване на параметрите на схема, работеща в режим клас А, без от това да пострада инженерната точност на пресмятане. В останалите три режима отново търсената точност на пресмятане допуска кои от всичките Фуриерови коефициенти да участват. Обикновено това са коефициентите пред първите няколко хармонични съставлящи на дрейновия ток и напрежението дрейн-сорс, тъй като те имат най-значим принос в стойността на генерираната загубна мощност.

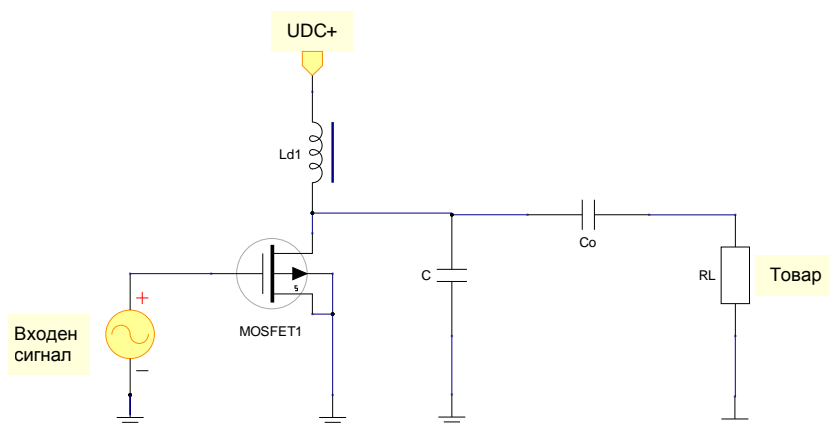
При режими класове В, АВ и С, в ъгловия интервал $\theta \leq \omega t \leq 2\pi - \theta$, дрейновият ток има нулеви стойности, което отговаря на запушено състояние на активния елемент.

Ъгловият интервал на проводимост при режим клас А съвпада с целия период на сигнала, т.е. $0 < \theta < 2\pi$, (активният елемент е отпушен през целия период), поради което за него винаги е в сила обобщеният израз на дрейновия ток, изведен за останалите режими клас В, АВ и С.

Аналитично математическо описание на формите и значимите хармонични съставлящи в спектрите на напреженията и токовете в активния елемент, в товарната и в трансформиращо-съласуващите импеданса вериги на типична схемна топология на усилвател в режими клас Е и F.

При режими на работа клас D, E, DE и F, активният елемент работи като електронен ключ, като превключването става с честотата на основния хармоник. Математическият анализ на всеки един от тези класове е доста сложен и специфичен за всеки клас, въпреки пренебрегването на преходните процеси при включване и изключване на транзисторите.

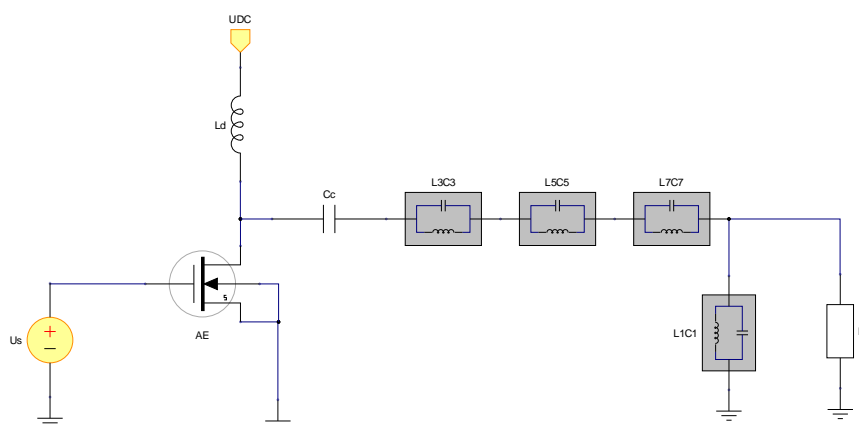
В това изследване са представени два отделни математически модела на мощни високоефективни радиочестотни усилватели. Първият дава описание на един от широко използваните видове режим клас E, а вторият разглежда подробно полихармоничния режим клас F.



Фиг. 2.2. Клас E паралелен трептящ кръг - принципна схема

Основната схема на ключов тип мощен усилвател клас E с една паралелна LC верига е показана на фиг. 2.1. Товарната верига се състои от паралелна индуктивност L_d , паралелен кондензатор C , блокиращ кондензатор C_o и товар R_L . Транзисторът се разглежда като идеален ключ, управляван така, че да му се осигури сигурно превключване между двете състояния включено и изключено. В резултат на това, определената форма на дрейновото напрежение се подава към товарната верига, когато ключът е изключен.

Класическа принципна схема на полихармоничен усилвател клас F е показана на фиг.2.3.

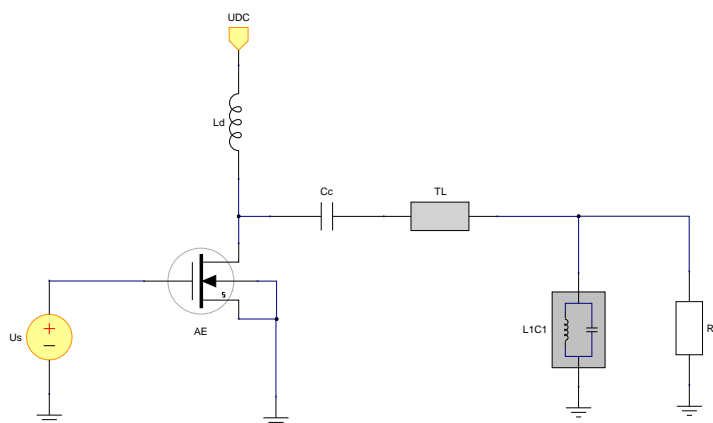


Фиг. 2.3. Принципна схема на усилвателно стъпало за режим клас F с ограничен брой серийно свързани трептящи кръгове в товарната верига

Товарната верига е съставена от активен товар, паралелно свързан успореден LC резонансен контур и няколко (обикновено от 1 до 3) последователно свързани успоредни

LC трептящи кръга, настроени да пропускат само нечетните хармоници на напрежението (с номера 3,5,7).

За разработения математически модел, обаче е използвана схемата от фиг.2.4, 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. Тази схема съответства в пълна степен на универсалния математически подход, заложен в представянето на изходния сигнал във вида на тригонометричен ред на Фурие.



Фиг. 2.4. 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:

$$U_{DS} = U_{DC} - U_m \cos \omega_o t + \sum_{n=3,5,7, \dots}^{\infty} U_{mn} \cos n \omega_o t, \quad (2.33)$$

а ефективната стойност на дрейновия ток е:

$$I_D = I_{DC} + I_m \cos \omega_o t + \sum_{n=2,4,6, \dots}^{\infty} I_{mn} \cos n \omega_o t, \quad (2.34)$$

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

$$U_{DS} = U_{DC} - U_m \cos \omega_o t + \sum_{n=2,4,6, \dots}^{\infty} U_{mn} \cos n \omega_o t, \quad (2.35)$$

а дрейновият ток е:

$$I_D = I_{DC} + I_m \cos \omega_o t + \sum_{n=3,5,7, \dots}^{\infty} I_{mn} \cos n \omega_o t, \quad (2.36)$$

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 подsigури 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.

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:

$$i_D = I_{Dm} \left[\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \cos \omega_o t + \frac{2}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\cos(\frac{n\pi}{2})}{1-n^2} \cos n \omega_o t \right], \quad (2.37)$$

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:

$$u_{DS} = U_{DC} \left[1 + \frac{4}{\pi} \cos \omega_o t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_o t + \frac{4}{5\pi} \cos 5\omega_o t - \frac{4}{7\pi} \cos 7\omega_o t + \dots \right], \quad (2.39)$$

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.

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

$$P_L = I_D U_{DS} = \frac{I_{Dm} U_{DSm}}{2}, \quad (2.47)$$

При усилвателите, работещи в режими клас В, АВ и С 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. Съгласно правилото на Коши, общият аналитичен вид на сумарната загубна мощност в транзистора, работещ като източник на ток в режими клас В, АВ и С е:

$$P_L(\omega t) = I_{DC} U_{DC} \left[\left(1 - \frac{U_m}{U_{DC}} \right) \frac{\pi(1 - \cos\theta)}{\sin\theta - \theta \cos\theta} \cos \omega t + \left(1 - \frac{U_m}{U_{DC}} \right) \frac{\pi(1 - \cos\theta)}{\theta - \sin\theta \cos\theta} \cos^2 \omega t \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{U_m}{U_{DC}} \right) \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\pi n(n^2 - 1)(1 - \cos\theta)}{2 \sin n\theta \cos\theta - 2n \sin\theta \cos n\theta} \cos n\omega t \cos \omega t \right], \quad (2.48)$$

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

$$P_{DS} = \frac{1}{2} I_D U_{DS} \cos \varphi, \quad (2.49)$$

Ефективната стойност на мощността, управляваща гейта е:

$$P_G = \frac{1}{2} I_{Gm} U_{GSm} \cos \varphi_G = \frac{U_{GSm}^2}{2R} \cos \varphi_G, \quad (2.50)$$

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

$$\eta_D = \frac{P_o}{P_{DC}} = \frac{1}{2} \left(\frac{I_m}{I_{DC}} \right) \left(\frac{U_m}{U_{DC}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{U_m}{U_{DC}} \right)^2 \quad (2.51)$$

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

$$\eta_{D, \max} = \frac{1}{2} \left(\frac{U_{m, \max}}{U_{DC}} \right) = 0.5 \quad (2.52)$$

Действителният максимален дрейнов коефициент на полезно действие е:

$$\eta_{D, \max} = \frac{U_{m, \max}}{2U_{DC}} = \frac{U_{DC} - U_{DS, \min}}{2U_{DC}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{U_{DS, \min}}{U_{DC}} \right) < 0.5 \quad (2.53)$$

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:

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_L} = \left(1 + \frac{8R_{rLc}}{(\pi^2 + 4)R} + \frac{(\pi^2 + 28)r_{DS}}{2(\pi^2 + 4)R} + \frac{(\pi^2 - 4)r_{CI}}{2(\pi^2 + 4)R} + \frac{r_L + r_C}{R} + \frac{(2\pi ft)^2}{12} \right)^{-1} \quad (2.54)$$

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

$$\eta_{PAE} = \frac{P_o - P_G}{P_{DC}} = \frac{P_o - P_G}{P_o + P_L} \quad (2.55)$$

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

$$\eta_D = \frac{P_o}{P_{DC}} = \frac{8(U_{DC} - U_{DSmin})^2}{\pi R_I I_{DM} U_{DC}} \quad (2.56)$$

S-параметричен анализ. Комплексни коефициенти на предаване и отражение.

За обективна оценка на усилването по мощност и ефективността на преобразуване на входния сигнал настоящото изследване са използвани два различни начина за анализ. Освен по хармониците на токовете и напреженията в изходната верига на транзистора и в товарната верига на усилвателя, е използван и анализ на S-параметрите на усилвателя при представянето му като активен четириполусник.

Използван е утвърденият математически модел от теорията на S-параметричен анализ на усилвателното стъпало, представено като четириполусник (пасивен или активен според избрания работен режим).

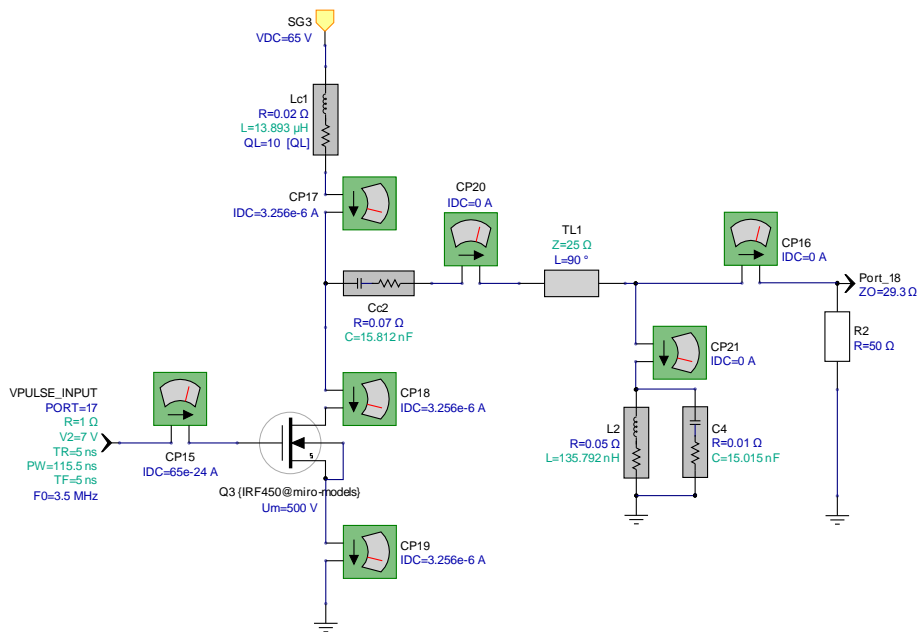
2.3. Алгоритъм за проектиране на радиочестотен усилвател.

Синтезиран е практичен алгоритъм за проектиране на работещ усилвател клас F, чиято товарна верига е изградена от паралелно свързан резонансен LC контур, настроен на честотата на основния хармоник и последователно свързана четвърт - вълнова предавателна линия, чиито параметри осигуряват условия на отворена верига за всички нечетни хармонични съставки и включена накъсо верига за всички четни съставки на сигнала. Като следствие от това, напрежението дрейн-сорс придобива близка до правоъгълна форма, което осигурява необходимите условия за работен режим на транзистора в областта на насищане (т.е. като ключ), а не като източник на ток.

Избраната принципна схема (фиг.2.6) е реализирана с трансформиращо-съгласуваща импедансите верига под формата на четвърт-вълнова предавателна линия с разпределени параметри вместо съгласуваща верига със съсредоточени параметри във вид на паралелно свързани трептящи кръгове, изчислени да пропускат отделните нечетни хармоници.

Последователността на стъпките в предложениия усъвършенстван алгоритъм за проектиране на високоефективен радиочестотен усилвател клас F са показани под формата на блокова схема с логически преходи (фиг.2.7). Като следствие от това, напрежението дрейн-сорс придобива близка до правоъгълна форма, което осигурява

необходимите условия за работен режим на транзистора като ключ, а не като източник на ток. В резултат се получава дрейнов ток с форма на полусинусоида.



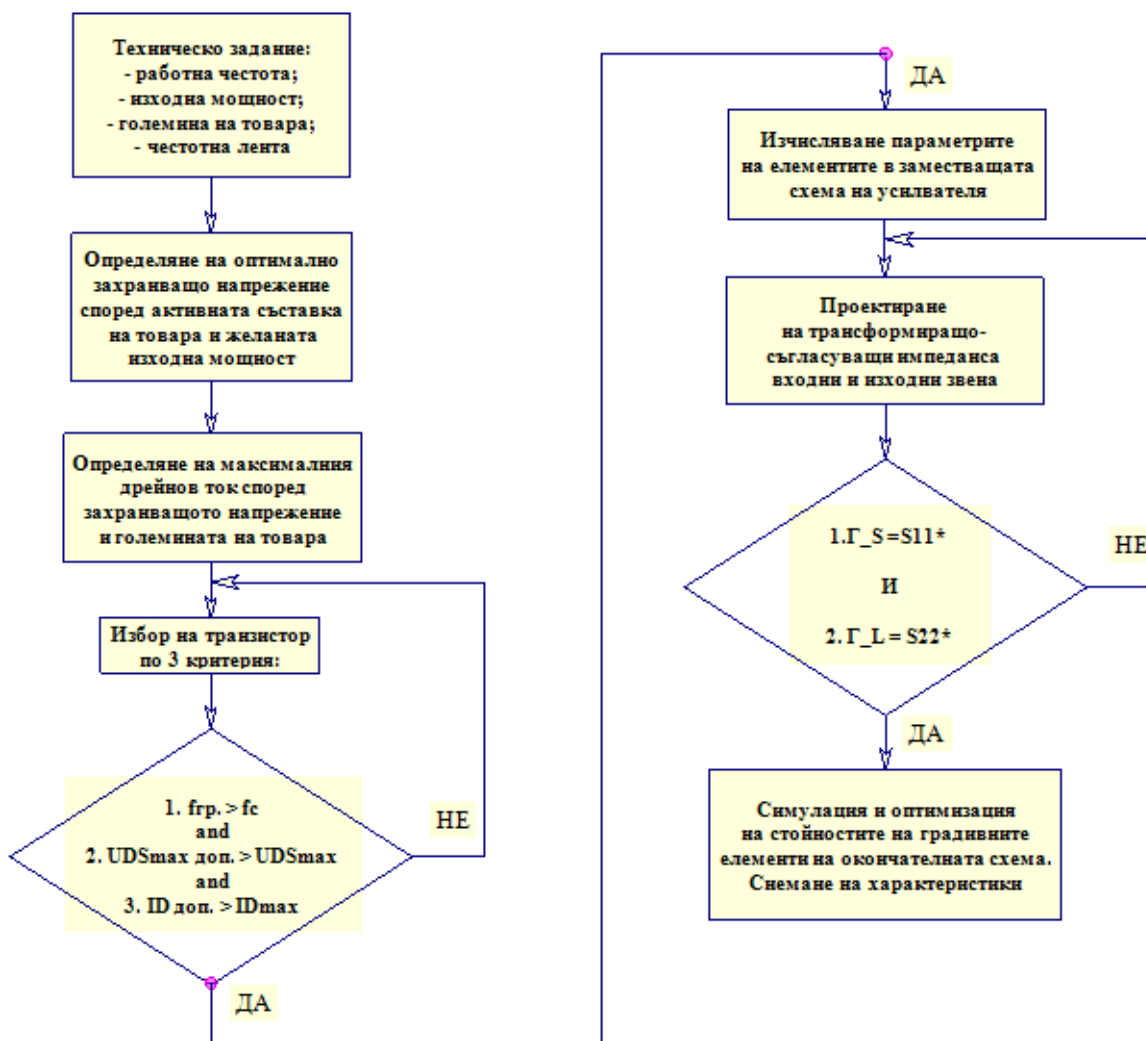
Фиг. 2.6. Принципна схема на мощно крайно усилвателно стъпало, работещо в режим клас F

За математическото анализиране и моделиране на процесите в мощните високоефективни радиочестотни усилватели са използвани както известни, така и получени от докторанта зависимости, отчитащи специфичните особености на разглеждания тип конфигурация. На базата на тези зависимости е направено с програмните продукти MatLab и Keysight Genesys симулационно изследване и оптимизиране на параметрите на високоефективен усилвател клас F₃₅₇ и F_∞.

Използвани са: хармоничен анализ на токовете и напреженията в изходната верига на транзистор работещ в режим клас F₃₅₇ и F_∞, както и линеен S-параметричен анализ на усилвателя и неговите входни и изходни трансформиращо-съгласувачи импеданса вериги като каскадно свързани четириполусници. Прилагани са утвърдени математически методи за решаване на системи диференциални уравнения за описание на процесите в работата на високоефективните усилватели - трансформация на Лаплас, времеви анализ (Time-Domain Analysis), апроксимации с кубични сплайни и др.

Численият метод е реализиран под формата на алгоритъм за проектиране на радиочестотен усилвател с желани изходни параметри от сравнително опростени емпирични формули, чрез които са изчислени стойностите на елементите изграждащи еквивалентната схема на усилвателя.

Приложени са два подхода, които осигуряват теоретичните предпоставки за постигане на високоефективен режим клас F. Единият е електрическата схема на изходната верига да бъде изградена от четвърт-вълнова преносна линия и паралелен трептящ кръг, настроен на основната честота. Другият подход е четвърт-вълновата преносна линия да преминава в последователен трептящ кръг отново настроен да пропуска само основния хармоник. И в двата случая изходната верига е затворена през стандартен активен товар 50 Ω (или нормиран към 50 Ω при S-параметричен анализ).



Фиг. 2.7. Алгоритъм за проектиране на усилвателно стъпало в режим клас F

Симулационният метод е приложен като количествен и качествен коректив на представения в настоящата глава математически модел. С негова помощ е извършена оптимизация на различните конфигурации усилвател клас F₃₅₇ и F_∞, по избрана съвкупност от критерии.

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

2.4.1. Сравнителен критерий по мощност

$$P_o = \eta_D P_{DC} = \eta_D U_{DC} I_{DC} = \eta_D \left(\frac{U_{DC}}{u_{max}} \right) \left(\frac{I_{DC}}{i_{max}} \right) u_{max} i_{max}, \quad (2.73)$$

2.4.2. Сравнителен критерий по икономичност (по коефициент на полезно действие)

$$k_\eta = \frac{\Delta \eta_{e, pattern}}{\Delta \eta_e} = k_P \frac{\Delta \eta_{e, pattern}}{\Delta \eta_e} \quad (2.81)$$

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

$$k_{\omega} = \frac{U_{max}\omega C_0}{i_{max}} \quad (2.84)$$

2.4.4. Сравнителен критерий по коефициент на използване на мощността:

$$k_{CP} = \frac{P_{o,max}}{I_{DM} U_{DSM}} 4\eta_D \left(\frac{U_{DC}}{u_{max}}\right) \left(\frac{I_{DC}}{i_{max}}\right), \quad (2.85)$$

2.4.5. Сравнителен критерий по качество на изходния сигнал:

$$k_q = k_d M k_{\varphi} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} P_n^2}{P_1}} \frac{G_U(\omega)}{G_{U_0}} \frac{\varphi(\omega)}{\omega t_d} \quad (2.86)$$

2.5. Изводи към втора глава

В обобщение на всичко казано, в глава II са изпълнени следните задачи:

- Синтезиран е математически модел за аналитично изследване на някои характерни режими на работа на радиочестотните усилватели от двете основни групи: режим клас А – активният елемент работи като източник на ток, управляван по напрежение; режим клас Е и клас F – активният елемент е поставен в условия на работа като електронен ключ по начин, специфичен за всеки от двата класа.
- Математическият модел е многоцелеви и включва в себе си аналитично описание на формите и спектъра на напреженията и токовете в активния елемент, спектрален баланс на мощностите, комплексни коефициенти на предаване (усилване) и отражение, коефициенти на полезно действие.
- Аналитично е дефиниран набор от критерии за сравнение на радиочестотни усилватели по ефективност и качество на преобразуването на сигнала, нормирани в относителни единици по начин, който елиминира неточната субективната преценка, базирана на абсолютните големини на сравняваните качествени показатели.
- Денормираните критерии за оценка на ефективността на усилването и качеството на изходния сигнал пък могат да бъдат използвани като гранични или начални условия при решаване на системи диференциални уравнения с цел аналитично „моделиране“ на желани функционални зависимости между някои режимни параметри и честотата на основния хармоник например.

ГЛАВА 3. Синтез на симулационен модел за изследване на мощен радиочестотен усилвател. Резултати от симулацията

2.3. Алгоритъм за синтезиране на симулационен модел

Симулационният модел е синтезиран в следната последователност:

Построяване в симулационна среда на радиочестотен усилвател на мощност по работна схема, базирана на класическа топология, подходяща за работа в режими клас А, Е и F. Схемата на опитната постановка би могла да се нарече „хибридна“, тъй като в симулационната платформа работната схема, върху която се провеждат измервания представлява на практика блокова схема на опитната постановка, в която има два вида блокове.

След построяване на хибридната схема на опитната постановка, са генерирани следните групирани измервания:

- симулационно измерване на напреженията и токовете по отделни хармоници;
- измервания / изчисления на съотношения и баланс между преобразуваната радиочестотна мощност и сравняване на енергийните съотношения в изследваните схеми на мощни радиочестотни усилватели, работещи в характерни режими на активния елемент по избраната съвкупност от обективни, математически аргументирани критерии, независещи от абсолютните стойности на токовете, напреженията и мощностите в отделните възли и клонове на схемата.
- Симулационно измерване на S-параметрите на усилвателя като четириполусник.
- Изчисляване на зададените в предходната глава сравнителни критерии за обективна оценка на ефективността и графично изобразяване тяхната зависимост от някои величини, параметри и режимите на работа на усилвателя.

2.3.1. Симулационен модел на активния елемент.

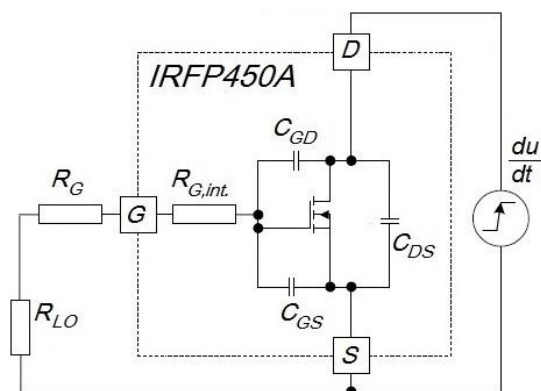
Необходимостта от максимална прецизност на физическите модели на активните елементи в усилвателните устройства, работещи в радиочестотната област, изисква намирането на начини за подобряване и оптимизация на съществуващите под формата на аналогови еквивалентни електронни схеми утвърдени модели на транзистори според спецификите на изследваните обекти и процеси.

Изследваните от автора подходи за подобряване качеството на апроксимациите, реализирани от физическото моделиране на активния елемент са неразделна част от този дисертационен труд. Чрез въвеждане в еквивалентната схема на модела на допълнителни дискретни физически елементи, както и техни математически модели, отчитащи с висока прецизност спецификите в нелинейните им характеристики. Ефективността на активния елемент (особено в ключови режими) силно зависи от транзитната му честота, поради което честотният критерий се явява най-важен за правилният подбор на транзистор в като стъпка от алгоритъма за проектиране. Тази ефективност става все по зависима от увеличаването на работната честота на усилвателя.

Представено е изследване на типичен физически модел на мощен полеви транзистор IRFP450A (високоэффективен за честоти до 10 MHz според каталожните

данни и относително ефективен за по-високи честоти). Опитите са проведени върху реализирана дискретна схема на мощен радиочестотен усилвател. Първоначалните параметри на елементите в схемата са изчислени предварително в симулационна среда на LTspice XVII и Keysight Genesys на базата на известен физически модел на IRFP450A при високи честоти.

Използвани са каталожни данни на полеви транзистор IRFP450A за изчисление на еквивалентните електрически параметри на елементите, изграждащи заместващата схема (фиг. 3.6): капацитетите C_{GS} , C_{GD} , C_{DS} , праговото напрежение на гейта U_{th} , напрежението на платото на Милър $U_{GS,Miller}$, вътрешното съпротивление на гейта $R_{G,int}$, както и бързината на превключване на транзистора.



Фиг.3.6. Еквивалентна схема на IRFP450A, отчитаща паразитните капацитети и влиянието на управляващата верига върху бързината му на превключване

Усилвателната схема е реализирана с MOSFET транзистор IRFP450A, свързан между входната и изходната съгласуващи вериги. Този транзистор е широко използван в превключващите токозахранващи устройства, но работи ефективно и в радиочестотната област. При изходна мощност от 53 dBm (200 W) е постигнат дрейнов КПД от 95% и пълен КПД от 90%. При симулацията са използвани освен предоставеният от производителя оригинален SPICE модел на IRFP450A, и описаните по-горе оптимизирани модели, всеки от които е подходящ за конкретни условия и режим на работа за съответните който възпроизвежда с висока точност формите на напрежението, коефициента на полезно действие и нивата на хармониците на реалния транзистор.

Проведеният анализ позволява да бъдат направени следните изводи:

Съществуващите модели на активните елементи сравнително лесно, с неголеми, целенасочени усложнявания на елементния състав на еквивалентната схема, могат да бъдат оптимизирани според конкретните изисквания към спецификите в режимите и условията на работа на радиочестотните усилвателни устройства.

Прилагането на тази концепция допринася значително да бъдат подобрени и резултатите от компютърните симулации на процесите в радиокомуникационните устройства без това да усложнява инженерната работа по проектирането им. Тези приложения водят до подобряване качествата на апроксимациите, реализирани от последващото физическо моделиране на активния елемент. Нещо повече, вече е лесно приложимо

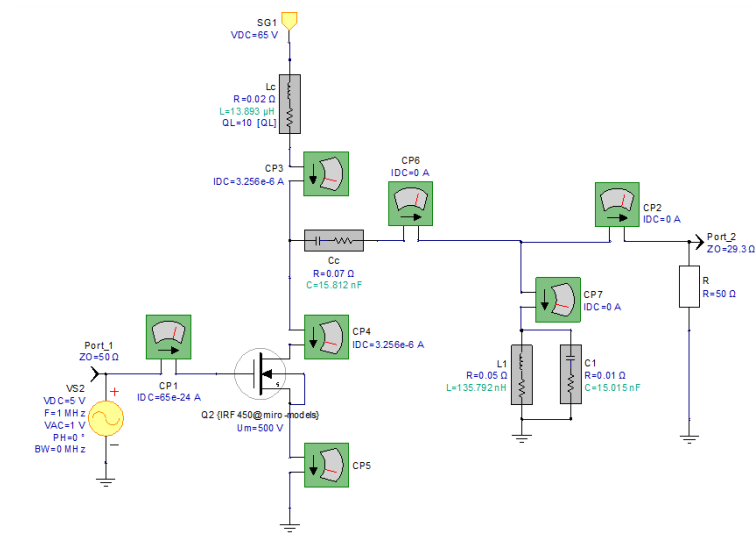
да бъдат създавани хибридни модели, чиято обща схема наподобява класическа еквивалентна електронна схема, в която, част от елементите ѝ освен физически, могат да бъдат зададени като математическа функция или като програмен ред (фиг. ПЗ.3).

Моделирането на процесите в реалния транзистор чрез оптимизиране на подбора на елементите и топологията на еквивалентната схема на подобрените модели трябва да се базира не само на усилването при специфична стойност на честотата, но също така и при зададена допустима стойност на коефициента на отразената вълна на входа на транзистора.

3.2. Симуляционен модел на радиочестотен усилвател. Резултати от симулацията.

Създадени са изчислителен модул (в среда на Matlab) и графо-изчислителен модул в среда на Agilent Advanced Design System (ADS) и с помощта на Agilent Genesys, който може да бъде прилаган за оптимизация на моделни схеми, работещи в широк честотен диапазон.

Симуляционен модел за изследване на мощен радиочестотен усилвател, предназначен за работа в режим клас А:



Фиг. 3.7. Хибридна схема на усилвателно стъпало за режим клас А с отчитане на активните съпротивления на елементите в товарната верига

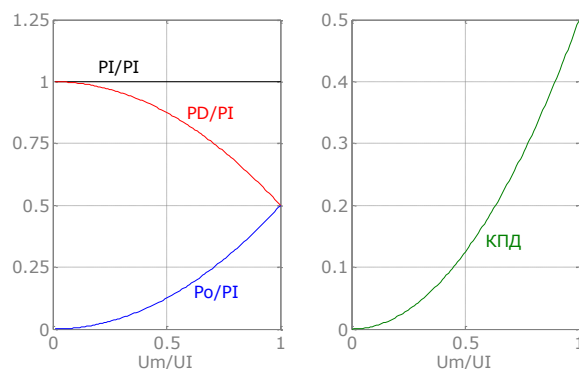
Симуляционно получените тенденции за изменение на нормализираните стойности на постояннотоковата P_I , изходната P_o и загубната мощност P_D както и КПД във функция на нормализираната амплитуда на изходното напрежение U_m са показани графично на фиг. 3.9.

Управляващата входна мощност е:

$$P_G = \frac{1}{2} I_{gm}^2 R_G \cos\varphi_G = \frac{U_{gm}^2}{2R_G} \cos\varphi_G, \quad (3.25)$$

където R_G е активното съпротивление на гейта, а φ_G е фазовата разлика между гейтовия ток и напрежението гейт-сорс. Импедансът на гейта се състои от активното

съпротивление R_G и гейтовия входен капацитет $C_g = C_{gs} + (1 - A_m)C_{gd}$, където C_{gs} и C_{gd} са паразитни капацитети гейт-сорс и гейт-дрейн, а A_m е нарастъкът на напрежението гейт-дрейн.



Фиг. 3.9. Постояннотоковата P_I , изходна P_O , и загубната мощност P_D и КПД представена като функция на амплитудата на изходното напрежение U_m

Предимството на усилвателя клас А е високото качество на усиления сигнал поради силно изразената линейност на зависимостта между входното и изходното напрежение. Недостатък на този клас усилватели е niskият коефициент на полезно действие (под 50%). Максималната загуба на мощност в транзистора е при $P_o=0$. Поради това охлаждането на усилвателя трябва да бъде проектирано за $P_{LSmax} = P_{DC}$.

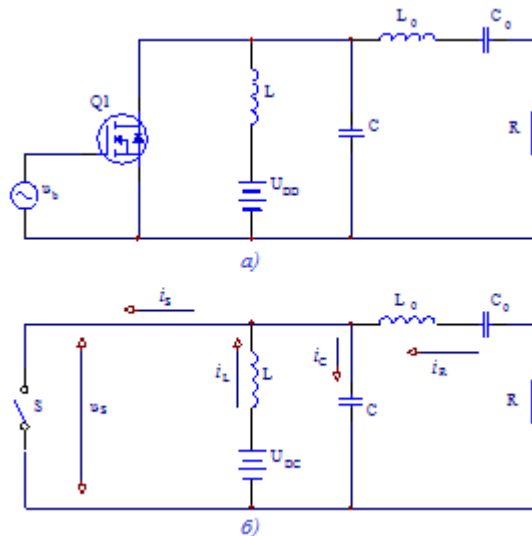
Резултатите от симулационното изследване на мощен усилвател клас А с помощта на изчислителен модул, реализиран от автора в среда MATLAB са следните:

Качествен фактор на трептящия кръг $Q_L = 43$; постояннотокова мощност на дрейна $P_{DC} = 10W$; променливотокова мощност на дрейна $P_{DS} = 5W$; Загубна мощност в транзистора $P_D = 5W$; амплитуда на изх. напрежение $U_m = 12V$; максимално напрежение дрейн-сорс $U_{DSmax} = 24V$; товар $R = 14.4 \text{ Ohm}$; резонансна индуктивност $L = 0.124 \text{ nH}$; резонансен капацитет $C = 1105 \text{ pF}$; индуктивност на дросела $L_f = 53.30 \text{ nH}$; капацитет на свързващия кондензатор $C_c = 257 \text{ pF}$; амплитуда на променливата съставка на товарния дрейнов ток $I_m = 0.9429 \text{ A}$; постоянна съставка на товарния дрейнов ток $I_D = 0.9429 \text{ A}$; максимален дрейнов ток $I_{DM} = 1.8858 \text{ A}$; загубна мощност в бобината $P_{rL} = 0.16439 \text{ W}$; загубна мощност в кондензатора $P_{rC} = 0.082193 \text{ W}$; загубна мощност в свързващия кондензатор $P_{rCc} = 0.0022226 \text{ W}$; загубна мощност в дросела $P_{rLf} = 0.0017781 \text{ W}$; загубна мощност в трептящия кръг $P_r = 0.25058 \text{ W}$; КПД на трептящия кръг $\eta_r = 95.2\%$; КПД на усилвателя $\eta = 47.6\%$; загубна мощност в усилвателя $P_{LS} = 5.25W$; съгласуване импеданса на усилвателя при външен товар $R_L = 50 \text{ Ohm}$: капацитет $C_1 = 33.16 \text{ pF}$, капацитет $C_2 = 18.48 \text{ pF}$; активни съпротивления $r_B = r_A = 1.44 \text{ Ohm}$; качествен фактор на звеното $q_A = 5.81$; качествен фактор на съгласуващата системата $Q_L = 8.81$; търсената индуктивност е $L = 4.69 \text{ nH}$.

Симулационен модел на мощен радиочестотен усилвател клас Е

На фиг. 3.14 а) е показана основната принципна схема на ключов тип мощен усилвател клас Е паралелна схема със сериен филтър. Товарната му верига се състои от паралелна индуктивност L , паралелен кондензатор C , сериен филтър L_oC_o , настроен на основната честота и товарен резистор R . В общия случай капацитетът C включва в себе си вътрешния изходен капацитет на транзистора и външния капацитет на товарната

верига. При идеализирания теоретичен анализ с опростената еквивалентна схема, показана на фиг. 3.14 б), се прилагат всичките допускания, използвани при анализа на мощен усилвател клас E с една индуктивност и един кондензатор.



Фиг. 3.14. Клас E паралелна схема със сериен филтър:
а) принципна схема; б) еквивалентна схема

Симуляционен модел на мощен радиочестотен усилвател клас F

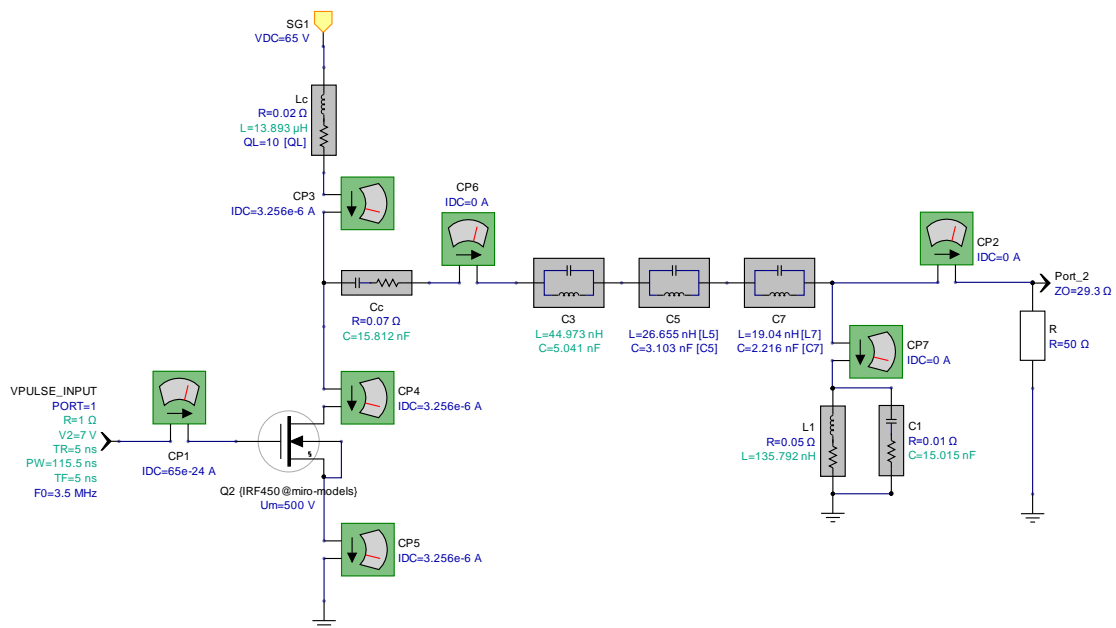
Избрана е схемна топология, която може да реализира и двата вида режими на работа на усилвателния елемент – като източник на ток и като електронен ключ. Електронната схема е изградена виртуално в симулационната среда на програмата Agilent Genesys (RF and Microwave Design Software) на Keysight Technologies (фиг.3.21).

Използват се възможностите на програмата за автоматизирано изпълнение на предварително зададена методология за математическо изчисляване на предварителни стойности на електрическите параметри на всеки от дискретните елементи в схемата според избрания честотен диапазон и желана ефективна мощност на изходния сигнал. Алгоритмите за изчисляване са базирани на съставянето и решаването на системи линейни уравнения съгласно законите на Кирхоф и Ом по метода на възловите потенциали. Както е известно този метод е най-бърз при ръчно смятане поради по-малкия брой уравнения, които се налага да бъдат съставени.

Във входната и изходната верига на активния елемент са включени и звената, които трансформират и съгласуват съответно входния и изходния импеданс. Тези звена са зададени под формата на вградени блокови конфигурации от неявно показани RCL елементи, описани единствено с желания входен и изходен импеданс на блока.

С помощта на специализиран подпрограмен модул лесно се генерират съгласуващи импеданса четириполюсници от пасивни и/или активни елементи, чиито електрически стойности се изчисляват автоматично въз основа на зададените в предходната глава изчислителни формули. Удобството е и в това, че програмата е способна да генерира готови заместващи електрически схеми на тези съгласуващи звена с така изчислените електрически параметри.

Във всички разновидности на схемата има успоредно свързан паралелен трептящ кръг, който е настроен да пропуска основния хармоник на напрежението и основния хармоник на тока и 50Ω товар на изхода.



Фиг. 3.21. Схема на усилвателно стъпало за режим клас F с ограничен брой последователни трептящи кръгове в товарната верига

Във връзка с това е проектирана опитна постановка за изследване на няколко характерни схеми радиочестотен усилвател клас F_{357} (фиг.3.20) и F_{∞} (фиг.3.24) с еднаква топология в симулационната среда на Keysight Genesys. Двете схеми се отличават единствено по звеното, филтриращо висшите хармоници по задания в изследването начин при изходни данни (фиг.3.20, фиг.3.24).

| Name | Description | Default Value | Units |
|--------|------------------------------|---------------|-------|
| Po | Desired output power | 100 | (W) |
| UDC | Available Voltage Supply | 65 | (V) |
| f | Fundamental Frequency | 3.5 | (MHz) |
| Bw | Bandwidth | 0.35 | MHz |
| RL | Load resistance | 50 | (Ohm) |
| UDSmin | Minimal drain-source voltage | 1 | (V) |

Фиг. 3.22. Изходни данни, при които е изчислен усилвателят клас F

Схемата на (фиг.3.20) е разработена за симулационни експерименти с радиочестотен усилвател в режим клас F . За целта в изходната верига са добавени серийно свързани паралелни трептящи кръгове, които са изчислени и настроени да пропускат само нечетните хармоници на напрежението за основна честота 3.5 MHz. В случая са включени три такива резонансни кръга за 3-ти, 5-ти и 7-ми хармоник на напрежението. Изчисленията на стойностите на градивните елементи са направени

съгласно описания математически модел на мултирезонансен усилвател клас F с помощта на изчислителен програмен ред във формат на Matlab с помощта на модул, интегриран в симулационната програма Agilent Genesys (фиг.3.22).

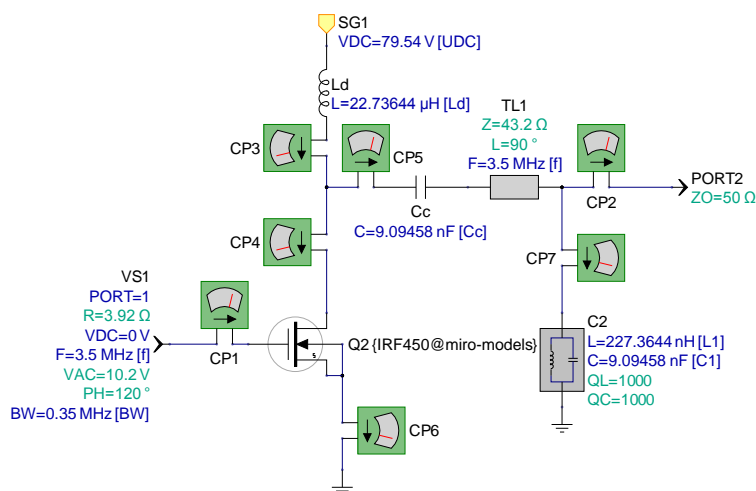
```

1 Am1=1225/1024
2 Am3=245/1024
3 Am5=49/1024
4 Am7=5/1024
5 Um1=Am1*(UDC-UDSmin)
6 Um3=Am3*(UDC-UDSmin)
7 Um5=Am5*(UDC-UDSmin)
8 Um7=Am7*(UDC-UDSmin)
9 QL=f/Bw
10 UDSmax=UDC+Um1
11 R=Um1^2/2/Po
12 Lc=10^6*QL*R/2/3.14159/f
13 Cc=10^9*QL/2/3.14159/f/R
14 L1=10^9*R/2/3.14159/f/QL
15 C1=10^9*QL/2/3.14159/f/R
16 L3=10^9*R/6/3.14159/f/QL
17 C3=10^9*QL/6/3.14159/f/R
18 L5=10^9*R/10/3.14159/f/QL
19 C5=10^9*QL/10/3.14159/f/R
20 L7=10^9*R/14/3.14159/f/QL
21 C7=10^9*QL/14/3.14159/f/R
22 fm=(f/5)*sin(2*3.14159*f/5)

```

Фиг. 3.23. Програмен ред във формат на Matlab за изчисление стойностите на елементите на трептящите кръгове в товарната верига

Веднъж изчислени параметрите на градивните елементи, изграждащи съответните трептящи кръгове почти не се променят в процеса на оптимизация, а други претърпяват по-значими толерансни изменения в посока на оптимални условия за избрания работен режим на активния елемент – например вътрешното съпротивление на генератора на входния сигнал, амплитудата и фазата на управляващия сигнал.

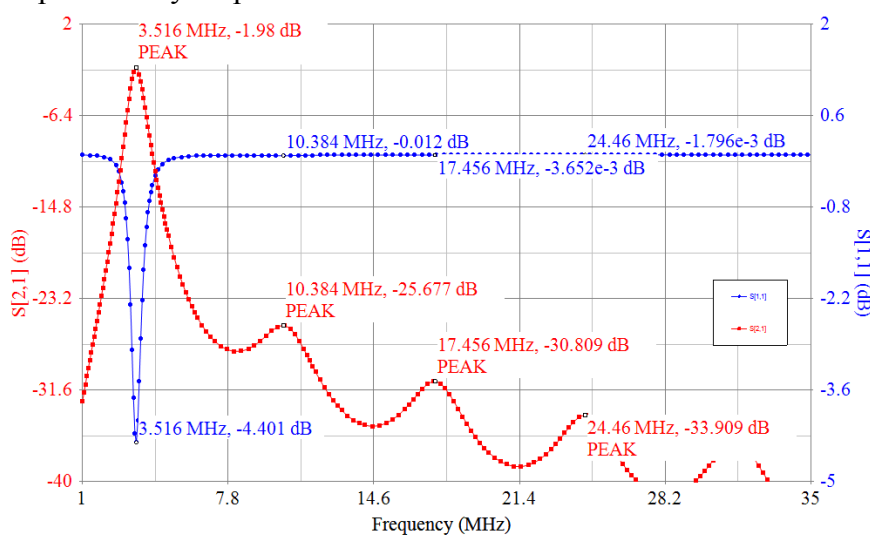


Фиг. 3.25. Принципна схема на усилвателно стъпало за режим клас F с четвърт - вълнова предавателна линия в товарната верига

В процеса на симулация се наблюдава значително влияние на качествения фактор на трептящия кръг на основния хармоник върху ефективността.

Всеки един от тези генератори позволява прецизни настройки на параметрите на сигнала - амплитуда, честота, фаза, постояннотокова съставка и ширина на честотната лента при синусодален сигнал, а при импулсен сигнал – съответно: ниво на сигнала, продължителност, преден фронт, заден фронт и закъснение на импулса.

Входният (управляващият) сигнал се подава на гейта на транзистора евентуално през входна трансформиращо-съгласуваща импеданса верига, която на този етап не е зададена, тъй като трябва да бъде определено симулационно колко е разликата между входния импеданс на усилвателя, включващ в случая и вътрешното съпротивление на генератора и входния импеданс на транзистора, който представлява зависима променлива от режима му на работа.



Фиг. 3.27. S-параметри на симулационния модел на предавателната линия, настроена на основна честота 3.5 MHz на усилвателно стъпало за режим клас F

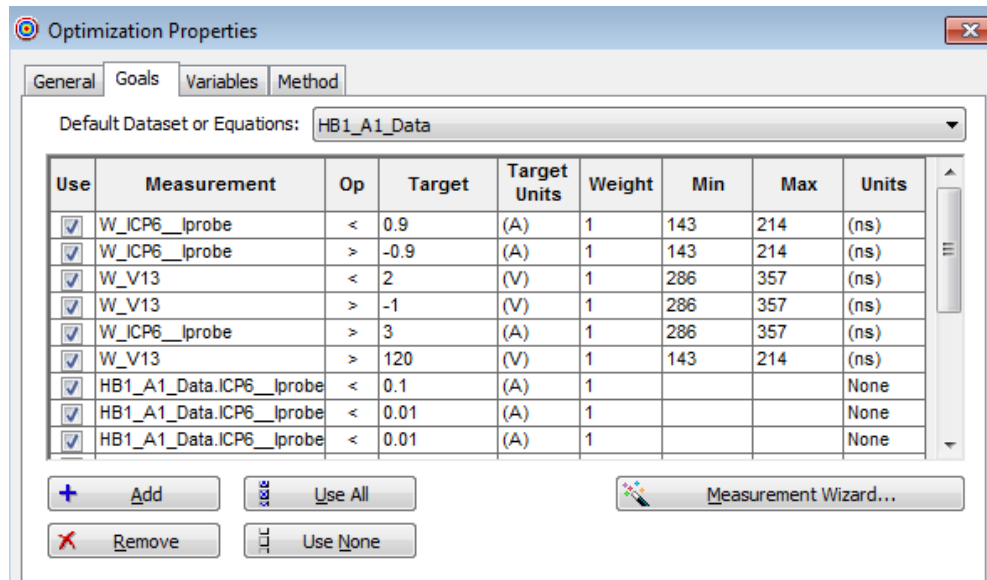
В схемата на радиочестотен усилвател в режим клас F_o. (фиг.3.24) четвърт-вълновата предавателна линия осигурява свързване с нулев импеданс само на хармониците с четни номера и безкрайно голям импеданс на всички нечетни хармоници. В резултат на това се получава напрежение дрейн-сорс с правоъгълна форма, което вкарва транзистора в ключов режим. Поради това, че не срещат съпротива, четните хармоници формират сумарен сигнал, чиито стойности удовлетворяват условията за работата на ключа.

На фиг.3.26 са показани графично два от S-параметрите на симулационния модел на предавателната линия – коефициентът на предаване на падащата на входа вълна (S₂₁) и коефициентът на отражение на отразената от входа вълна (S₁₁) като функция на честотата. Отчетливо се виждат пиковете в проводимостта на хармониците с честоти 10.5 MHz, 17.5 MHz, 24.5 MHz и т.н., които са съответно 3-ти, 5-ти и 7-ми висши хармоници на основната честота 3.5 MHz.

В схемата от фиг. фиг.3.20 са използвани усложнени модели на градивните елементи, които отразяват не само техните капацитети и индуктивности, но и

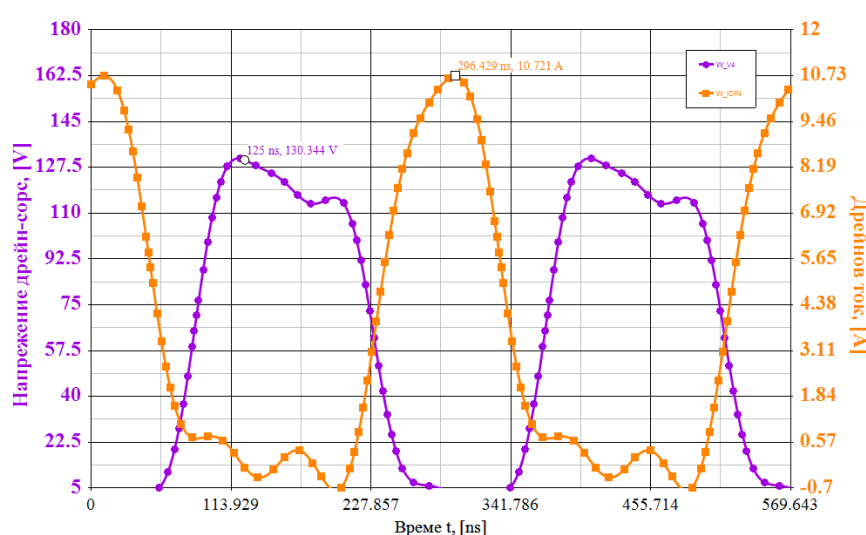
паразитните им активни съпротивления. Това позволява симулацията да се приближи максимално до реалните стойности и форми на напреженията и токовете в усилвателя.

Реализирани са симулационно характерни режими на работа на активния елемент на радиочестотен усилвател при една и съща топология на електрическата схема за стандартни честотни диапазони, използвани в съвременните телекомуникационни мрежи и системи. Снетите числови данни се систематизират и представят в нагледен табличен и графичен вид.



Фиг.3.28. Диалогов прозорец за настройка на избрания режим на работа

Първоначално зададените стойности на градивните елементи са изчислени предварително въз основа на описания в предходната глава алгоритъм за проектиране.



Фиг.3.29. Форми на напрежението дрейн-сорс и дрейновия ток в активния елемент в режим клас F за работна честота 3.5 MHz с предавателна линия в товарната верига и синусоидален управляващ сигнал

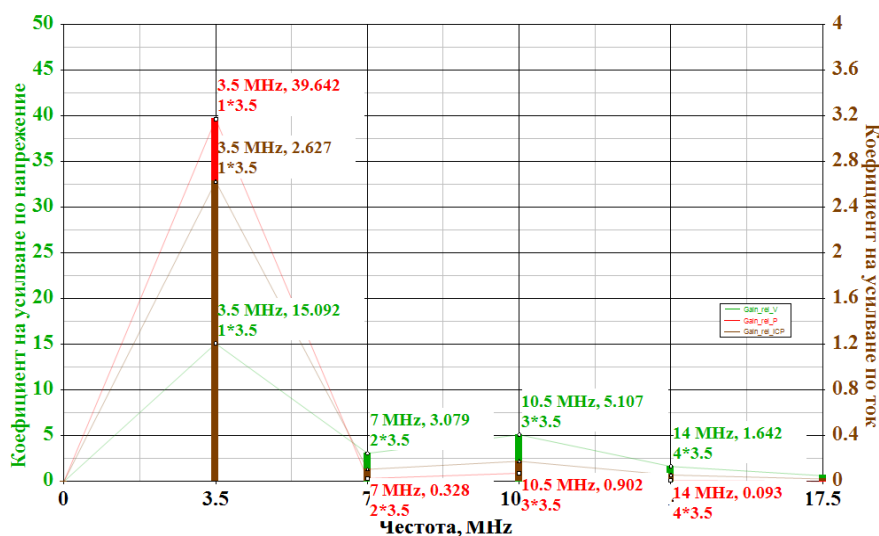
След сглобяването на схемата във виртуалната среда е зададен желаният ключов режим на работа на транзистора чрез задаване на времеви ограничения. В диалоговия прозорец от фиг.3.27 са зададени изходни ограничителни условия по ъгъл (време) на проводимост за вкарване на активния елемент в съответния режим 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 (фиг.3.27).

Както се вижда от представените резултати по-долу, този анализ подробно показва точните големина и разпределението на полезните и загубните мощности.

Вторият е линейният S-параметричен анализ, който дава възможност за значимо подобряване на качествените показатели на схемата, като някои от процесите се оптимизират графо-аналитично.

Използван е точен симулационен модел на избрания полеви транзистор IRFP450 (подробно описан в началото на тази глава), както и източник на сигнал с подходящо моделирана форма – в единия случай на входа на схемата задаваме обикновен синусоидален сигнал, а в другия задаваме импулсен сигнал с определени параметри, какъвто усилвателят получава от управляващия драйвер.

Подробни данни от измерването са представени в табличен вид в приложението към дисертацията.

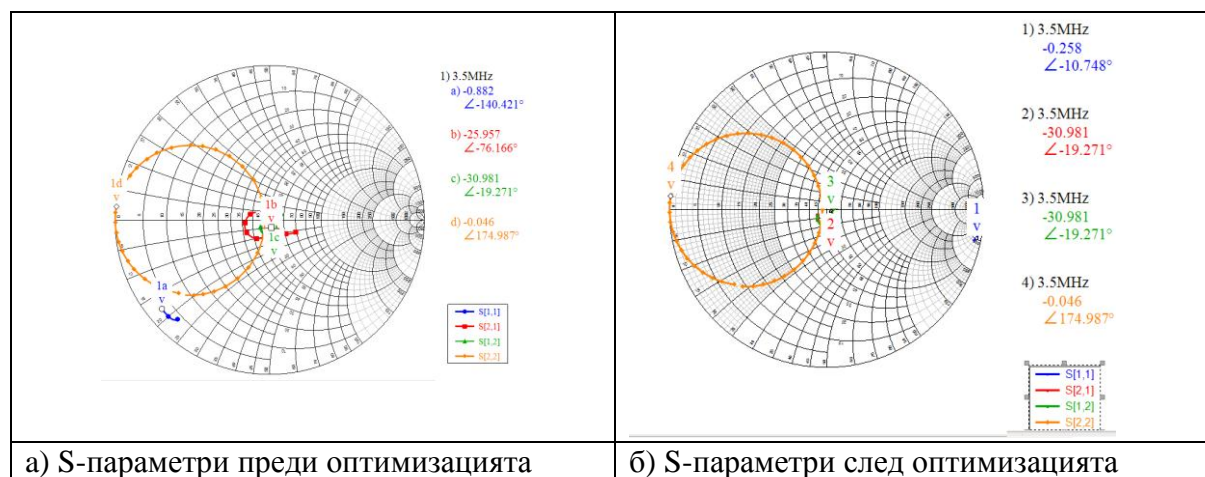


Фиг. 3.34. Спектър на коефициентите на усилване (в относителни единици) на отделните хармоници на напрежение, ток и мощност в товарната верига – съвместно представяне в една координатна система

В този смисъл и двата конструктивни подхода за реализация на полихармоничен радиочестотен усилвател – с краен брой трептящи кръгове или с предавателна линия в товарната верига постигат успешно своята цел в рамките на симулационното изследване. Разликата проличава в зависимост от честотния диапазон, за който се проектира усилвателят. Тъй като предавателната линия се изпълнява като микролента, това конструктивно решение е много по-удачно за високи работни честоти - над няколкостотин мегахерца и нагоре. За радиочестоти от няколко мегахерца до няколко

десетки мегахерца, по удачно изглежда решението с един, два до три трептящи кръга настроени съответно да пропускат 3-ти, 3-ти и 5-ти, или 3-ти, 5-ти и 7-ми хармоник на напрежението.

Тази последна стъпка от алгоритъма за симулационно изследване преодолява неточностите, породени от разминаването между прецизните изчислителни стойности на електрическите параметри на градивните елементи и параметрите на съответните най-близки реално съществуващи елементи, чрез които схемата може да бъде реализирана физически. След изпълнението на последната стъпка, получаваме схема с електрически параметри на реално съществуващи градивни елементи, годна да постигне много висока ефективност при физическа реализация.

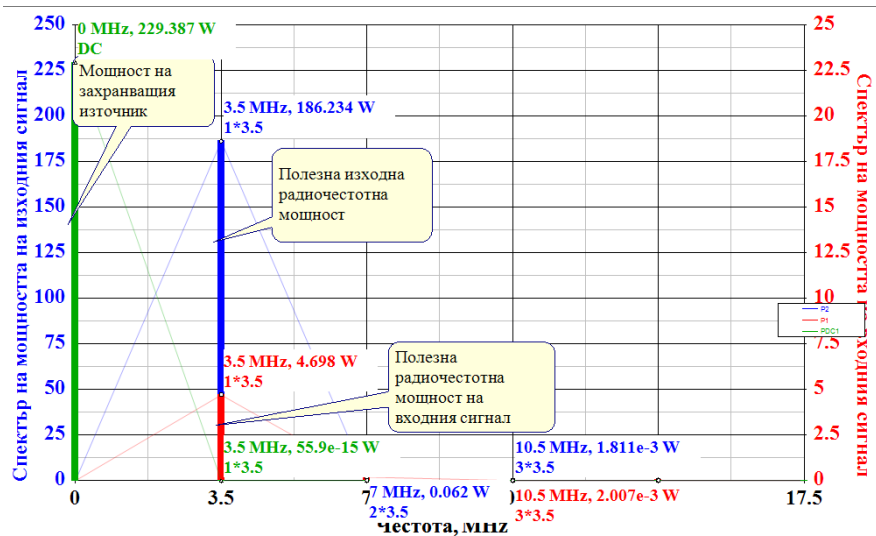


Фиг. 3.35. Коефициенти на предаване от системата S-параметри на четириполюсника, върху диаграмата на Смит

На фиг 3.35 е показано още едно нагледно представяне на данни от симулацията за обобщаване на възможностите и практичните насоки за значимо подобряване ефективността на изследвания тип радиочестотен усилвател, които да бъдат предвидени и съблюдавани още в ранните етапи проектиране и физическа реализация на тези важни компоненти на съвременните безжични комуникационни устройства.

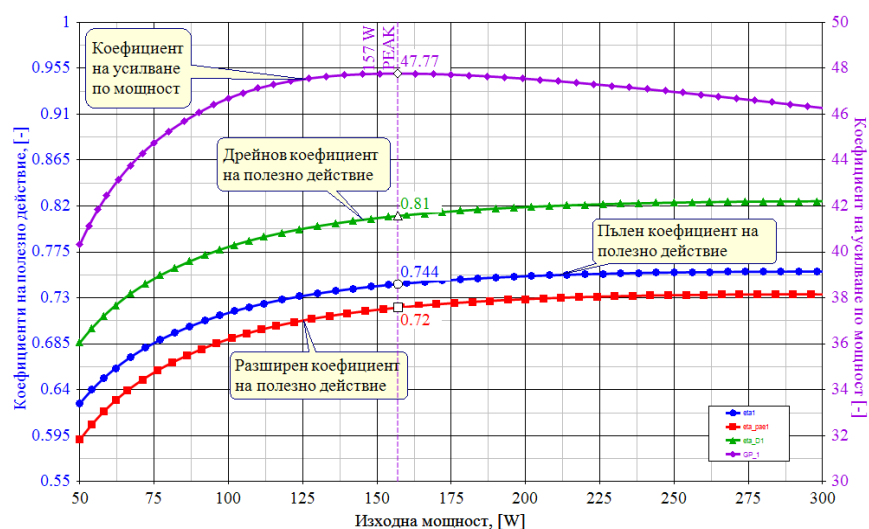
Графиката от фиг.3.35 представя честотно зависимите S-коефициенти на предаване и отражение на сигнала, снети при зададено изменение на работната честота от 1 до 10 MHz в процеса на симулация. Резултатите са нанесени в полярни координати върху диаграмата на Смит. Изчислените от симулационната програма комплексни стойности на S-параметрите при изследваната работна честота 3.5 MHz са показани в карето с числови данни на фиг.3.35. Подробен доклад за динамиката на S-параметрите е представен в табличен вид в приложението (Таблицы ПЗ.2.1 - ПЗ.2.9).

На фиг.3.36 е показан спектрално постигнатият след оптимизацията баланс на мощностите в радиочестотния усилвател, работещ в клас F. За сметка на използваната постояннотокова мощност от почти 230 W (53.62 dBm), върху товара е отдадена полезна радиочестотна мощност с ефективна стойност от 186 W (52.7 dBm). Управляващият сигнал е с мощност 4.698 W (36.72 dBm). Очевидно усилвателят е добре оптимизиран по качество на изходния сигнал, тъй като наличието на загубна мощност, разпределена във висшите хармоници на сигнала върху товара, е доведено до нищожно малка сумарна стойност (Таблица ПЗ.1). Пълният коефициент на полезно действие е почти 82%.



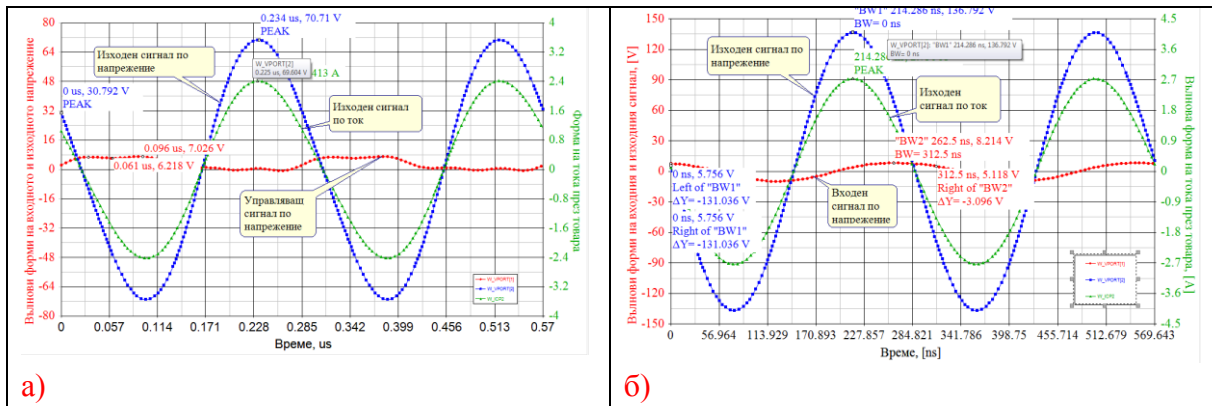
Фиг. 3.36. Спектрално представен баланс на мощностите на оптимизирания радиочестотен усилвател клас F

На фиг.3.37 са показани графично резултатите от симулацията по отношение на получените коефициенти на полезно действие и коефициента на усилване по мощност представляват нелинейни функции на изходната мощност на усилвателя при работна честота 3.5 MHz. От тези резултати се вижда, че коефициентът на усилване по мощност има максимум 47.8 (16.79 dB) при изходна мощност 157 W (51.96 dBm), докато фамилията коефициенти на полезно действие нарастват относително стръмно при изходна мощност между 50 W (47 dBm) и 75 W (48.75 dBm), по-плавно нарастват между 100 W (50 dBm) и 150 W (51.76 dBm), а над 175 W (52.43 dBm) до 300 W (54.77 dBm) нарастването е незначително и отива към установени пределни стойности – съответно 0.82 за дрейновия КПД, 0.73 за разширения коефициент на полезно действие и 0.74 за пълния коефициент на полезно действие.



Фиг. 3.37. Коефициенти на полезно действие и коефициент на усилване по мощност като функции на изходната мощност на усилвателя

Формата на изходния сигнал получена в резултат на симулационното изследване е представена графично на фиг.3.38. Независимо от формата на управляващия сигнал, и в двата случая се получава сравнително голямо усилване по напрежение. Наблюдава се видимо добро сфазизиране на напрежението и тока през товара, което означава, че той почти няма реактивна съставка и може с много висока точност да бъде разглеждан като чисто активен товар.

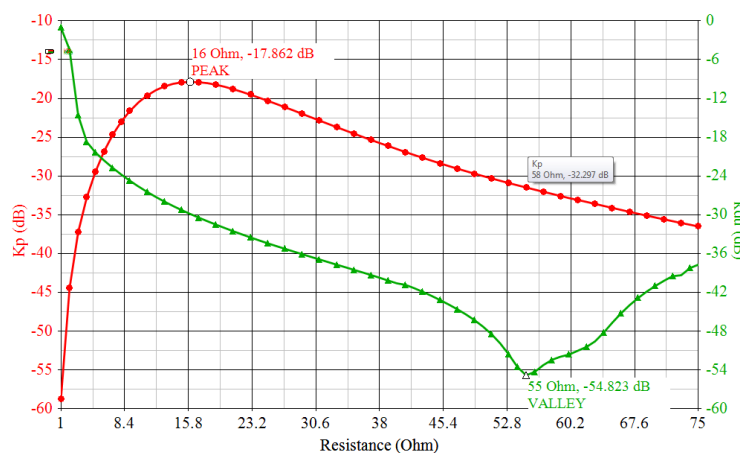


Фиг. 3.38. Форма на входния и изходния сигнал на усилвателно стъпало за режим клас F с четвърт - вълнова предавателна линия в товарната верига:
 а) при импулсен управляващ сигнал ; б) при синусоиден управляващ сигнал

3.3. Сравнителни критерии

Въз основа на получените симулационни резултати са изчислени и графично представени някои обективни критерии за сравняване на радиочестотни усилватели съгласно математическия модел описан в предходната глава.

На фиг. 3.39. е показана графично функционална зависимост на коефициента на усилване и на коефициента на нелинейни изкривявания от импеданса на преносната линия. Максималното усилване е -17.862 dB е достигнато при 16Ω, като след тази стойност започва да спада. Коефициентът на нелинейни изкривявания намалява монотонно докато достигне минимум -54.823 dB при 55Ω.



Фиг. 3.39. Сравнителен критерий по мощност и коефициент на нелинейни изкривявания в зависимост от импеданса на преносната линия

За намиране на удовлетворителен компромис между тези величини е разумно да бъде избрана такава стойност (или диапазон) на характеристичния импеданс, който да осигурява изискванията за високоефективен режим на работа на активния елемент и на пълната схема на усилвателя с наличие на минимално количество (клонящо към 0) висши хармоници в изходния сигнал, отдаден в товара. Изборът на подходяща стойност на характеристичния импеданс според това изискване неизбежно довежда до по-ниска от максималната стойност на коефициента на усилване по мощност и по-голям от минималния коефициент на нелинейни изкривявания.

3.4. Оценка на симулационния модел и изводи към трета глава

Въз основа на казаното до тук може да се направи следната равносметка:

- Синтезиран е работещ функционален симулационен модел на радиочестотен усилвател в схемна конфигурация, която позволява детайлна симулация на изследваните режими на работа на активния елемент. В избраната симулационна среда моделът дава възможност за симулационно измерване и/или изчисление на всички честотно зависими електрически величини в целия им спектър, за да могат да бъдат целево подбрани данните за конкретни хармонични съставлящи на тези величини в съответствие със заложения в предходната глава математически модел.
- Синтезирана е методология и алгоритъм за провеждане на симулационно изследване на радиочестотен усилвател на мощност. Методологията въвежда условия, които да свеждат до минимум грешките и неточностите при измерването. Схемата на опитната постановка в симулационната среда и контролните точки са подбрани така, че да позволяват максимално коректно измерване и автоматизирано изчисление с инструментите на използваните симулационни компютърни приложения.
- Извършено е автоматизирано изчисление на всички величини, описани в математическия модел, зададен в предходната глава. Представителна част от данните от симулационното изследване е показано в подходящ графичен вид под формата на функционални зависимости в подходящо подбрани координатни системи и в табличен вид в приложението.
- Извършено е автоматизирано изчисление на пълния набор обективни критерии за двата усилвателя и сравнителен анализ

Изводи:

- Резултатите от проведените симулации потвърждават тезата, че оптимален компромис между отделните качествени показатели в зависимост от поставената задача е единствен начин за подобряване числените стойности на критериите за енергийна ефективност на усилването и качество на изходния сигнал.
- Възможно е повече от един качествен показател да бъде повишен, но винаги това става за сметка поне на един или повече от останалите качествени показатели. Потвърждава се и прогнозата, че тази оптимизационна задача не винаги има решение при конкретен набор от зададени изходни условия.

ГЛАВА 4. Експериментално изследване на мощен радиочестотен усилвател

Анализ на резултатите

3.5. Алгоритъм за провеждане на експериментално изследване

3.5.1. 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. 4.1 Блокова схема на опитната постановка

Сигнал генераторът изработва управляващ сигнал за мощния усилвател клас F. Използван е импулсен генератор PGP – 5 A с изходна честота до 50 MHz. За измерване на основните параметри на усилвателя изходната честота може да се променя в достатъчно широки граници и коефициентът на запълване на управляващия импулс може да се променя от нула до сто процента.

За да могат да се изследват и регулират параметрите на драйвера се използва регулируем стабилизирани захранващ източник VOLTcraft MS – 9160. Той е снабден с функционален сигнал генератор до 10 MHz, честотомер до 2,7 GHz, мултиметър, регулируем стабилизирани токоизправител (0÷30) V/3 A, стабилизирани токоизправители 5 V/ 2 A и 15 V/ 1A.

Изходната мощност P_o на усилвател клас F зависи и от стойността на захранващото напрежение U_{DC} . В процеса на изследване за да може да се задава желаната изходната мощност P_o . Усилвателят е захранен с регулируем токоизправител RFT 3217 (0 ÷ 30) V/10 A. Това позволява да се зададе и контролира консумираната постояннотокова мощност P_{DC} .

Отдаваната в товара изходна високочестотна мощност P_o е определена по два начина:

- пряко - чрез измерване с помощта на измервател на мощност CN-801 HP. Максималната измервана мощност е 200 W за честота (1,8 ÷ 200) MHz;
- косвено - чрез измерване на ефективната стойност напрежението U_o върху известното съпротивление на товара R и след това чрез аналитично изчисляване.

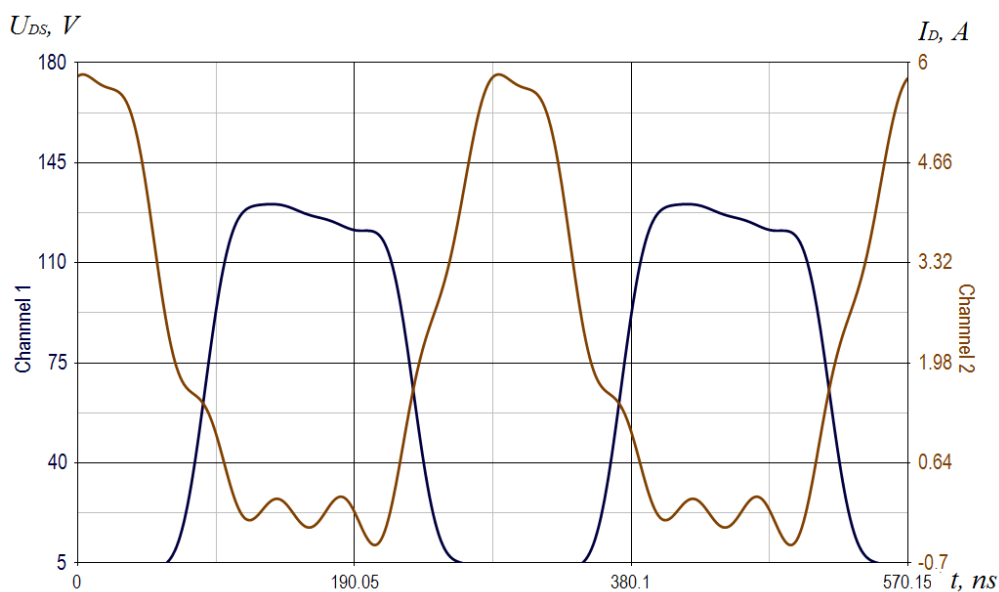
За измерване на изходното високочестотно напрежение U_o върху товара R_L са използвани:

- цифров волтметър В7-40 с детекторна високочестотна сонда до 1 GHz;

- цифров двуканален осцилоскоп Tektronix TDS 1002 (индикация на измерваните величини върху цифров дисплей с съхраняване на отчетените данни в подходящ табличен файлов формат.
- аналогов двуканален осцилоскоп VOLTcraft 6200 200MHz.

Формата на напреженията в различни контролни точки в схемата на мощен усилвател клас F е показана визуално с помощта на цифровия двуканален осцилоскоп TDS 1002 60 MHz.

Всички изследвания на параметрите на мощен усилвател клас F са извършени при активен товар, което съответства на съгласуван товар (например съгласуван фидер с антена при коефициент на стояща вълна близък до единица. За целта е измерена активната и реактивната съставка на товара при съответната работна честота чрез анализатор на импеданса на товара MFJ-259B.



Фиг.4.4. Осцилограма на вълновата форма на напрежението дрейн-сорс и дрейновия ток в активния елемент в режим клас F за работна честота 3.5 MHz с предавателна линия в товарната верига и синусоидален управляващ сигнал

Сигнал генераторът изработва управляващ сигнал за драйвера на мощния усилвател клас F. Използван е импулсен генератор PGP – 5 A с изходна честота до 50 MHz. За измерване на основните параметри на усилвателя изходната честота може да се променя в широки граници, а коефициентът на запълване да се изменя от нула до сто процента.

В процеса на изследване, за да може да се задава желаната изходната мощност P_o , усилвателят се захранва от регулируем токоизправител RFT 3217 (0 ÷ 30) V/10 A.

Това позволява да се определя и контролира и консумираната постояннотокова мощност P_{DC} . Отдаваната в товара изходна високочестотна мощност P_o е определяна чрез пряко измерване с измервател на мощност CN-801 HP. (Максималната измервана мощност е 200 W за честота (1,8 ÷ 200) MHz); и чрез косвено измерване на ефективната стойност напрежението U_o върху известно съпротивление на товара R и след това чрез аналитично изчисляване. За измерване на изходното високочестотно напрежение U_o

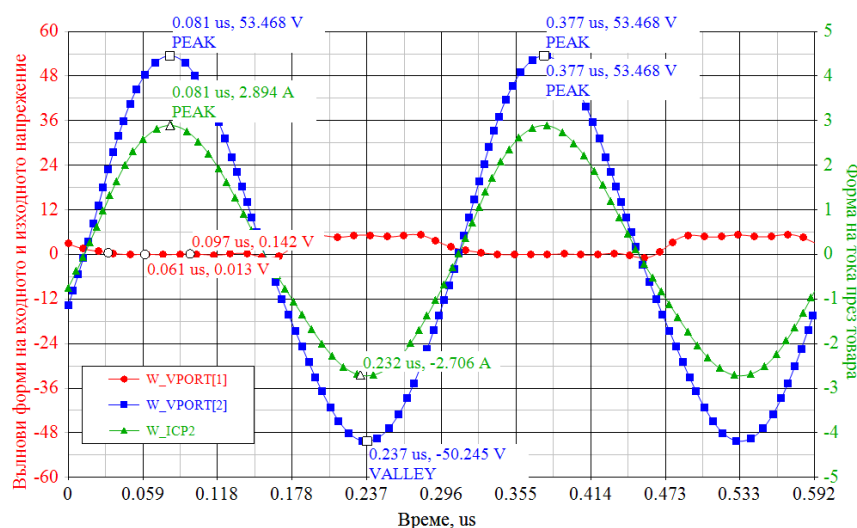
върху товара R са използвани аналогов двуканален осцилоскоп VOLTcraft 6200 200MHz с цифрова индикация на измерваните величини върху дисплея и цифров волтметър В7-40 с детекторна високочестотна сонда до 1 GHz;

Представената опитна постановка 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.

3.6. Експериментални резултати

Формите на изходния сигнал по напрежение и ток и на управляващия сигнал по напрежение са показани на фиг. 4.6. Формата на идеална синусоида е леко нарушена основно поради минимално наличие на 2-ри и 3-ти хармоници в изходния сигнал.



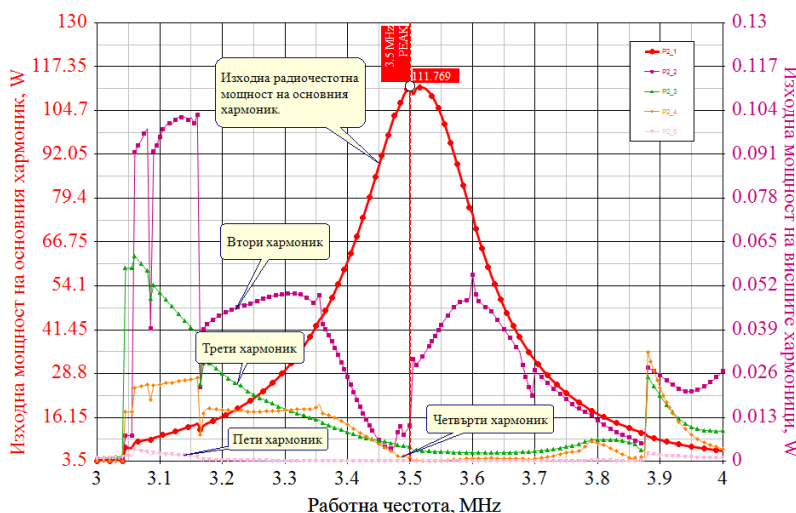
Фиг. 4.6. Форма на изходния сигнал и управляващия сигнал на усилвателно стъпало за режим клас F с четвърт - вълнова предавателна линия в товарната верига

Независимо от формата на управляващия сигнал (синусоидален или импулсен), и в двата случая се получава сравнително голямо усилване по напрежение. Наблюдава се видимо добро сфазирание на напрежението и тока през товара, което означава, че той почти няма реактивна съставка и може с много висока точност да бъде разглеждан като чисто активен товар.

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.

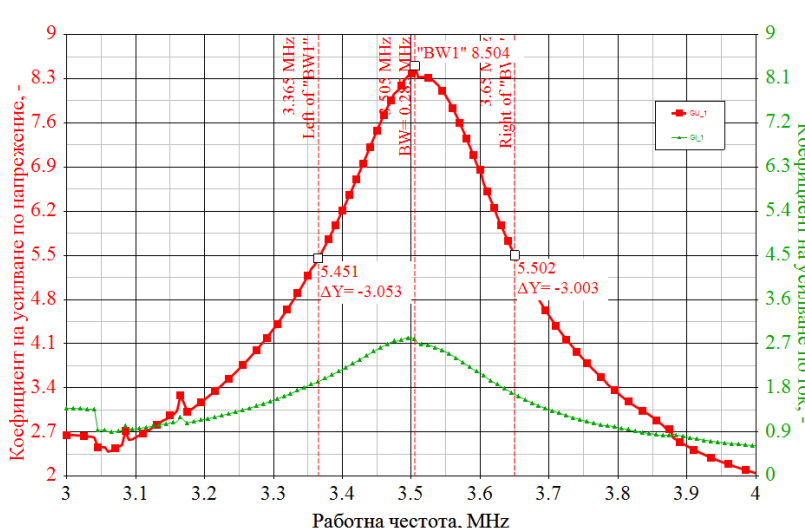
Това е едно от основните предимства на мощните усилватели клас F пред другите видове високоефективни усилватели.

На фиг. 4.8 са показани графично мощностите на висшите хармоници. Вижда се, че мощният радиочестотен усилвател действително има различни коефициенти на предаване за всеки от отделните хармоници, които се пораждат в товарната верига във всички случаи, когато работната честота се отклони от резонансната на трептящия кръг, съответно коефициентите на полезно действие и на усилване по мощност могат да се разглеждат като функции на честотата с вероятностен характер.



Фиг.4.8. Изходна радиочестотна мощност на отделните хармоници, представена като функция на честотата.

Амплитудно-честотната характеристика на усилвателя, построена въз основа на данните от експерименталното изследване е показана на фиг.4.9.



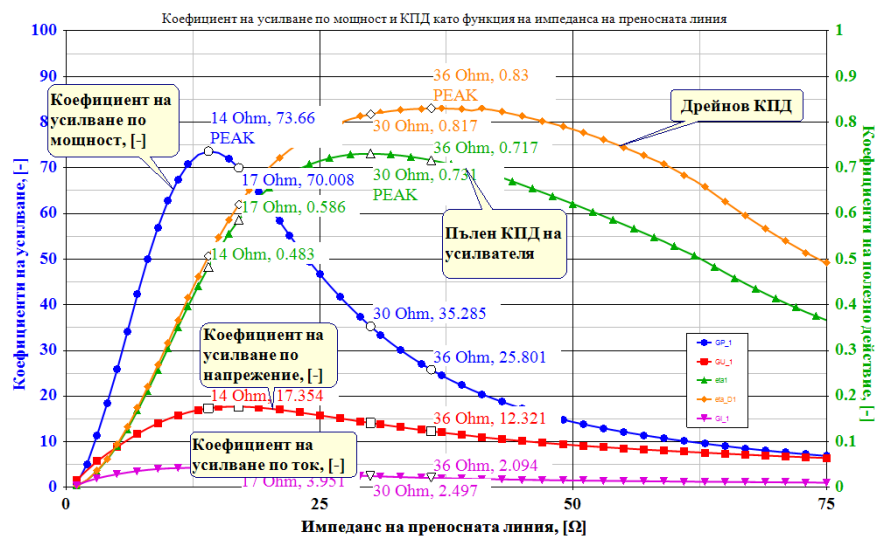
Фиг. 4.9. Амплитудно-честотна характеристика на усилвателя в режим клас F

Вижда се, че полученото максимално усилване по напрежение е 8.5 пъти (18.59dB) и се получава при честота 3.5 MHz, а честотната лента на пропускане има

ширина 285 kHz, определена от граничните честоти 3.36 MHz и 3,65 MHz. На същата графика са показани и съответните стойности на усилването по ток.

Честотната лента е относително тясна, но причината за това е резултат от оптимизирането на схемата по водещия критерий – пълнен коефициент на полезно действие.

На фиг.4.10 коефициентите на усилване и на полезно действие са представени като функции на импеданса на преносната линия в товарната верига на усилвателя в режим клас F. Коефициентът на усилване по ток има максимум 3.95 (11.93 dB) при импеданс на предавателната линия от 17 Ω , коефициентът на усилване по напрежение има максимум 17.4 (24.81 dB) при 14 Ω , а максимумът на коефициента на усилване по мощност е 73.7 (18.67 dB) също е при 14 Ω .



Фиг. 4.10. Коефициентите на усилване по мощност и на полезно действие, представени като функция на импеданса на предавателната линия

Дрейновият и пълният коефициент на полезно действие нарастват относително стръмно и практически линейно от 0_+ до около 17 Ω , между 20 Ω и 60 Ω се наблюдава плавно нарастване до максимумите на двата коефициента. Дрейновият КПД достига максималната си стойност 0.83 при импеданс на преносната линия 36 Ω , след която стойност започва плавно да намалява. Пълният КПД достига максималната си стойност 0.73 при импеданс на преносната линия 30 Ω , след която стойност също започва плавно да намалява.

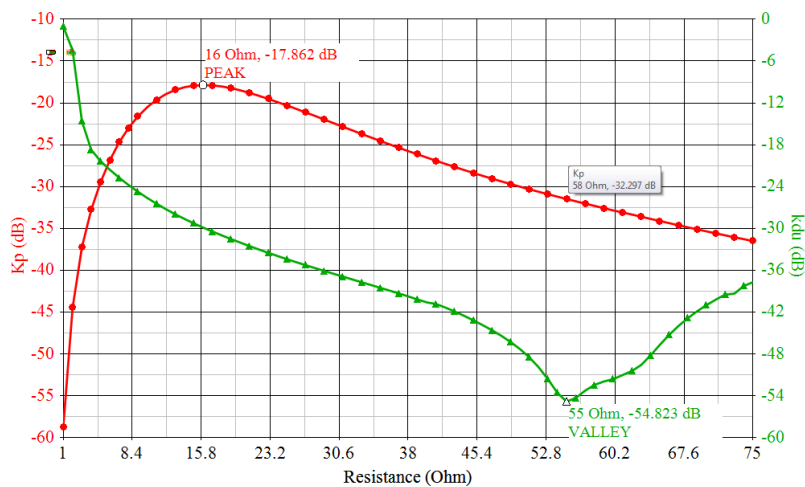
На фиг.4.11 са представени графично в обща координатна система коефициентът на усилване и пълният коефициент на полезно действие като функция на работната честота. Както е видно от графиката, максимумите на тези две функции не съвпадат. Коефициентът на усилване има максимум 49.1 (33.8dB) при честота 3.52 MHz, а пълният коефициент на полезно действие е 0.81 (81%) при честота 3.53 MHz.

От експерименталните резултати могат да се направят някои важни изводи:

Практически е невъзможно да бъдат постигнати максимуми на двете фамилии коефициенти (на усилване и на полезно действие) при една единствена стойност на импеданса на предавателната линия или дори в относително тесен толеранс.

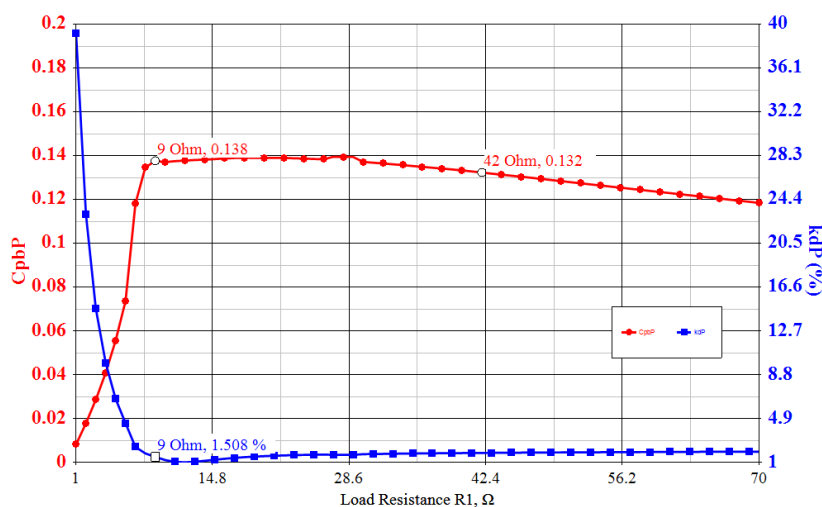
По тази причина, се налага да се намери и избере приемлив компромис между немаксимални стойности на двете групи коефициенти при една оптимална по този

критерий стойност на характеристичния импеданс на предавателната линия, който да удовлетворява останалите условия за съответния работен режим, а също и да осигурява достатъчно качество на изходния сигнал на усилвателя, който се отдава върху товара.



Фиг. 4.12. Сравнителен критерий по мощност и коефициент на нелинейни изкривявания в зависимост от импеданса на преносната линия

На фиг.4.12 е показана графично функционална зависимост на коефициента на усилване и на коефициента на нелинейни изкривявания от импеданса на преносната линия. Максималното усилване е -17.862 dB е достигнато при 16Ω , като след тази стойност започва да спада. Коефициентът на нелинейни изкривявания намалява монотонно докато достигне минимум -54.823 dB при 55Ω . За намиране на удовлетворителен компромис между тези величини е разумно да бъде избрана такава стойност (или диапазон) на характеристичния импеданс, който да осигурява изискванията за високоефективен режим на работа на активния елемент и на пълната схема на усилвателя с наличие на минимално количество (клонящо към 0) висши хармоници в изходния сигнал, отдаден в товара.



Фиг. 4.14. Коефициент на нелинейни изкривявания в зависимост от товара

На фиг.4.14 са показани измененията на коефициента на използване на мощността и коефициента на нелинейни изкривявания в зависимост от големината на товара. Двата показателя имат противоположна тенденция на изменение, но при стойности на товара по-големи от 9Ω видимо се стабилизират и в толеранс от няколко десетки ома имат незначително изменение, като коефициентът на използване на мощността монотонно спада, а коефициентът на нелинейни изкривявания нараства съвсем незначително.

Подробни данни от експерименталните измервания и изчисленията на представените в четвърта глава честотно зависими величини (коефициенти на полезно действие, коефициенти на усилване по напрежение, по ток и по мощност, числени критерии за обективно сравняване на радиочестотни усилватели) са показани в табличен вид в приложението към дисертационния труд – табл. П4.2.1 и табл. П4.2.2.

4.3. Анализ на експерименталното изследване и изводи към четвърта глава.

Въз основа на проектираното и проведено експерименталното изследване са постигнати следните резултати:

- Синтезиран е алгоритъм за провеждане на експериментално изследване на радиочестотен усилвател на мощност, който осигурява условия за свеждане до минимум грешките и неточностите, обичайно съпътстващи измерването.
- Изграден е експериментален макет на радиочестотен усилвател за режим клас F и опитна постановка за измерване на избрани електрически величини. Контролните точки върху макета са така подбрани, че да позволяват относително лесно и надеждно да бъде включена измервателната апаратура. Разработеният лабораторен модел на мощен високоефективен радиочестотен усилвател клас F с изходна мощност 186 W, работни честоти от 1 до 5 MHz и постигнати реални коефициенти на полезно действие: дрейнов коефициент на полезно действие $> 82\%$ и разширен коефициент на полезно действие $> 78\%$. Предназначението на лабораторния модел е предвидено основно за научни изследвания на различните режими на работа на усилвателя от промяна на параметрите на елементите в схемата му, така също и за провеждане на лабораторни упражнения при обучение на студенти по учебната дисциплина Радиокомуникационна техника.
- Постигната е близка до максимално постижимата практическа точност на измерванията благодарение на подходящо подбраната топология на блоковата схема на опитната постановка и целесъобразния избор на свързващите BNC-конектори и коаксиални кабели. При сигнали с основна честота до 4GHz и коаксиални свързващи кабели с характеристичен импеданс 50Ω , те осигуряват необходимата екранирана електрическа връзка за защита от нежелани радио шумове, нелинейни и честотни изкривявания.
- Експериментално измерените честотно зависими електрически величини са сравнени с получените данни от симулационното изследване описано в предходната глава. Въпреки известните отклонения между двете групи данни, може да бъде направен извод, че прогнозираните от симулационното изследване стойности на ключовите изследвани величини и динамиката на

тяхното изменение, се потвърждават от практическото измерване на същите величини при експерименталната опитна постановка;

- Проектираният усилвател при честота на основния хармоник 3.5 MHz постига максимален коефициент на усилване по мощност 16.79 dB (47.8 пъти) при полезна изходна радиочестотна мощност 51.96 dBm (157 W). Коефициентите на полезно действие, изчислени на базата на измерванията в лабораторията са съответно 0.79 за дрейновия КПД, 0.69 за разширения коефициент на полезно действие и 0.71 за пълния коефициент на полезно действие, а същите коефициенти получени в симулационното изследване са съответно 0.82 за дрейновия КПД, 0.73 за разширения коефициент на полезно действие и 0.74 за пълния коефициент на полезно действие.
- Изчислени са сравнителни критерии за двата начина на изследване на усилвателя и е направен сравнителен анализ. Получените данни са анализирани задълбочено и са оформени изводи и препоръки като потенциални възможности за подобряване на енергийните показатели при бъдещо проектиране на мощни радиочестотни усилвателни стъпала с еквивалентни схеми, базирани на изследваните в настоящата разработка.
- Получените разлики между експерименталния и симулираният резултат са в рамките на 3 - 4%. Това несъответствие вероятно е причинено от несъвършенството при ръчното калибриране на оборудването в лабораторията, от не съвсем точни стойности на градивните елементи, използвани за реализация на схемата. Въпреки прецизно изчислените съгласуващи звена на входа и изхода за 50Ω изходи, се получава известно несъответствие на изходните импеданси,

В. КЛАСИФИКАЦИЯ НА ПРИНОСИТЕ

Представеният дисертационен труд има следните научни, научно-приложни и приложни приноси:

1. Научни приноси:

- Синтезиран е математически модел (фиг. 2.4, фиг. 2.5 и зависимости 2.37, 2.48 и 2.86) за аналитично изследване на работата на радиочестотен усилвател в режим клас F – активният елемент е поставен в условия на работа като електронен ключ чрез филтриране на подходящи комбинации от висшите хармонични съставлящи на токовете и напреженията в товарната верига. Математическият модел представлява аналитично описание на формирането на необходимия спектър на напреженията и токовете в активния елемент и товарната верига, на спектралния баланс на мощностите, на комплексните коефициенти на предаване и отражение, както и на коефициентите на полезно действие.

2. Научно-приложни приноси:

- Синтезирани са симулационни модели на радиочестотни усилватели (фиг. 3.7, фиг. 3.11, фиг. 3.13, фиг. 3.17, фиг. 3.18, фиг. 3.22), които позволяват задълбочено изследване на режимните класове на работа на активния елемент. Те дават възможност за симулационно измерване и/или изчисление на всички честотно зависими електрически величини в целия честотен спектър, за да могат да бъдат определени техните параметри за отделните хармонични съставлящи.
- Предложени са алгоритъм за проектиране (фиг. 2.6, фиг. 2.7) и методична последователност (точки 3.1, 3.2, 3.3) за извършване на симулационно изследване на радиочестотни усилватели на мощност. Те въвеждат поставянето на условия, които да компенсират до минимум обективните неточности при измерването, включва нормирани критерии за сравняване на усилватели по ефективност и качество на изходния сигнал. Схемата на опитната постановка в симулационната среда и контролните възли са подбрани така, че да позволяват максимално коректно измерване и автоматизирано изчисление с инструментите на използваните симулационни софтуерни приложения.

3. Практико-приложни приноси:

- Реализирана е опитна постановка, подходяща за провеждане на измервания на ключови параметри и снемане на типични характеристики на радиочестотния усилвател в процеса на практическо обучение на студенти и докторанти по дисциплината „Радиокомуникационна техника“.

Г. ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- [A.1] Неделчев И., **Томов М.**, Проектиране на мощен радиочестотен усилвател клас А, Международна научна конференция - УНИТЕХ'2015 - Габрово, 20-21.11.2016, Том.ІІ, ISSN 1313-230X, стр.51-56
- [A.2] Неделчев И., **Томов М.**, Оптимизация на високоефективни мощни радиочестотни усилвателни схеми чрез автоматизиран S-матричен анализ - Научна конференция на РУ "А.Кънчев" 2016, Научни трудове на Русенски университет - 2016, ISSN 1311-3321, том 55, серия 3.2. стр.8-12
- [A.3] Неделчев И., Садинов С., **Томов М.**, Мощен радиочестотен усилвател клас Е, паралелна схема, Международна научна конференция - УНИТЕХ'2016 - Габрово, 18-19.11.2016, Том.ІІ, ISSN 1313-230X, стр.102-107
- [A.4] **Томов М.**, Оптимизация на общоприети модели на активния елемент в радиочестотен усилвател според целите на изследване - УНИТЕХ'2017 - Габрово, 17-18.11.2017, Том.ІІ, ISSN 1313-230X, стр.83-88
- [A.5] **Томов М.** , Садинов С., Алгоритъм за проектиране на мощно крайно радиочестотно усилвателно стъпало клас F - УНИТЕХ'2019 - Габрово, 15-16.11.2019, Том.І, ISSN 1313-230X, стр.316-318
- [A.6] **Томов М.**, Баланс на ефективност и качествени показатели на радиочестотен усилвател клас F - УНИТЕХ'2021 - Габрово, 19-20.11.2021, Том.І, ISSN 1313-230X, стр.189-193

RF POWER AMPLIFIERS WITH INCREASED ENERGY INDICATORS

Author: Miroslav Borislavov Tomov

ABSTRACT:

The dissertation examines some of the modern methods related to improving the efficiency of the RF power amplifiers. The optimization of the electrical power consumption of the RF amplifiers is a key factor in the search for methods to improve the performance of the transmitters in wireless communication networks and it defines the main objective of the dissertation thesis - to present and study the proper actions in the processes of that improvement.

The relevance of the topic is high as it is aimed not only at new theoretical developments for analysis and study of losses due to undesirable phenomena in the HF power amplifier, but also to create systematic engineering methods for applied quality design of high-performance amplifiers in optimal mode.

The subject of the research is the direct influence of the changes in some parameters of the elements, building the HF power amplifier on its qualitative indicators, as well as the simulation and experimental confirmation of the theoretically derived dependencies between them.

The research methods are differentiated in the separate chapters, as theoretical (Chapter 2), simulation (Chapter 3) and experimental study of the amplifiers' efficiency (Chapter 4), and cover the dependences of the parameters, characterizing the realization of separate models.

The goal of the dissertation is to study the processes in powerful radio frequency amplifiers in optimal and critical modes of operation in terms of their energy consumption efficiency. The following tasks have been set for the realization of the formulated goal:

- To synthesize a mathematical model for analytical study of some characteristic modes of operation of radio frequency amplifiers.
- To define a mathematical criterion for comparison of radio frequency amplifiers in terms of efficiency and quality of the signal conversion.
- To synthesize a precise simulation model, the realization of which is based on the given mathematical model.
- To be simulated and experimentally established which of the parameters of the electronic circuit and the mode parameters of the amplifier have an impact on these two main quality indicators and how significant it is.

Keywords:

RF amplifiers, power amplifiers, wireless communication, radio transmitter