

Opinnäytetyö (AMK)

Elektroniikan koulutusohjelma

Elektroniikkasuunnittelu

2017

Otto Kuusisto

# RF-VAHVISTIMEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS 868 MHZ:LLE

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikan koulutusohjelma | Elektroniikkasuunnittelu

2017 | 31

Otto Kuusisto

# RF-VAHVISTIMEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS 868 MHZ:LLE

Opinnäytetyön aiheena oli suunnitella ja toteuttaa RF-vahvistin LoRan (langattoman tiedonsiirron teknologia) taajuusalueelle 868 MHz. Työn tavoitteena oli toteuttaa vahvistimen sovituspierit fyysisillä komponenteilla. Mahdollisia sovituspierijä olivat L-,  $\pi$ - ja T-sovituspieri.

Kaikista sovituspierieistä tehtiin simulaatiot, joissa simuloitiin vahvistusta, heijastus- ja läpäisyvasteet. Vahvistimen vaatimuksina olivat, että vahvistus olisi +15 dB ja sovituksissa < -10 dB. Simulaatiotulosten perusteella valittiin T-sovituspieri, jota lähdettiin toteuttamaan.

Mittauksissa mitattiin vahvistinpiirin vahvistus ja heijastusvaimennukset. Mittausten tulokset olivat kohtalaisia. Mittausten perusteella tehtiin muutoksia komponentteihin. Lopputuloksena saatiin aikaa vahvistin, joka täytti asetetut vaatimukset.

ASIASANAT:

radiotaajuus, vahvistin, radiotekniikka, LoRa, sovituspieri

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Electronics design

2017 | 31

Otto Kuusisto

## DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN RF AMPLIFIER FOR 868 MHZ

The subject of this thesis was to design and to build an RF amplifier for LoRa (a technology of wireless communication) frequency range 868 MHz. The goal of this project was to implement the impedance matching of the amplifier with physical components. Possible impedance matching networks are L,  $\pi$  and T network.

Simulations of all the network types were made. Gain and return loss were simulated. Specification of amplifier were gain +10 dB and return loss < -10 dB. T network was the network that was chosen for implementation.

In measurements amplifier gain and return loss were measured. First results of measurements were moderate. Changes were made to components due the results of measurements. The final result was an RF amplifier that met the specifications.

### KEYWORDS:

radio frequency, amplifier, radio technology, LoRa, impedance matching

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>6</b>
<b>2 LORA</b>	<b>7</b>
<b>3 SOVITUSPIIRIT</b>	<b>8</b>
3.1 L-sovituspiiri	8
3.2 $\pi$ -sovituspiiri	10
3.3 T-sovituspiiri	11
<b>4 SIMULAATIOT</b>	<b>12</b>
<b>5 TOTEUTUS JA MITTAUKSET</b>	<b>18</b>
<b>6 YHTEENVETO</b>	<b>29</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>31</b>

## LIITTEET

Liite 1. Transistori Infineon BFP420 datalehti

## KUVAT

Kuva 1. LoRa tukiasemien kattama alue Münchenissä. [2]	7
Kuva 2. Lähde- ja kuormaimpedanssien reaktanssien kumoutuminen. [5]	8
Kuva 3. Neljä mahdollista L-sovituspiirin rakennetta. [5]	9
Kuva 4. Mahdolliset rakennevaihtoehdot $\pi$ -sovituspiirille. [5]	10
Kuva 5. T-sovituspiirin mahdolliset rakenteet. [5]	11
Kuva 6. Stabiilisuusympyrät rajaavat transistorin stabiilisuusalueen.	12
Kuva 7. Vahvistusympyrät näyttävät mahdollisen vahvistuksen halutulla taajuudella ja r- ja x-parametrit.	13
Kuva 8. L-sovituspiirien simulaatioarvot.	14
Kuva 9. Sisään- ja ulostulon simulaatioarvot $\pi$ -sovituspiireillä.	14
Kuva 10. T-sovituspiirien simulaatioarvot sisään- ja ulostulossa.	15
Kuva 11. Sovituspiirien amplitudivasteet verrattuna MSG:hen	15
Kuva 12. Sovituspiirien amplitudivasteet verrattuna MSG:hen pienemmällä taajuusalueella.	16

Kuva 13. L-sovituspöirien läpäisy ja heijastusvaimennukset.	16
Kuva 14. Läpäisy ja heijastusvaimennukset $\pi$ -sovituspöireillä toteutetulla vahvistimella.	17
Kuva 15. T-sovituspöirein simuloitun vahvistimen läpäisy ja heijastusvaimennukset.	17
Kuva 16. RF-vahvistimen kytkentäkaavio	18
Kuva 17. Ensimmäinen versio RF-vahvistimesta.	19
Kuva 18. Vahvistimen vahvistus jäi negatiiviseksi, milloin se vaimentaisi signaalia.	20
Kuva 19. Sisääntulon sovitus ei ollut sellainen, mitä haluttiin.	20
Kuva 20. Myöskään ulostulon sovitus ei ollut vaatimusten mukainen.	21
Kuva 21. RF-vahvistimen toinen versio.	22
Kuva 22. Vahvistus täyttää vaatimukset, mutta maksimi vahvistus on vielä alemmalla taajuudella.	22
Kuva 23. Sisääntulon paras sovitus on vielä alemmalla taajuudella.	23
Kuva 24. Ulostulon sovitus ei ollut, mitä haluttiin.	24
Kuva 25. Vahvistus ja sisääntulon sovitus paranivat hieman, mutta ulostulon sovitus ei vastannut haluttua sovitusta.	25
Kuva 26. Vahvistus ja sovitukset paranivat, kun sovituspöirien keloja pituuksia muutettiin.	26
Kuva 27. Vahvistus parani, mutta silti amplitudivasteen huippu jäi alemmalle taajuudelle.	27
Kuva 28. Sovitukset paranivat, mutta silti jäivät halutuista arvoista.	28
Kuva 29. RF-vahvistimen viimeisin versio.	28

# 1 JOHDANTO

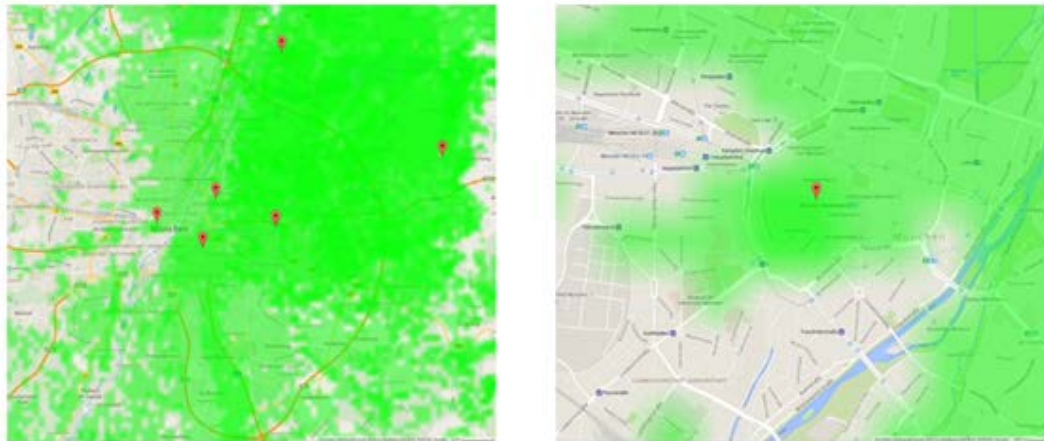
Tämän hetken maailmassa internetillä on suuri rooli ihmiselle, koska internetin avulla voidaan hakea tietoa asioista ja kommunikoida muiden ihmisten kanssa. Esineiden internetissä (Internet of things (IoT)) voidaan ohjata laitteita esimerkiksi kodinkoneita internetin välityksellä. LoRa (Long Range) on Semtech Corporation kehittämä langaton alusta esineiden internetille [1]. Tämän opinnäytetyön aiheena on suunnitella ja toteuttaa RF-vahvistin LoRan toiminta-alueelle, joka on 868 MHz.

Työn tavoitteena on toteuttaa vahvistin sovituspireillä, joita tulee kaksi. Ensimmäinen sovituspirei tulee transistorin tulolle ja toinen tulee lähdölle. Mahdollisia sovituspirejä ovat L-,  $\pi$  - ja T-piirit, jotka ovat saavat nimensä muotonsa mukaan. Tarkoituksena olisi myös saada vahvistusta enemmän kuin 15 dB ja sovituksissa saisivat olla epärempia kuin 10 dB. Kaikista piireistä tehdään simuloinnit, joiden perusteella valitaan, mikä piireistä toteutetaan. Piirin valintaan vaikuttavia asioita ovat muun muassa vahvistusvasteen muoto, annetut laatuvaatimukset ja piirien toteutuskelpoisuus. Mahdollisia ongelmia työn aikana tulevat olemaan muun muassa, miten valikoitu piiri toimii mittauksissa, kun otetaan huomioon mahdolliset hajasuureet, joita simulointiohjelma AWR ei ota huomioon.

## 2 LORA

LoRa on Semtech Corporationin kehittämä pitkämatkainen ja vähätehoinen langaton alusta esineiden internetille. Esineiden internetillä eli Internet of things (IoT) tarkoitetaan, että internetin kautta voidaan ohjata laitteita esimerkiksi lamppuja. LoRa-tekniikka voidaan myös sisällyttää esimerkiksi autoihin, kodinkoneisiin ja puettaviin laitteisiin. LoRa tulee sanoista Long Range, joka tarkoittaa pitkää etäisyyttä. LoRan perusideana on alusta, joka ei ole riippuvainen matkapuhelinverkosta and Wi-Fi:stä. Euroopassa LoRa toimii taajuudella 868 MHz. [1][2][3][4]

Tärkeimmät ominaisuudet LoRa:ssa ovat sen pienitehoisuus, suorituskyky ja pitkä käyttöikä. Pienitehoisuuden etuna on, että laitteita voidaan käyttää pidemmän aikaa. Yksi LoRa tukiasema tukee miljoonia viestejä. Näin ollen LoRa sopii hyvin yleisille operaattoreille, jotka palvelevat useita asiakkaita. Yhden LoRa-tukiaseman kantama on enemmän kuin 15 km. Kantama ei muutu, vaikka tukiasema sijaitisi tiiviissä kaupunkiympäristössä ja sisätiloissa. Kuvasta 1 voidaan huomata, että 15 km kantaman ansiosta muutamalla LoRa-tukiasemalla voidaan kattaa suurin osa kaupungin pinta-alasta. [1][2][3][4]

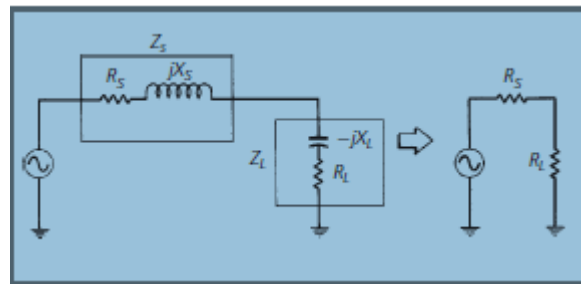


**Kuva 1.** LoRa tukiasemien kattama alue Münchenissä. [2]

### 3 SOVITUSPIIRIT

Sovituspiirillä tarkoitetaan piiriä, jonka tarkoituksena on sovittaa kuorma- ja lähdeimpedanssi saman kokoiseksi ja saada mahdollisimman suuri tehon siirto. Kuormaimpedanssin ( $Z_L$ ) pitää olla yhtä suuri lähdeimpedanssin ( $Z_S$ ) liittoluvun kanssa. Jos kuormaimpedanssi on muotoa  $Z_L = R + jX$ , niin lähdeimpedanssin tulee olla muotoa  $Z_S = R - jX$ .

Kuvasta 2 näkyy miten lähderesistanssi (vastus) on sarjassa  $+jX$  (kela) reaktanssikomponentin kanssa. Näistä kahdesta muodostuu lähdeimpedanssi  $Z_S = R_S + jX$ . Lähdeimpedanssin kanssa sarjassa on kuormaimpedanssi  $Z_L = R_L - jX$ , joka muodostuu vastuksesta ja  $-jX$  (kondensaattori) reaktanssikomponentista. Näin ollen lähde- ja kuormaimpedanssien reaktanssit kumoavat toisensa ja jäljelle jäävät ainoastaan tulo- ja lähtöresistanssit. Tällöin saadaan suurin mahdollinen teho lähteestä kuormaan.

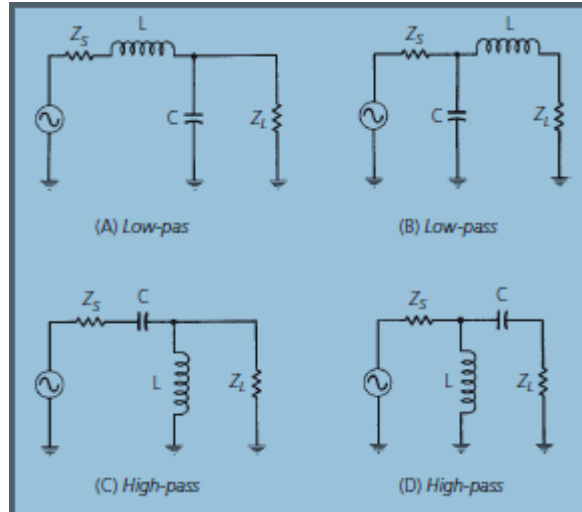


**Kuva 2.** Lähde- ja kuormaimpedanssien reaktanssien kumoutuminen. [5]

#### 3.1 L-sovituspiiri

L-sovituspiiri on kaikista sovituspiireistä yksinkertaisin, ja siksi myös eniten käytetty sovituspiiri. Nimi L-sovituspiiri tulee siitä, että piiri muistuttaa muodoltaan L-kirjainta. Sovituspiirissä on neljä mahdollista rakennetta, miten komponentit (kela ja kondensaattori) voidaan sijoittaa paikalleen. Rakenteiden perusteella nähdään suodattaako sovituspiiri korkeat vai matalat taajuudet. Kuvasta 3 nähdään mitkä rakenteet toimivat alipäästö- ja ylipäästösuodattimena.





**Kuva 3.** Neljä mahdollista L-sovituspäiriin rakennetta. [5]

Laskentakaavat L-sovituspäiriin ovat yksinkertaisia. Molempien sekä sarja- että rinnan- haaran hyvyysluvat ovat yhtä suuret ja ne lasketaan samalla kaavalla:

$$Q_s = Q_p = \sqrt{\frac{R_p}{R_s} - 1} \quad (1)$$

Kaavassa 1  $R_p$  on rinnankytkennän resistanssi ja  $R_s$  on sarjakytkennän resistanssi. Hyvyysluvat voidaan myös laskea kaavoilla:

$$Q_s = \frac{X_s}{R_s} \quad (2)$$

$$Q_p = \frac{R_p}{X_p} \quad (3)$$

Kaavojen 2 ja 3 perusteella yleisesti ratkaistaan arvot sarja- ja rinnanreaktansseille ( $X_s$  ja  $X_p$ ). Kun kyseiset arvot on laskettu, voidaan laskea komponenttiarvot sarja- ja rinnanreaktansseille. Kelalle ja kondensaattorille ovat omat kaavat komponenttiarvojen laske- miselle:

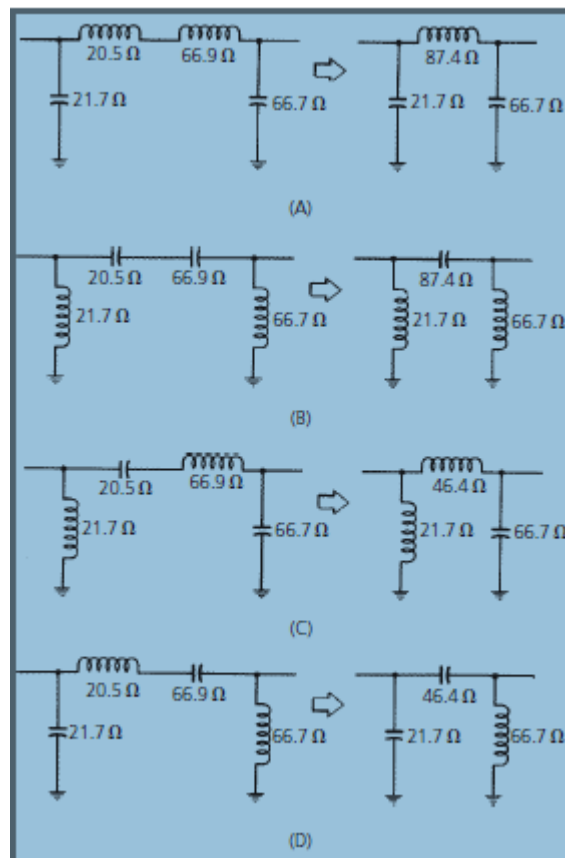
$$L = \frac{X}{\omega} \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{\omega X} \quad (5)$$

$$\text{joissa } \omega = 2\pi f \quad (6)$$

### 3.2 $\pi$ -sovituspääri

$\pi$ -sovituspääri saa nimensä rakenteen muodosta, joka muistuttaa kreikkalaista  $\pi$ -kirjainta. Pääriä voidaan kuvata parhaiten kahtena peräkkäisenä L-sovituspääriinä, jotka molemmat voidaan sovittaa lähtöön ja tuloon virtuaalisen resistanssin avulla. Virtuaalinen resistanssi sijaitsee L-päärien välissä. Samoin kuin L-sovituspääriissä myös  $\pi$ -sovituspääriillä on neljä mahdollista rakennetta, kuten kuvasta 4 voidaan huomata.



**Kuva 4.** Mahdolliset rakennevaihtoehdot  $\pi$ -sovituspääriille. [5]

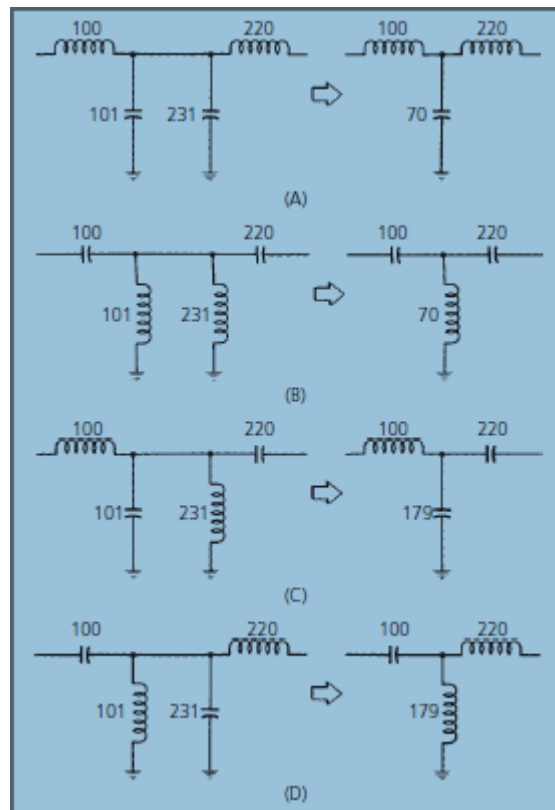
$\pi$ -sovituspääriillä on myös samanlaiset laskentakaavat kuin L-sovituspääriillä muutamaa kaavaa lukuun ottamatta. Hyvyyssluvun voi valita itse ja sen perusteella lasketaan virtuaalinen resistanssi.  $\pi$ -sovituspääriissä hyvyyssluku määräytyy  $R_S$ :n ja  $R_L$ :n suuruuden mukaan siten, että suurempaa näistä käytetään laskussa mukana.

$$Q = \sqrt{\frac{R_H}{R} - 1} \quad (7)$$

jossa  $R$  on virtuaalinen resistanssi ja  $R_H$  on suurempi  $R_S$ :stä ja  $R_L$ :stä

### 3.3 T-sovituspiiri

T-sovituspiiri muistuttaa  $\pi$ -sovituspiiriä, mutta on T-kirjaimen muotoinen. Tämä sovituspiiri hyödyntää myös virtuaalista resistanssia. T-piirillä on muiden sovituspiirien mukaisesti neljä mahdollista rakennetta, jotka voidaan huomata kuvasta 5.



**Kuva 5.** T-sovituspiirin mahdolliset rakenteet. [5]

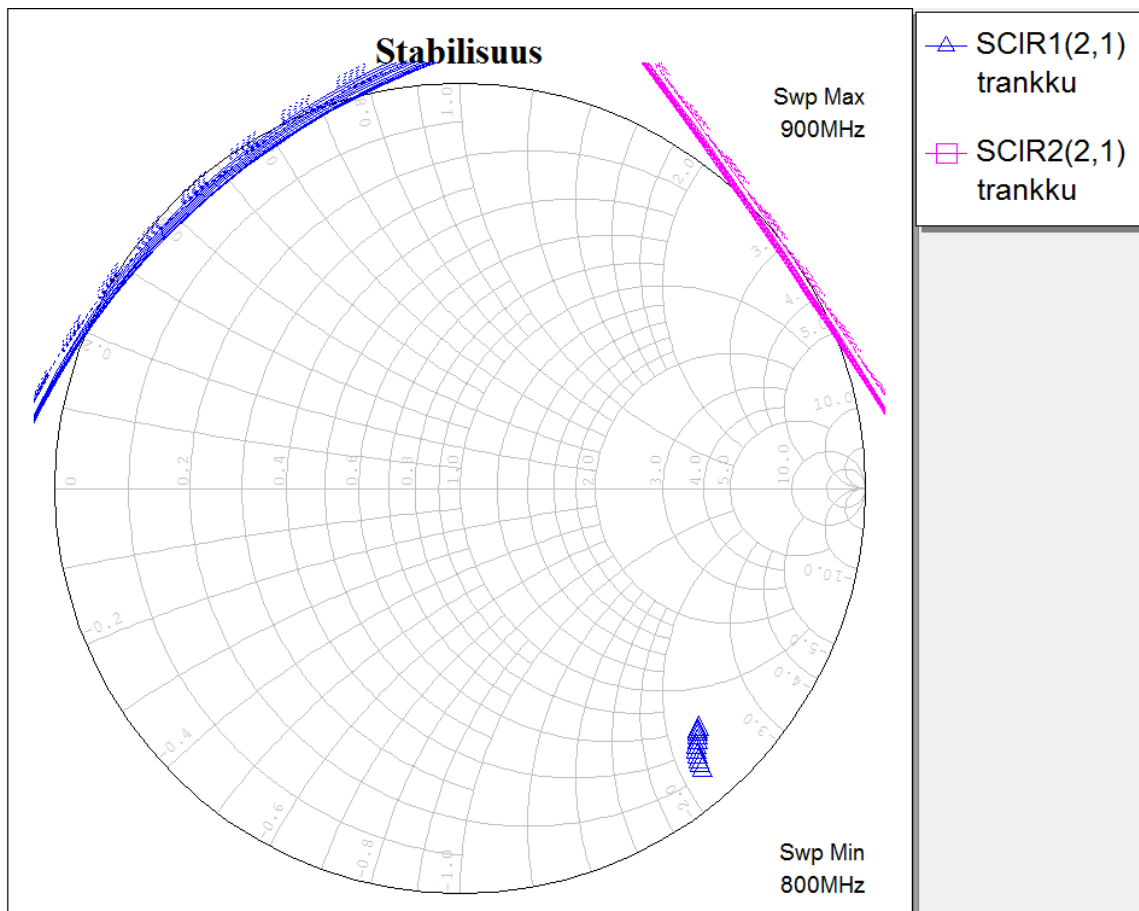
T-sovituspiirin laskentakaavat ovat samat kuin  $\pi$ -sovituspiirillä.

$$Q = \sqrt{\frac{R}{R_{\text{pienempi}}} - 1} \quad (8)$$

jossa  $R$  on virtuaalinen resistanssi ja  $R_{\text{pienempi}}$  pienempi  $R_S$ :stä ja  $R_L$ :stä

## 4 SIMULAATIOIT

Simulaatioissa aloitettiin tutkimalla millaiset ovat piirissä käytettävän Infineon BFP420 transistorin stabiilisuus ja vahvistus LoRan käyttöalueella. Transistorin stabiilisuus simuloitiin stabiilisuuskertoimien avulla. Lisäksi piirrettiin stabiilisuusympyröitä, jotka rajaavat Smithin kartasta lähde- ja kuormaimpedanssien alueet, joilla vahvistin on stabiili tai epästabiili. Kuvasta 6 nähdään, miten ympyrät ovat rajanneet kartan reunalta alueet, joilla värähtelyriski on suuri taajuusalueella 800-900 MHz.

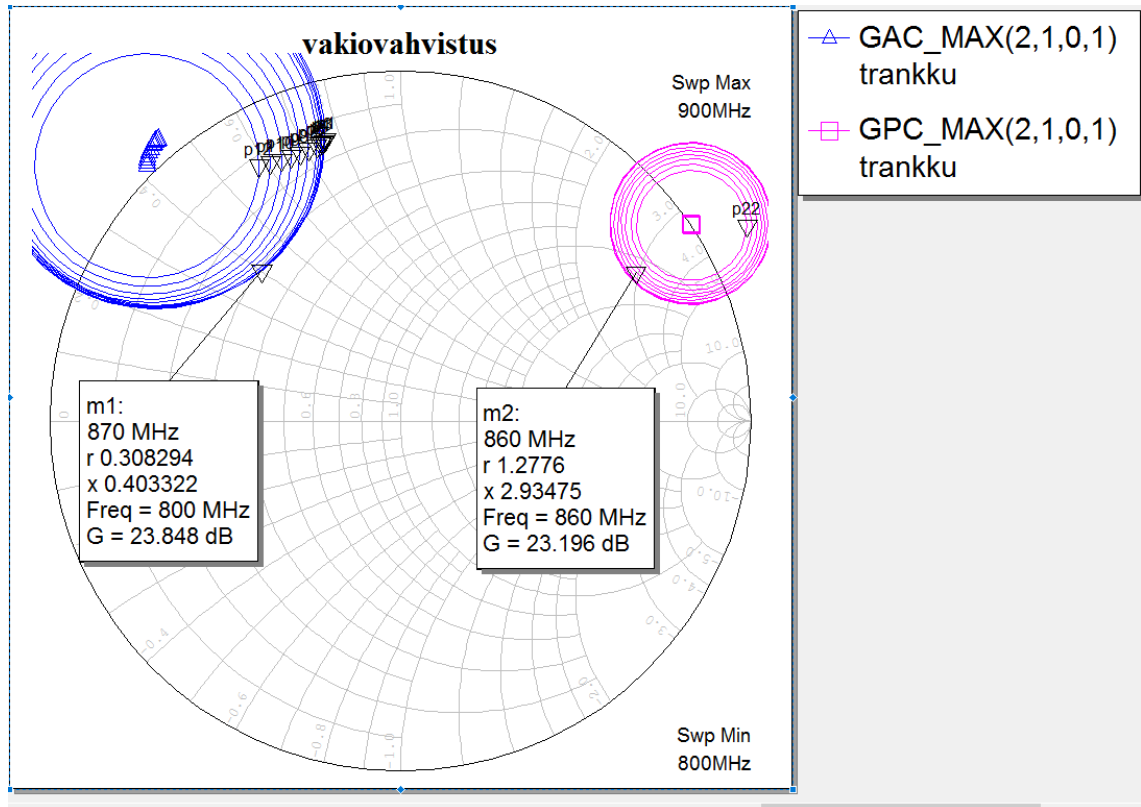


**Kuva 6.** Stabiilisuusympyrät rajaavat transistorin stabiilisuusalueen.

Kuten kuvasta 6 nähdään, että stabiilisuusympyrät rajaavat Smithin kartalta alueen, joka on stabiili ja jättävät ulkopuolelle alueen, joka ei ole stabiili. Tämän takia transistorin vahvistus simuloitiin MSG:n avulla. MSG on suurin mahdollinen stabiili vahvistus.

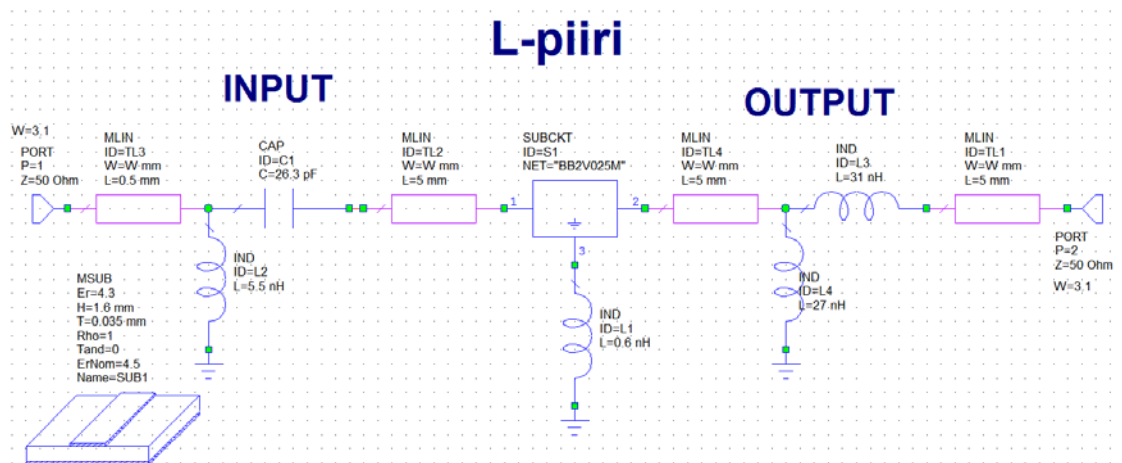
Vakiovahvistusympyröillä kuvataan vahvistuksen riippuvuutta impedanssista. Ympyröistä saatiin selville millainen olisi vahvistus transistorin tulo- ja lähtösovituksen mukaan.

Nämä ympyrät ovat GAC\_MAX ja GPC\_MAX, joista GAC\_MAX simuloi lähde- ja GPC\_MAX kuormaimpedanssin vaikutusta vahvistukseen. Ympyröistä nähdään myös impedanssit r- ja x-parametrein, jotka vastaavat resistanssia ja reaktanssia. Kuvan 7 avulla valittiin lähde- ja kuormaimpedanssit, joiden perusteella sovituspiirit mitoitettiin.

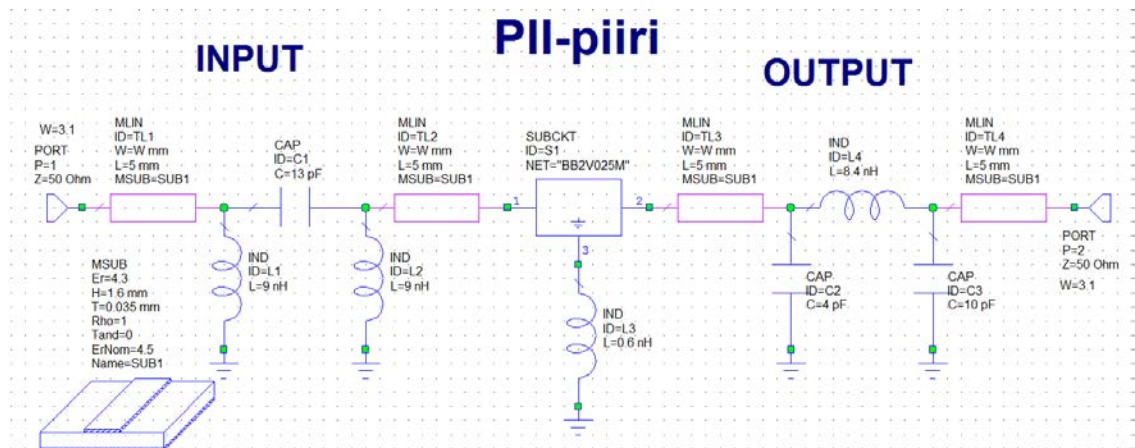


**Kuva 7.** Vahvistusympyrät näyttävät mahdollisen vahvistuksen halutulla taajuudella ja r- ja x-parametrit.

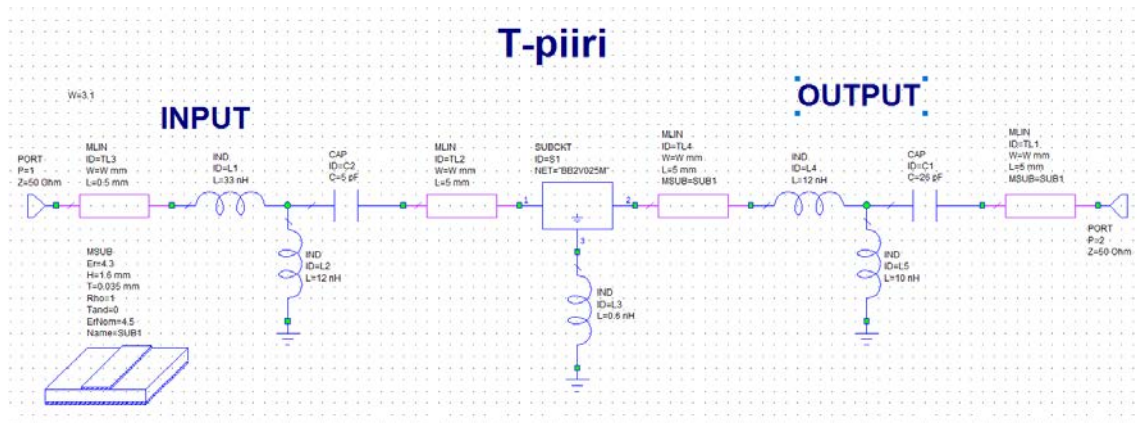
Jokainen sovituspiiri mitoitettiin samalla tavalla, missä ne mitoitettiin transistorin sisään- ja ulostuloon. Sisään- ja ulostulon sovitukset tehtiin ensin erikseen valituille r- ja x-parametreille. Sovituksissa muuteltiin komponenttien arvoja niin, että kondensaattorit ovat olemassa pintaliitoskomponenttina ja keloja on mahdollista tehdä kuparilangasta. Alla olevissa kuvissa on L-,  $\pi$ - ja T-sovituspiirien mitoitukset transistorin sisään- ja ulostuloon.



Kuva 8. L-sovituspiirien simulaatioarvot.

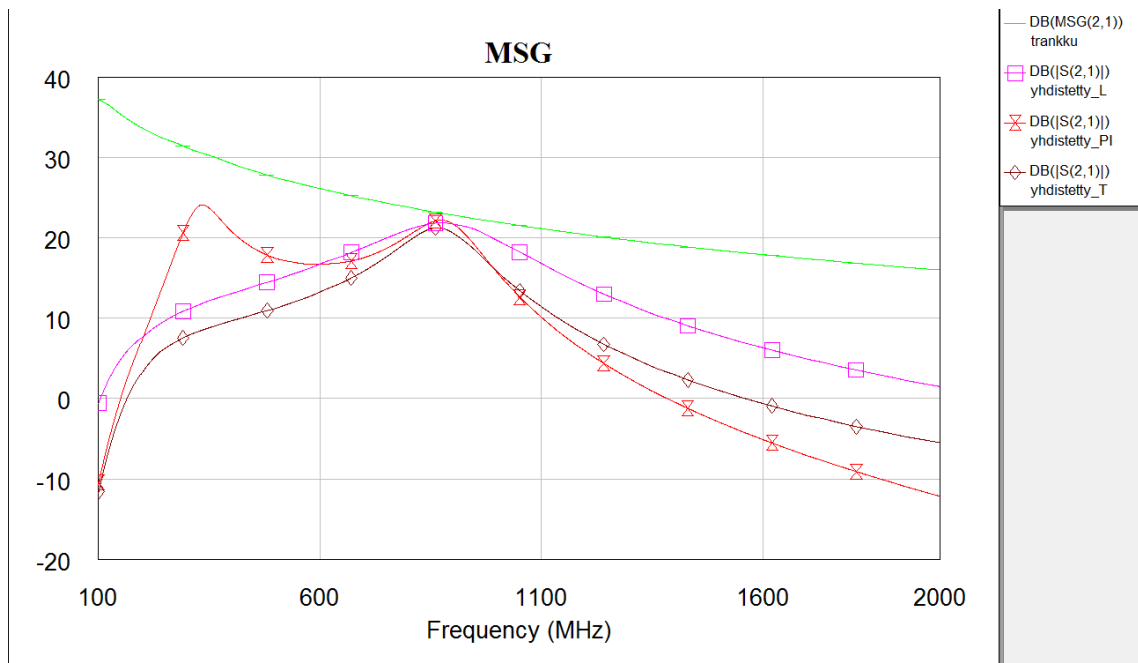


Kuva 9. Sisään- ja ulostulon simulaatioarvot  $\pi$ -sovituspiireillä.

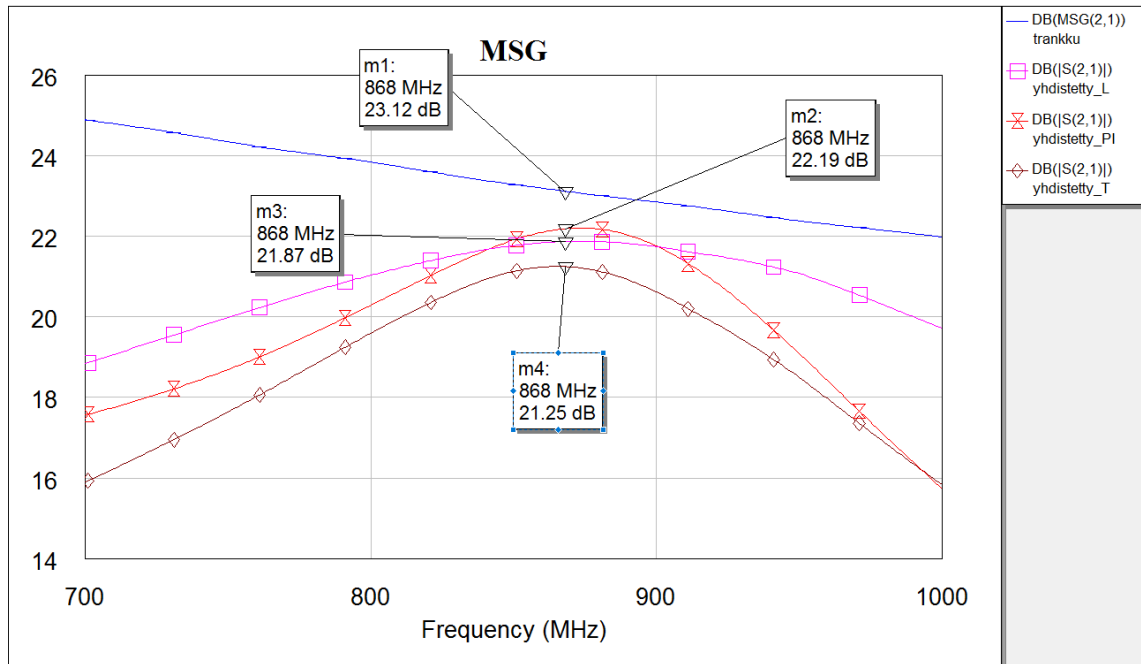


**Kuva 10.** T-sovituspiirien simulaatioarvot sisään- ja ulostulossa.

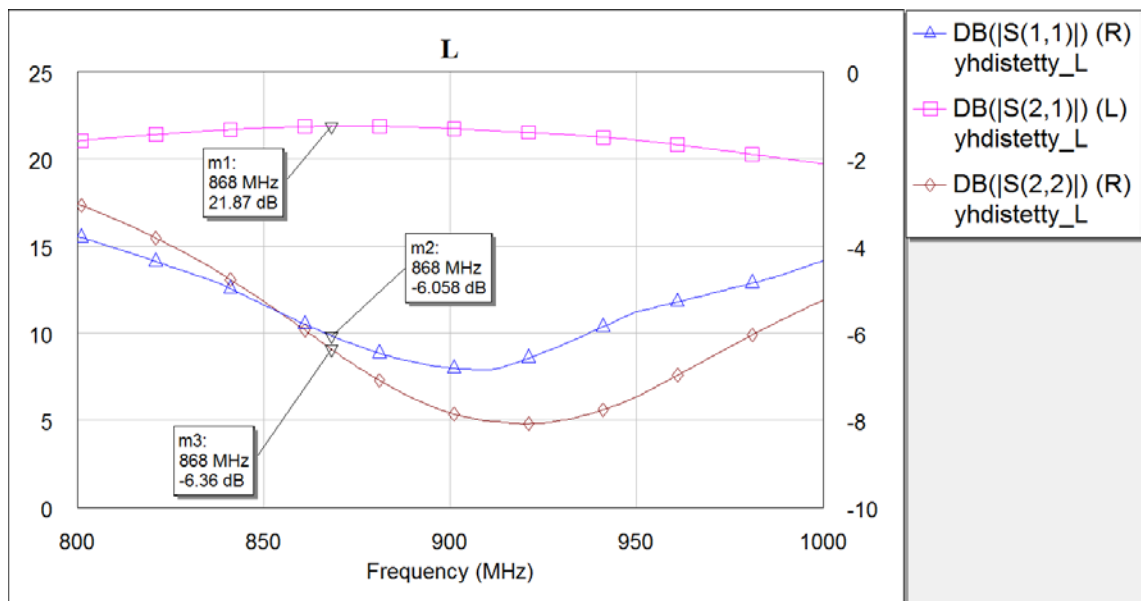
Transistorin sisään- ja ulostuloon lisättiin sovituspiirit, minkä jälkeen koko piirin vahvistusta verrattiin MSG:hen ja samalla simuloitiin myös  $S_{11}$ -,  $S_{21}$ - ja  $S_{22}$ -parametrit.  $S_{11}$  on ykkösportin heijastusvaimennus, kun taas  $S_{21}$  on piirin läpäisy eli amplitudivaste ja  $S_{22}$  on kakkosportin heijastusvaimennus. Alla olevista kuvista nähdään piirien vahvistus verrattuna MSG:hen ja jokaisen piirin  $S_{11}$ -,  $S_{21}$ -ja  $S_{22}$ -parametrit.



**Kuva 11.** Sovituspiirien amplitudivasteet verrattuna MSG:hen

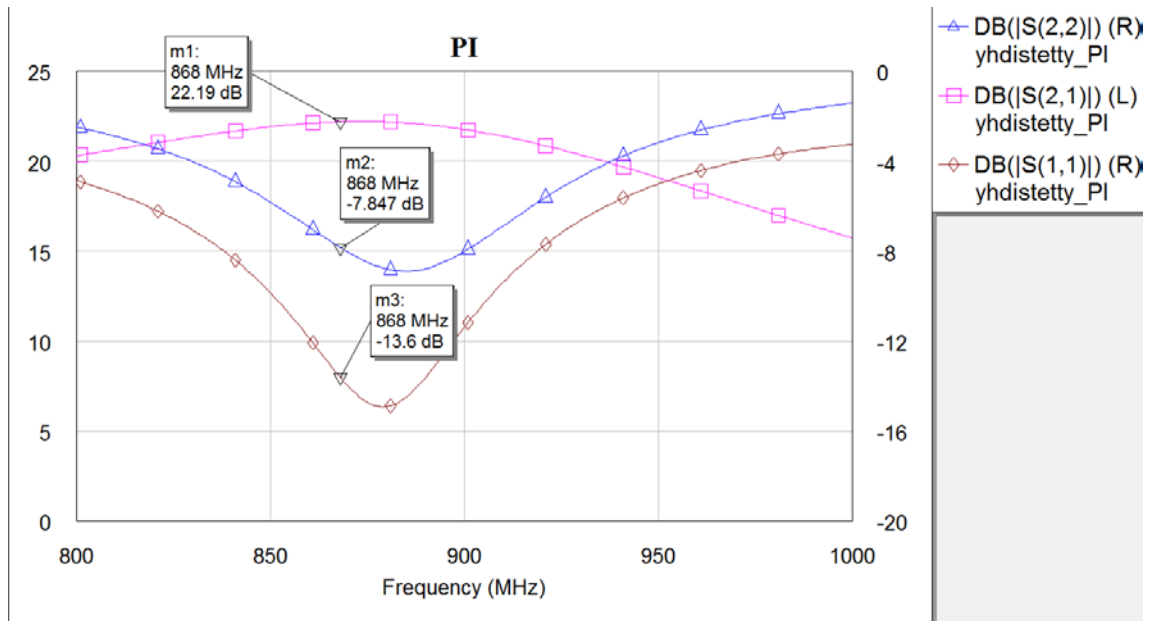


**Kuva 12.** Sovituspiirien amplitudivasteet verrattuna MSG:hen pienemmällä taajuusalueella.

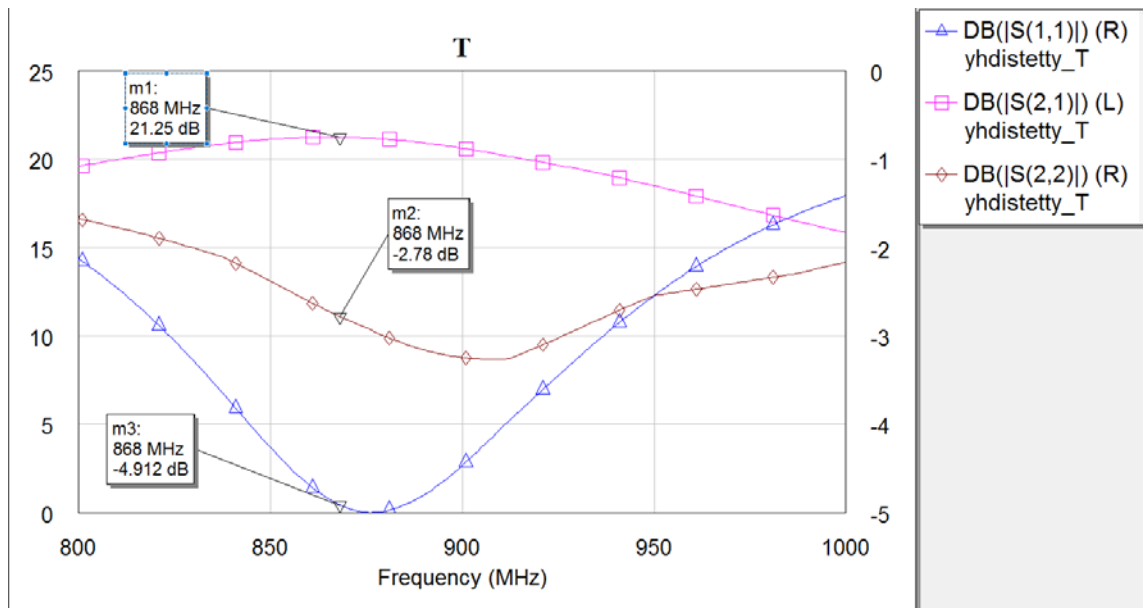


**Kuva 13.** L-sovituspiirien läpäisy ja heijastusvaimennukset.





**Kuva 14.** Lämpäisy ja heijastusvaimennukset  $\pi$ -sovituspiireillä toteutetulla vahvistimella.

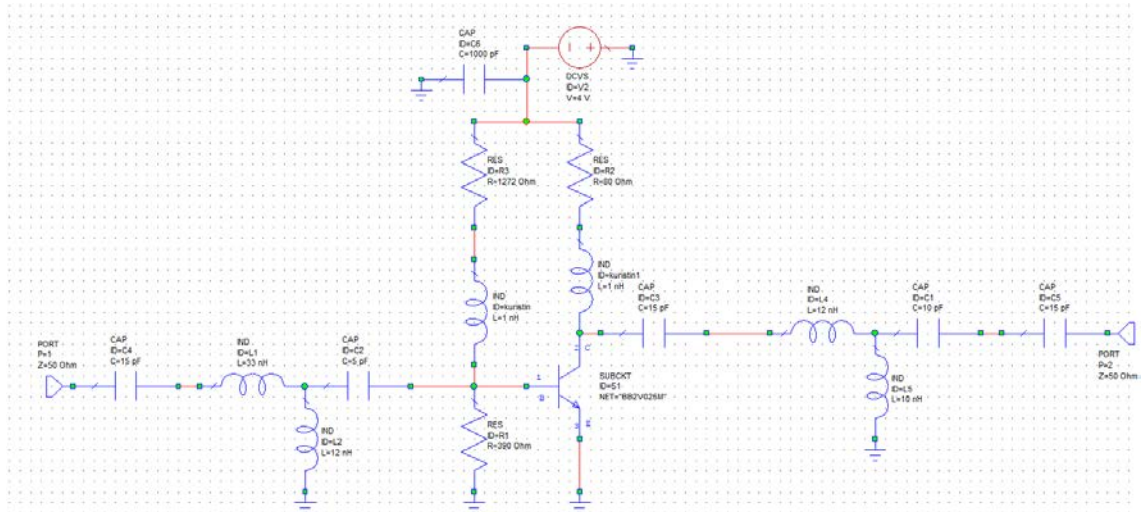


**Kuva 15.** T-sovituspiirein simuloidun vahvistimen lämpäisy ja heijastusvaimennukset.

Simulaatioiden perusteella valittiin toteutukseen piiri, jossa oli T-sovituspiirit, koska piiri suodatti parhaiten ylimääräisiä taajuuksia pois. Kuvasta 11 nähdään, miten T-piirin muoto on parempi verrattuna muihin sovituspiireihin.

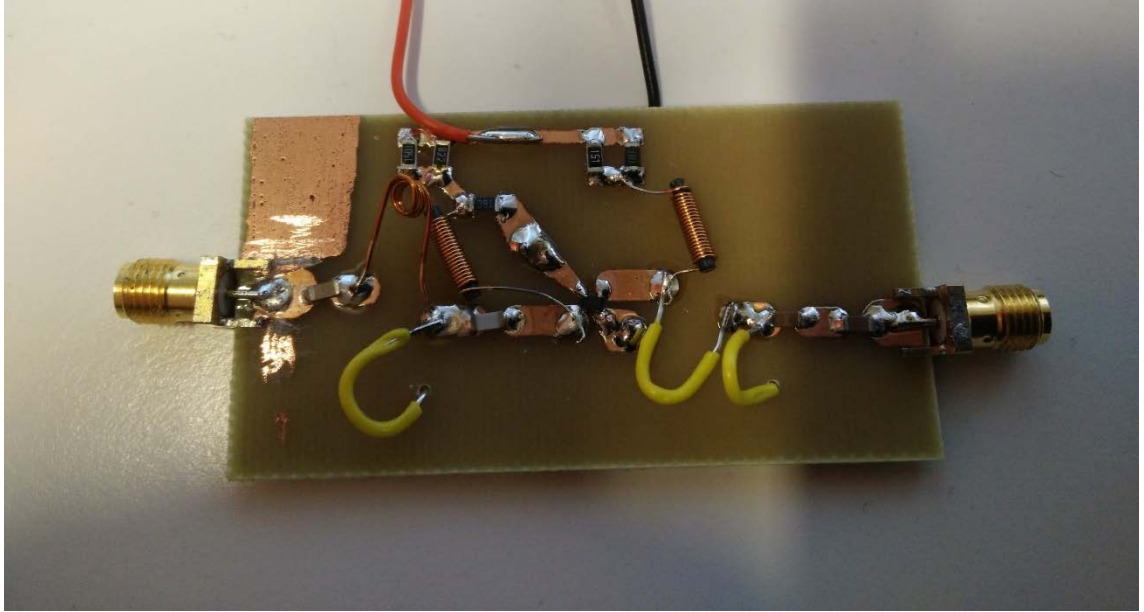
## 5 TOTEUTUS JA MITTAUKSET

Vahvistimen toteutus aloitettiin tekemällä piirilevy, jonka pohjapiirros suunniteltiin KiCad-suunnitteluohjelmalla. Piirissä päätettiin käyttää fyysisiä komponentteja, koska mittaus tulosten perusteella tehdyt muutokset olisivat helpompia toteuttaa. Kuvasta 16 nähdään kytkentäkaavio, jota käytettiin lopullisessa piirissä.



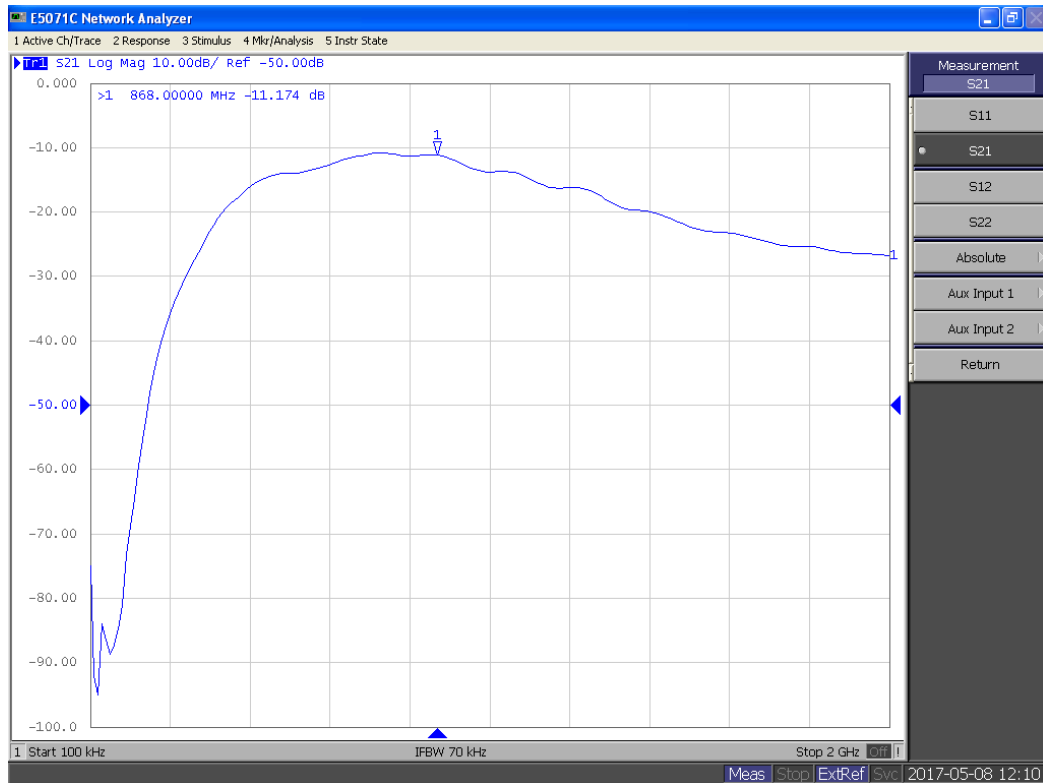
**Kuva 16.** RF-vahvistimen kytkentäkaavio

Kelat toteutettiin itse pyörittämällä 0,5 mm käämilangasta ja leikkaamalla kytkentälängasta sopivan kokoisia pätkiä. 10 nH ja kaksi 12 nH kela tehtiin kytkentälängasta, joka on päällystetty muovieristeellä ja 33 nH kela käämilangasta, joka on emaloitu. Transistorin emittereille ja keloille, jotka ovat maissa, tehtiin läpiviennit piirilevyn toiselle puolelle, koska saatiin yhteinen maa-alue eikä monia pieniä alueita. Kelojen suuruudet mitattiin Hewlett Packardin 8752A vektoripiirianalysaattorilla. Vahvistimen sisään- ja ulostuloon valittiin kondensaattori, joka näyttäisi oikosululta 868MHz:llä. Valittu kondensaattori oli 15 pF. Kuvasta 17 nähdään, millainen ensimmäinen versio piiristä näytti.

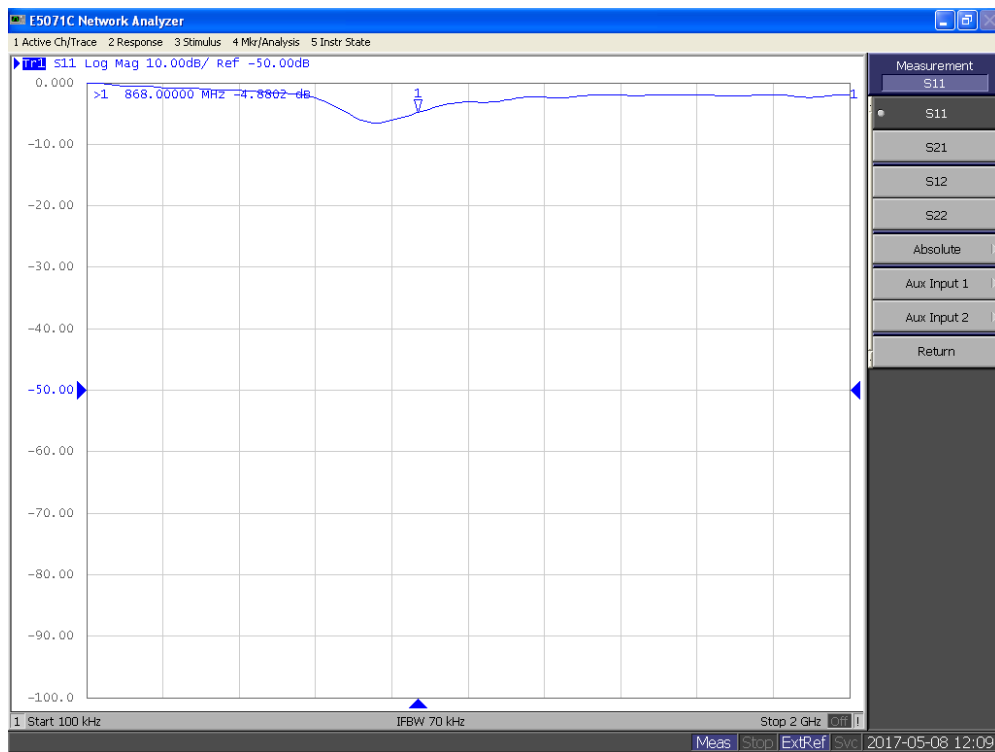


**Kuva 17.** Ensimmäinen versio RF-vahvistimesta.

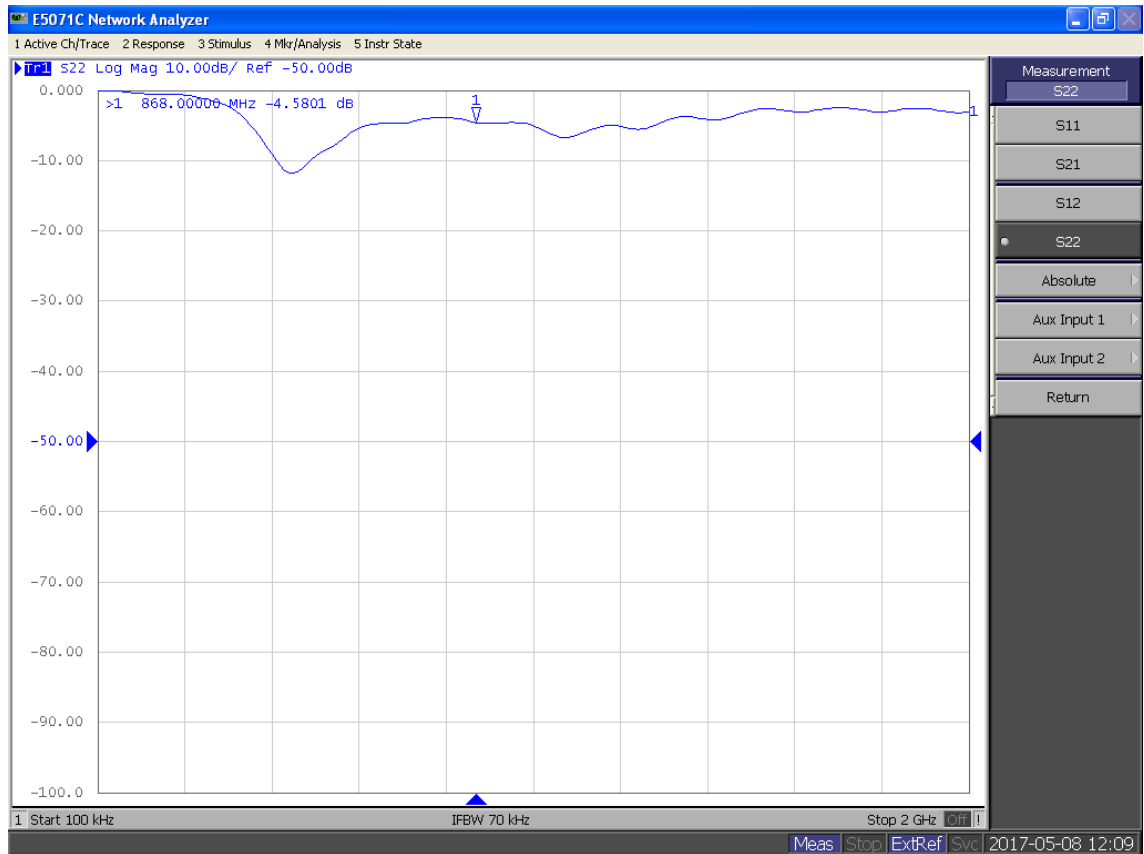
Kaikki mittaukset tehtiin Agilent Technologiesin E5071C vektoripiirianalysaattorilla. Ensimmäisissä mittauksissa huomattiin, ettei piiri toiminut halutulla tavalla. Vahvistimen vahvistus ei ollut halutulla tasolla, koska transistori oli mennyt saturaatioon kytkentävirheen takia. Virhe oli, että ulostulon sovituksen kelat olivat yhteydessä biasointipiirin kollektorivastuksiin, jolloin kollektorijännite meni nolllille. Alla olevissa kuvissa on mittauksen tuloksia.



**Kuva 18.** Vahvistimen vahvistus jäi negatiiviseksi, milloin se vaimentaisi signaalia.

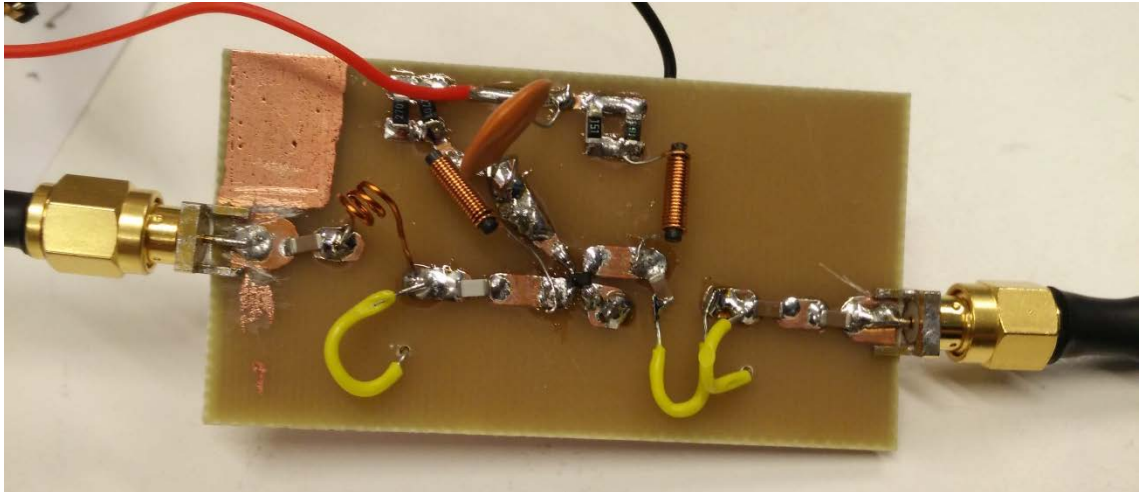


**Kuva 19.** Sisääntulon sovitus ei ollut sellainen, mitä haluttiin.



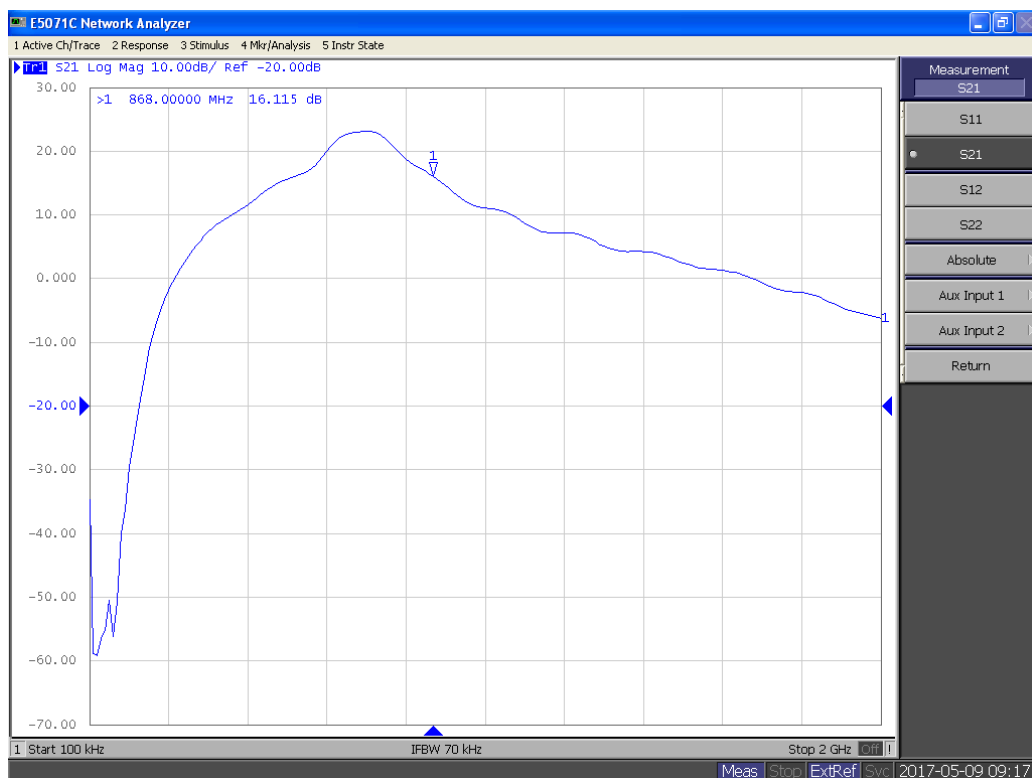
**Kuva 20.** Myöskään ulostulon sovitus ei ollut vaatimusten mukainen.

Ongelma poistettiin lisäämällä 15 pF katkokondensaattori transistorin kollektorin ja kelan väliin katkaisemaan tasavirta. Samalla huomattiin, että vahvistin värähteli oskillaattorin tavoin. Tämä saatiin poistettua lisäämällä 1 nF keraaminen kondensaattori maan ja jännitesyötön väliin. Kuvassa 21 on toinen versio piirilevystä.

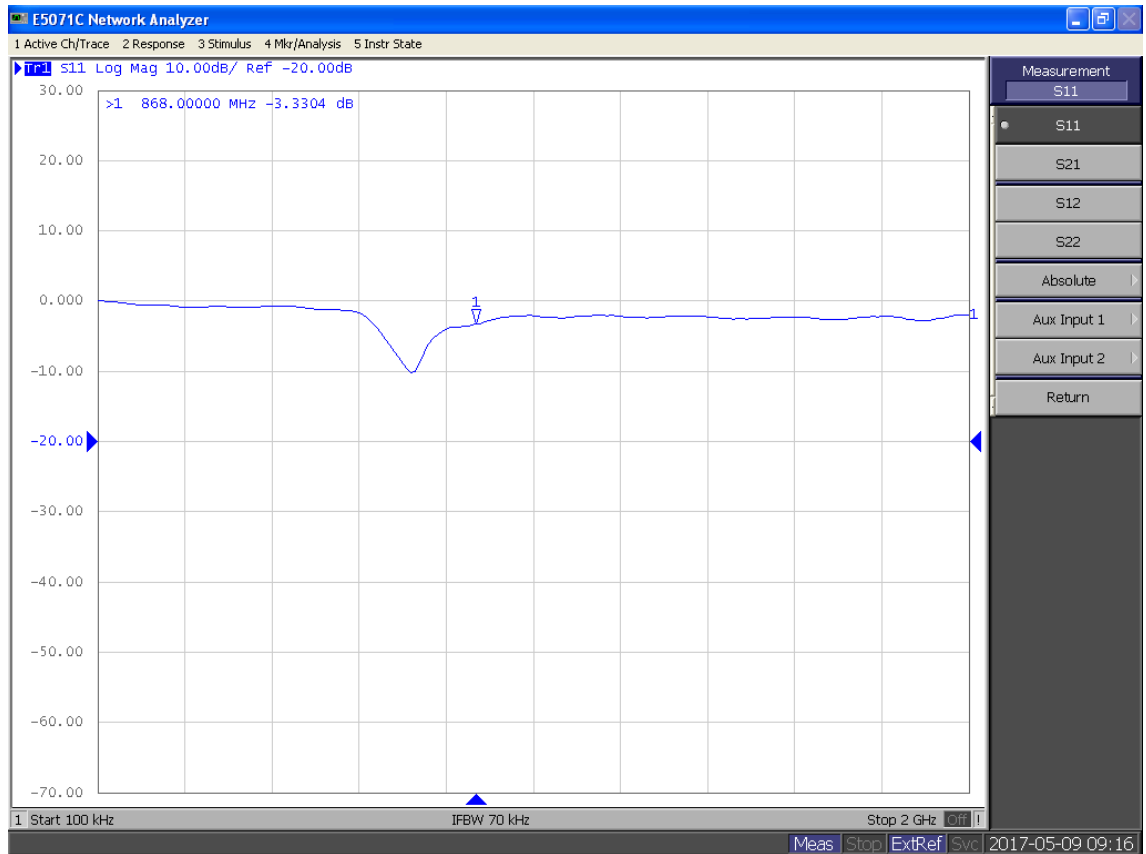


**Kuva 21.** RF-vahvistimen toinen versio.

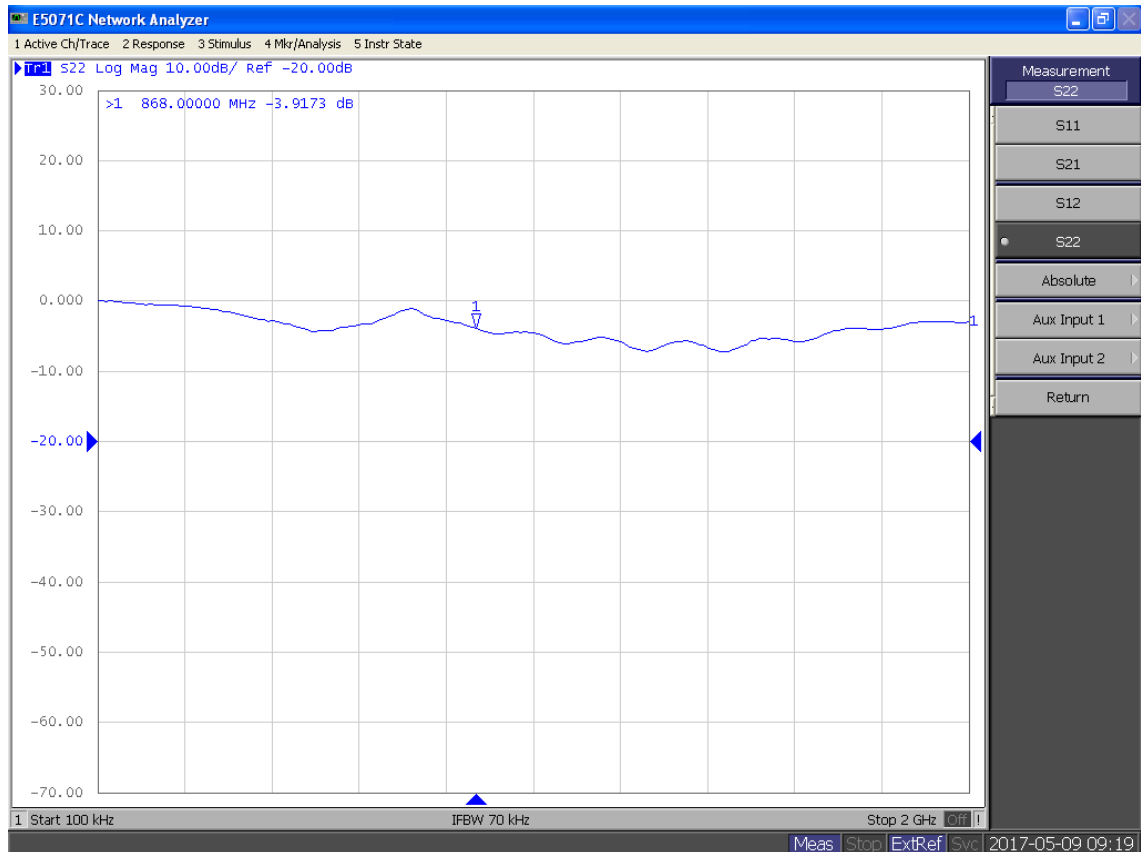
Mittauksissa tapahtui positiivinen muutos, kun piiriin tehtiin mainitut muutokset. Vahvistus ja sisääntulon sovitus paranivat ja päätyivät lähemmäksi annettuja vaatimuksia, mutta ulostulon sovitus ei ollut mitä haluttiin. Alla olevista kuvista nähdään mittauksissa tapahtuneet muutokset.



**Kuva 22.** Vahvistus täyttää vaatimukset, mutta maksimi vahvistus on vielä alemmalla taajuudella.



**Kuva 23.** Sisääntulon paras sovitus on vielä alemmalla taajuudella.



**Kuva 24.** Ulostulon sovitus ei ollut, mitä haluttiin.

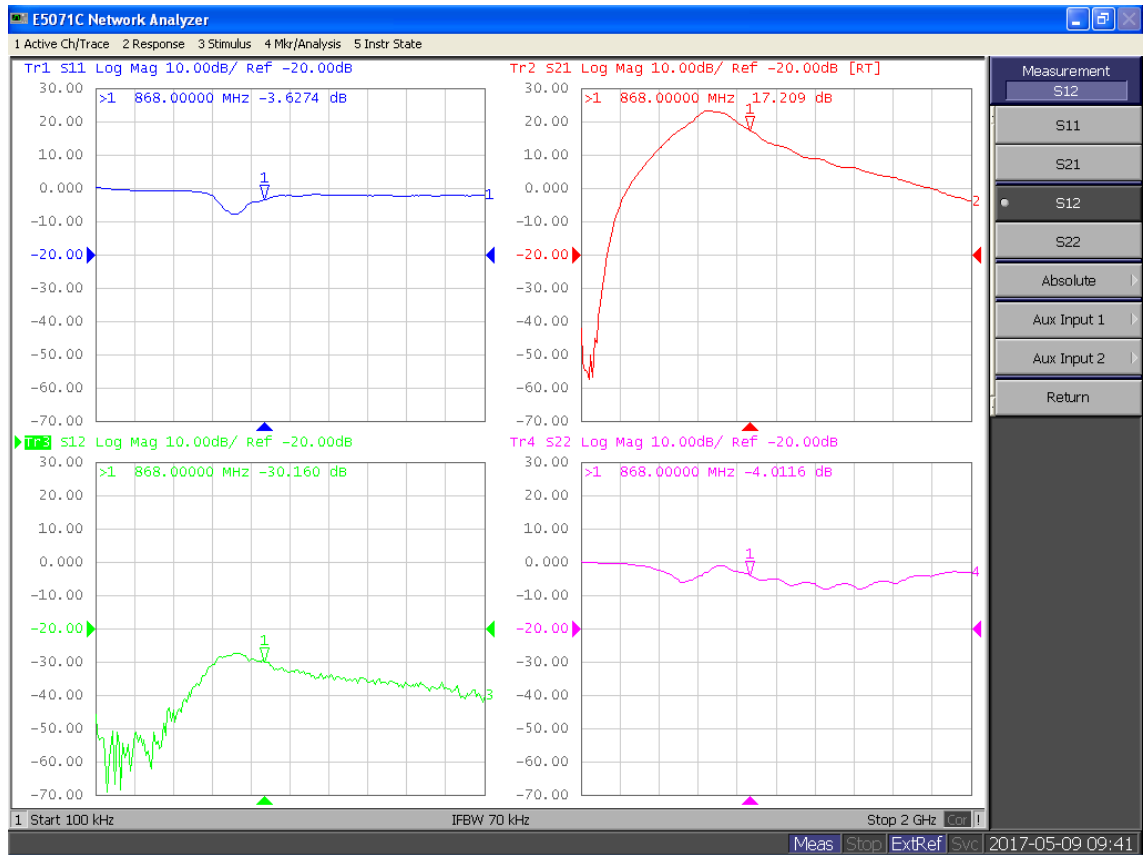
Seuraavaksi huomattiin, että ulostulon sovituksessa oleva 26 pF kondensaattori näytti vektoripiirianalysaattorissa kelalta. Tämä johtuu siitä, että 26 pF on suurempi kuin 15 pF, joka näyttää vektoripiirianalysaattorissa oikosululta. 26 pF kondensaattorin paikalle haluttiin valita kondensaattori, joka näyttää vektoripiirianalysaattorissa 26 pF kokoiselta kondensaattorilta. Kaavasta 9 nähdään, miten todellinen reaktanssi toimii.

$$X = \frac{1}{\omega C} - \omega L \quad (9)$$

Kaavasta 9 lähdettiin ratkaisemaan, mikä olisi induktanssin suuruus. Ratkaisu aloitettiin sijoittamalla 15 pF kapasitanssin paikalle, koska kyseinen kondensaattori näkyy vektoripiirianalysaattorissa oikosululta eli reaktanssi on nolla. Induktanssiksi saatiin 2,2 nH. Seuraavaksi haluttiin ratkaista, mikä olisi todellinen kapasitanssi, jolla vektoripiirianalysaattori näyttäisi, että reaktanssi olisi 26 pF kondensaattorilla. Induktanssin paikalle sijoitettiin 2,2 nH ja reaktanssin paikalle 26 pF kondensaattorin reaktanssi 868 MHz taajuudella. Kapasitanssiksi saatiin 9,6 pF, joten 26 pF kondensaattori vaihdettiin 10 pF

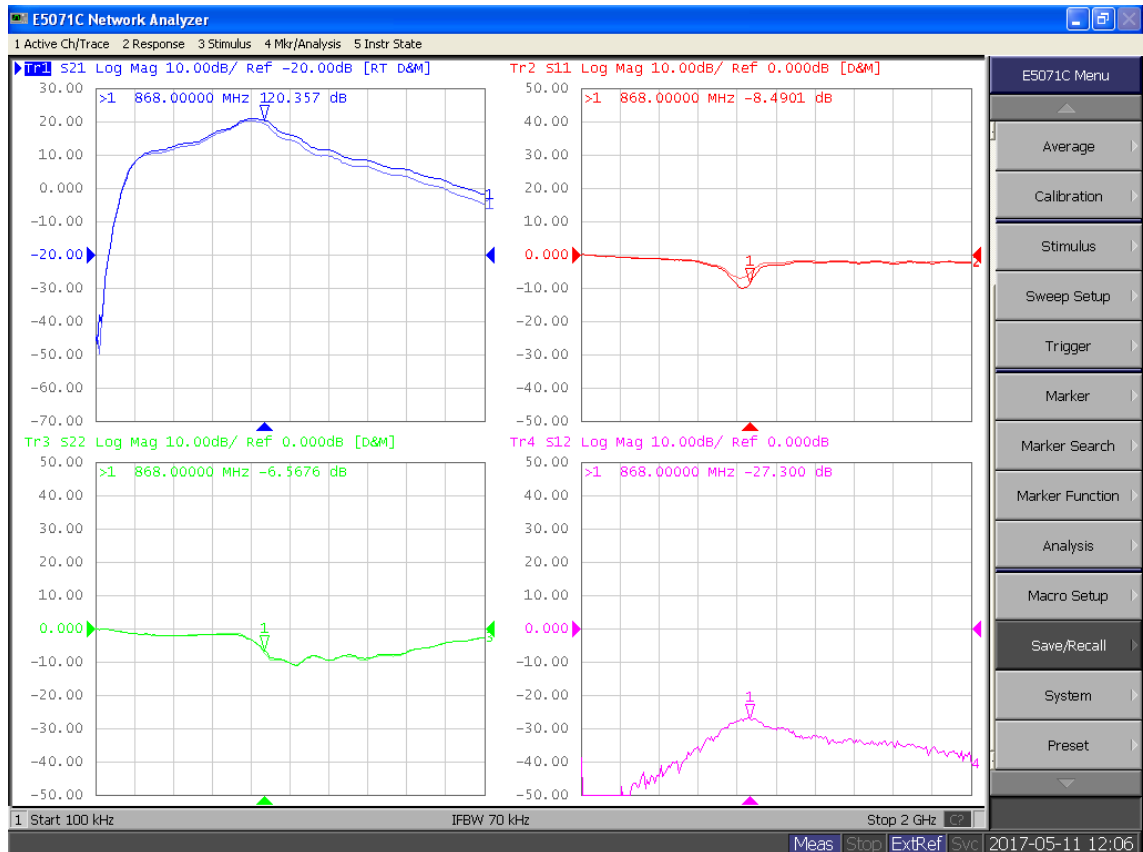


kondensaattori. Komponentin vaihdon jälkeisissä mittauksissa ulostulon sovitus parani hieman. Kuvasta 25 nähdään, miten muutokset vaikuttivat läpäisy- ja heijastusvasteisiin.



**Kuva 25.** Vahvistus ja sisääntulon sovitus paranivat hieman, mutta ulostulon sovitus ei vastannut haluttua sovitusta.

Jotta sovituksia saataisiin paremmiksi, muokattiin sisään- ja ulostulon sovituspiirien kelojen arvoja kokeilemalle eripituisia keloja. Näillä muutoksilla saatiin sovituksia ja vahvistusta paremmiksi, kuten kuvasta 26 nähdään.

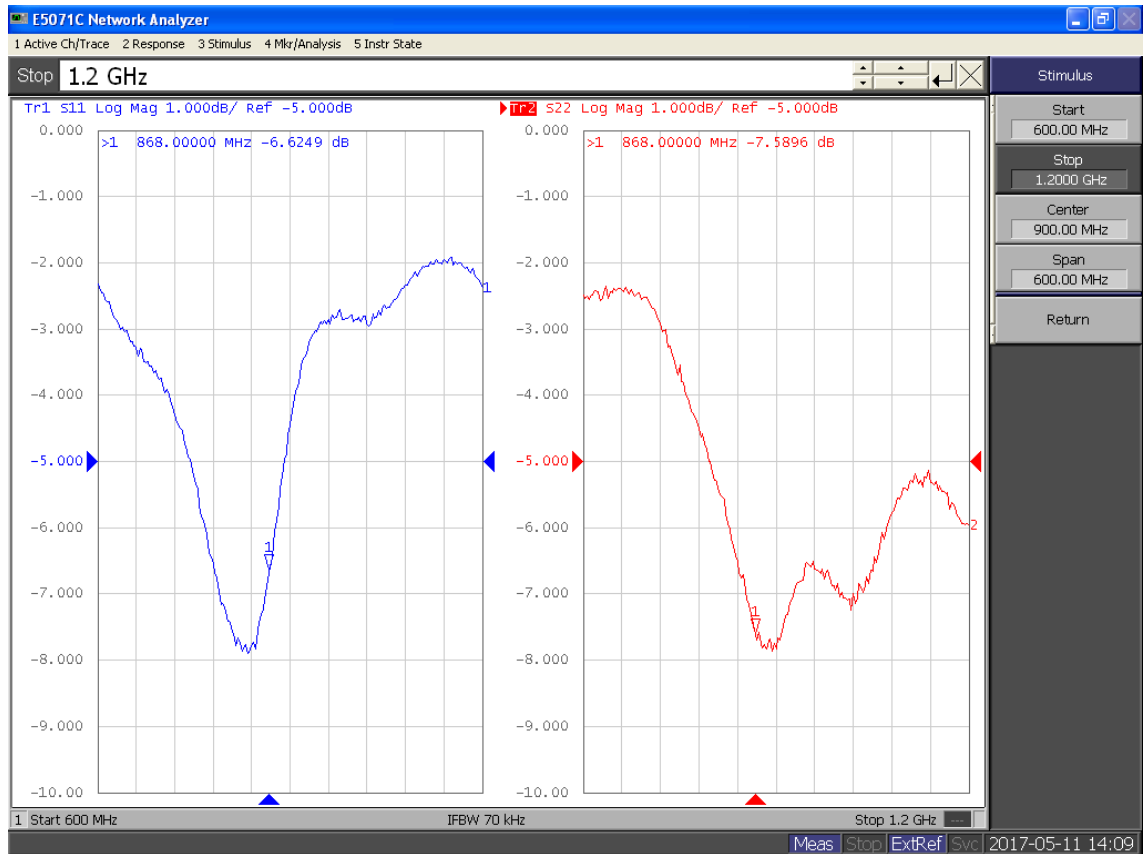


**Kuva 26.** Vahvistus ja sovitukset paranivat, kun sovituspierien keloja pituuksia muutettiin.

Kaikissa mittauksissa kollektorivirta oli noin 10 mA ja sitä haluttiin kasvattaa 20 mA:iin. Kollektorivastuksien jännitehäviötä kasvasi ja transistorin  $U_{CE}$  pienenisi, milloin päästäisiin transistorin lineaariselle alueelle, jossa saataisiin paras vahvistus. Päätettiin lisätä resistanssia transistorin kannan ja maan väliin, joten 390 ohmin vastuksen kanssa sarjaan kytkettiin 27 ohmin vastus. Vahvistus parani samoin myös sovitukset, kuten alla olevista kuvista voidaan nähdä.

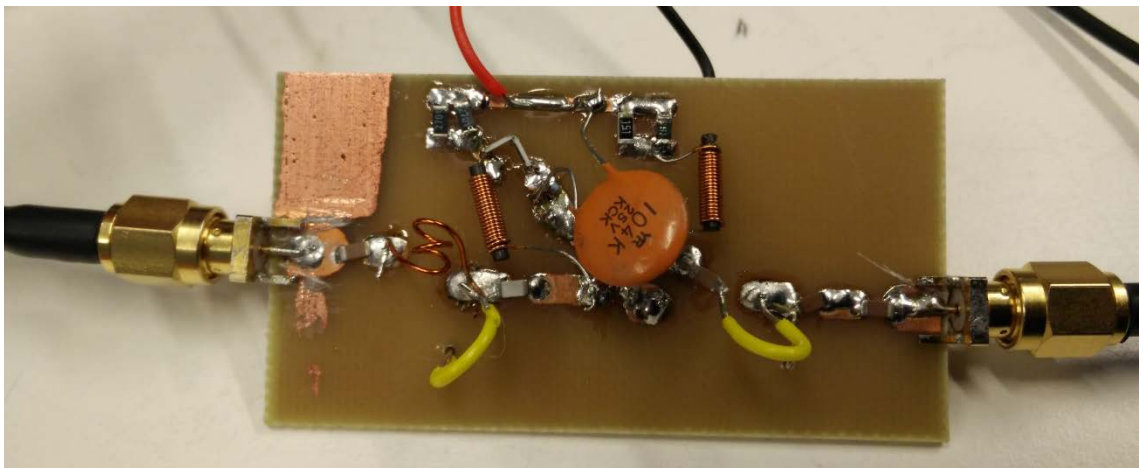


**Kuva 27.** Vahvistus parani, mutta silti amplitudivasteen huippu jäi alemmalle taajuudelle.



**Kuva 28.** Sovitukset paranivat, mutta silti jäivät halutuista arvoista.

Useiden komponentti muokkausten jälkeen viimeisin versio piirilevy näyttää erilaisesta kuin projektin alussa, kuten kuvasta 29 nähdään



**Kuva 29.** RF-vahvistimen viimeisin versio.

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa RF-vahvistin LoRan toiminta-alueelle 868 MHz:lle. Vaatimuksina olivat, että vahvistus olisi suurempi kuin 15 dB ja sovituksissa parempia kuin 10 dB.

Simulaatioiden perusteella sopivammaksi sovituspöörissä valikoitui T-sovituspöörjä käytävä vahvistinpöör. Valinnan perusteena oli paras amplitudivaste, jossa huippu oli jyrkin, kuten kuvasta 11 nähdään. L-sovituspöörin kanssa tehty vahvistinpöörin huippu oli liian laakea ja  $\pi$ -sovituspöörin kanssa tehdyssä pöörissä oli toinen huippukohta 335 MHz taajuudella.

Mittaukset menivät pääsääntöisesti kohtalaisesti, koska sisään- ja ulostulon sovitukset eivät missään kohtaan olleet haluttuja ja vahvistuksessa päästiin haluttuun vaatimukseen. Syynä sovitusten huonouteen oli piirilevyn pohjapiirroksessa, jossa SMA-liittimiin juotetut ”täplät” olivat liian leveät. Sopiva leveys olisi ollut 3,1 mm ja ”täplät” olivat 5mm leveät. Tämän ongelman ratkaisu olisi tehdä uusi paranneltu pohjapiirros, jossa otettaisiin huomioon kaikki mittausten aikana tehtyt muutokset. Lisäksi sovituksissa käytetyt komponentit eivät olleet ideaalisia, mikä aiheuttaa vastustamatta hajasuureita.

Vahvistuksen vaatimukseen päästiin simulaatioissa ja viimeisissä mittauksissa, mutta sovituksissa oli ongelmia pääosin mittauksissa ja simulaatioissa. Sovituksissa ei päästy haluttuun vaatimukseen, koska simulaatioissa komponenttiarvot eivät olleet todellisia esimerkiksi ei ole olemassa suoraan 5 pF kondensaattoria lähimmät mahdolliset on 4,7 pF ja 5,6 pF kondensaattorit. Kelojen arvoissa oli ongelmia enemmän toteutuksen kanssa, koska simulaatioissa käytetyt arvot olivat vaikeita toteuttaa esimerkiksi 12nH kelan induktanssiin vaikuttaa mistä kohtaa kytkentälankaa juotetaan ja kuinka pitkäksi kytkentälanka on leikattu. Lankakelan, joka on tehty metallilangasta, induktanssi kasvaa noin 1nH/mm, joten sopivan pituisen kelan leikkaaminen ei ollut helppoa. Kelat leikattiin tarkoituksella hieman pidemmiksi, että löytyisi sopiva kohta, josta kelan voisi juottaa piirilevyyn kiinni.

Piirilevyn tekemisessä tuli ongelmia, kun piirilevyn syövyttäminen kesti kauemmin kuin normaalisti. Tämä johtui syövytyksessä käytettävästä nesteestä, joka oli laimentunut. Piirilevyyn jäi tämän takia vasempaan yläreunaan kuparia, joka ei syöpynyt ollenkaan. Tämä kupari saattoi haitata mittaustuloksia, vaikka oli eristettynä muusta piiristä.

Jatkumona tälle projektille olisi tehdä uusi pohjapiirros ja piirilevy, jolloin voitaisiin minimoida tässä projektissa tehdyt virheet. Koteloinnilla saataisiin kaikki piirin ulkoiset signaalit poistettua, milloin mittausten tulokset parantuisivat.

## LÄHTEET

- [1] Semtech, "Semtech LoRa® Wireless RF Technology Overview Video", [www-dokumentti]. Saatavilla: <https://www.youtube.com/watch?v=UIWioQbHDmg> (Viitattu 26.4.2017)
- [2] Microchip, "LoRa Technology", [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.microchip.com/design-centers/wireless-connectivity/embedded-wireless/lora-technology> (Viitattu 21.3.2017)
- [3] Techdesign, "LoRa Technology", [www-dokumentti]. Saatavilla: <https://blog.tech-design.com/lora-technology/> (Viitattu 24.3.2017)
- [4] Semtech, "What is LoRa", [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.semtech.com/wireless-rf/internet-of-things/what-is-lora/> (Viitattu 19.3.2017)
- [5] Chris Bowick, *RF Circuit Design*, England, Newnes, 2007

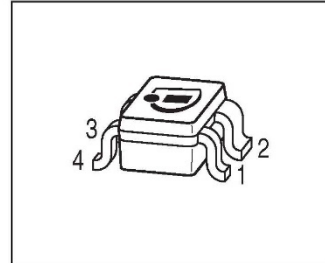
# Transistori Infineon BFP420 datalehti



BFP420

## Low Noise Silicon Bipolar RF Transistor

- For high gain and low noise amplifiers
- Minimum noise figure  $NF_{\min} = 1.1$  dB at 1.8 GHz  
Outstanding  $G_{\text{ms}} = 21$  dB at 1.8 GHz
- For oscillators up to 10 GHz
- Transition frequency  $f_T = 25$  GHz
- Pb-free (RoHS compliant) and halogen-free package with visible leads
- Qualification report according to AEC-Q101 available



**ESD (Electrostatic discharge) sensitive device, observe handling precaution!**

Type	Marking	Pin Configuration						Package
BFP420	AMs	1=B	2=E	3=C	4=E	-	-	SOT343

**Maximum Ratings** at  $T_A = 25$  °C, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Value	Unit
Collector-emitter voltage	$V_{\text{CEO}}$	4.5	V
$T_A = 25$ °C		4.1	
$T_A = -55$ °C			
Collector-emitter voltage	$V_{\text{CES}}$	15	
Collector-base voltage	$V_{\text{CBO}}$	15	
Emitter-base voltage	$V_{\text{EBO}}$	1.5	
Collector current	$I_C$	60	mA
Base current	$I_B$	9	
Total power dissipation <sup>1)</sup>	$P_{\text{tot}}$	210	mW
$T_S \leq 98$ °C			
Junction temperature	$T_J$	150	°C
Storage temperature	$T_{\text{Stg}}$	-55 ... 150	

<sup>1)</sup>  $T_S$  is measured on the emitter lead at the soldering point to the pcb

## Thermal Resistance

Parameter	Symbol	Value	Unit
Junction - soldering point <sup>1)</sup>	$R_{\text{thJS}}$	250	K/W




**Electrical Characteristics** at  $T_A = 25\text{ °C}$ , unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Values			Unit
		min.	typ.	max.	
<b>DC Characteristics</b>					
Collector-emitter breakdown voltage $I_C = 1\text{ mA}$ , $I_B = 0$	$V_{(BR)CEO}$	4.5	5	-	V
Collector-emitter cutoff current $V_{CE} = 15\text{ V}$ , $V_{BE} = 0$	$I_{CES}$	-	-	10	$\mu\text{A}$
Collector-base cutoff current $V_{CB} = 5\text{ V}$ , $I_E = 0$	$I_{CBO}$	-	-	100	nA
Emitter-base cutoff current $V_{EB} = 0.5\text{ V}$ , $I_C = 0$	$I_{EBO}$	-	-	3	$\mu\text{A}$
DC current gain $I_C = 20\text{ mA}$ , $V_{CE} = 4\text{ V}$ , pulse measured	$h_{FE}$	60	95	130	-

<sup>1</sup>For the definition of  $R_{thJS}$  please refer to Application Note AN077 (Thermal Resistance Calculation)



BFP420

**Electrical Characteristics at  $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified**

Parameter	Symbol	Values			Unit
		min.	typ.	max.	
<b>AC Characteristics (verified by random sampling)</b>					
Transition frequency $I_C = 30\text{ mA}$ , $V_{CE} = 3\text{ V}$ , $f = 2\text{ GHz}$	$f_T$	18	25	-	GHz
Collector-base capacitance $V_{CB} = 2\text{ V}$ , $f = 1\text{ MHz}$ , $V_{BE} = 0$ , emitter grounded	$C_{cb}$	-	0.15	0.3	pF
Collector emitter capacitance $V_{CE} = 2\text{ V}$ , $f = 1\text{ MHz}$ , $V_{BE} = 0$ , base grounded	$C_{ce}$	-	0.37	-	
Emitter-base capacitance $V_{EB} = 0.5\text{ V}$ , $f = 1\text{ MHz}$ , $V_{CB} = 0$ , collector grounded	$C_{eb}$	-	0.55	-	
Minimum noise figure $I_C = 5\text{ mA}$ , $V_{CE} = 2\text{ V}$ , $f = 1.8\text{ GHz}$ , $Z_S = Z_{Sopt}$	$NF_{min}$	-	1.1	-	dB
Power gain, maximum stable <sup>1)</sup> $I_C = 20\text{ mA}$ , $V_{CE} = 2\text{ V}$ , $Z_S = Z_{Sopt}$ , $Z_L = Z_{Lopt}$ , $f = 1.8\text{ GHz}$	$G_{ms}$	-	21	-	dB
Insertion power gain $V_{CE} = 2\text{ V}$ , $I_C = 20\text{ mA}$ , $f = 1.8\text{ GHz}$ , $Z_S = Z_L = 50\ \Omega$	$ S_{21} ^2$	14	17	-	
Third order intercept point at output <sup>2)</sup> $V_{CE} = 2\text{ V}$ , $I_C = 20\text{ mA}$ , $f = 1.8\text{ GHz}$ , $Z_S = Z_L = 50\ \Omega$	$IP3$	-	22	-	dBm
1dB compression point at output $I_C = 20\text{ mA}$ , $V_{CE} = 2\text{ V}$ , $Z_S = Z_L = 50\ \Omega$ , $f = 1.8\text{ GHz}$	$P_{-1dB}$	-	12	-	

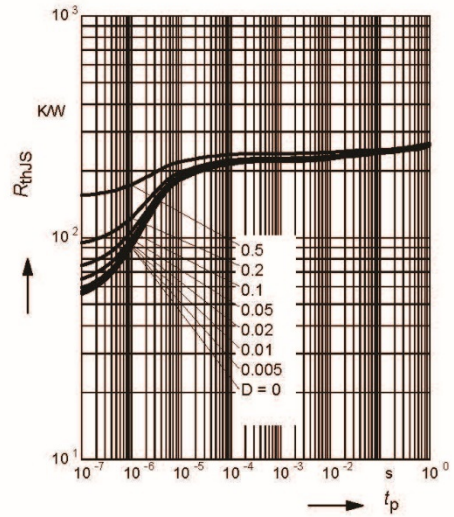
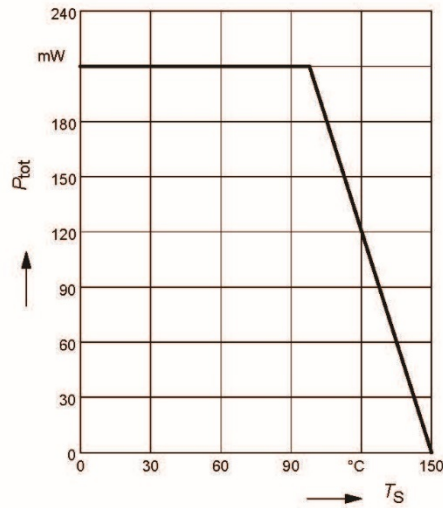
<sup>1)</sup> $G_{ms} = |S_{21}| / |S_{12}|$ <sup>2)</sup> $IP3$  value depends on termination of all intermodulation frequency components.  
Termination used for this measurement is  $50\ \Omega$  from 0.1 MHz to 6 GHz



BFP420

Total power dissipation  $P_{tot} = f(T_S)$

Permissible Pulse Load  $R_{thJS} = f(t_p)$

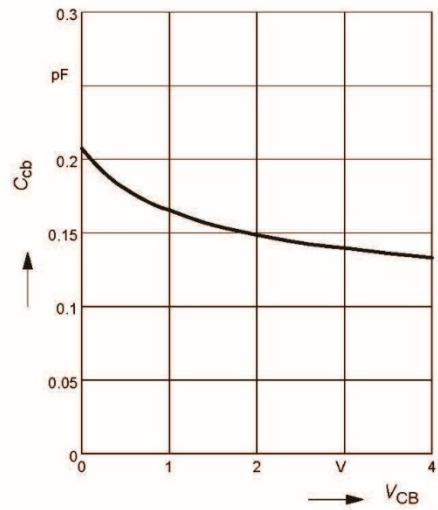
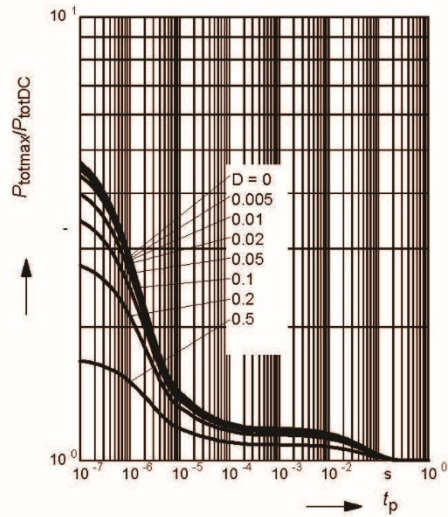


Permissible Pulse Load

Collector-base capacitance  $C_{cb} = f(V_{CB})$

$P_{totmax}/P_{totDC} = f(t_p)$

$f = 1\text{MHz}$



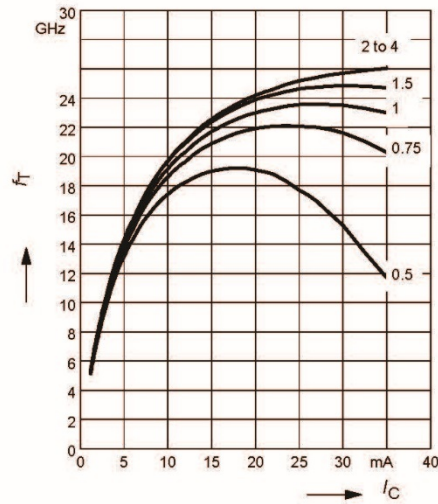


BFP420

**Transition frequency  $f_T = f(I_C)$**

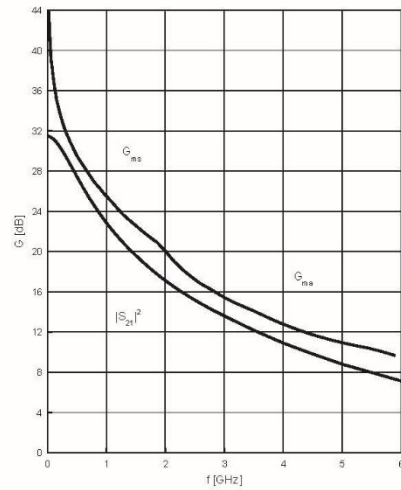
$f = 2 \text{ GHz}$

$V_{CE} = \text{parameter in V}$



**Power gain  $G_{ma}, G_{ms}, |S_{21}|^2 = f(f)$**

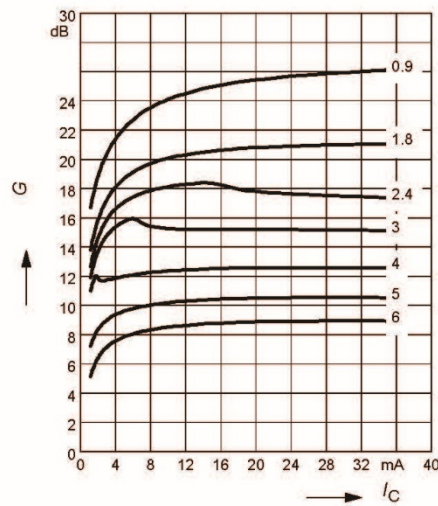
$V_{CE} = 2 \text{ V}, I_C = 20 \text{ mA}$



**Power gain  $G_{ma}, G_{ms} = f(I_C)$**

$V_{CE} = 2 \text{ V}$

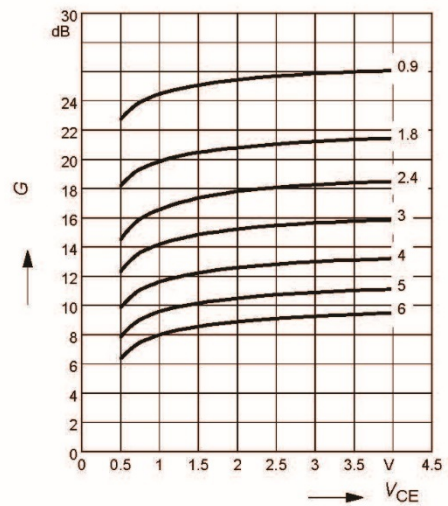
$f = \text{parameter in GHz}$



**Power gain  $G_{ma}, G_{ms} = f(V_{CE})$**

$I_C = 20 \text{ mA}$

$f = \text{parameter in GHz}$



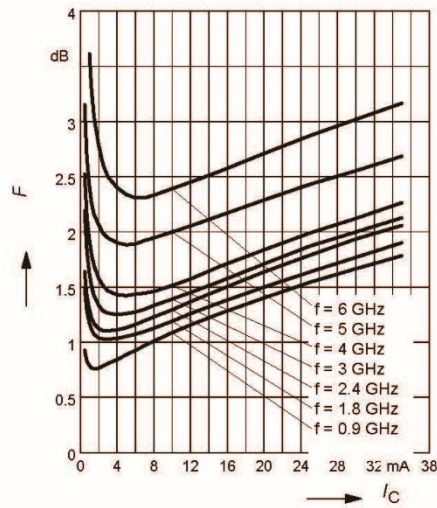




BFP420

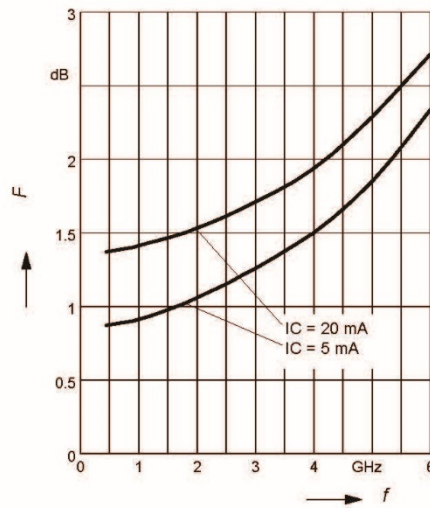
Noise figure  $F = f(I_C)$

$V_{CE} = 2\text{ V}$ ,  $Z_S = Z_{Sopt}$



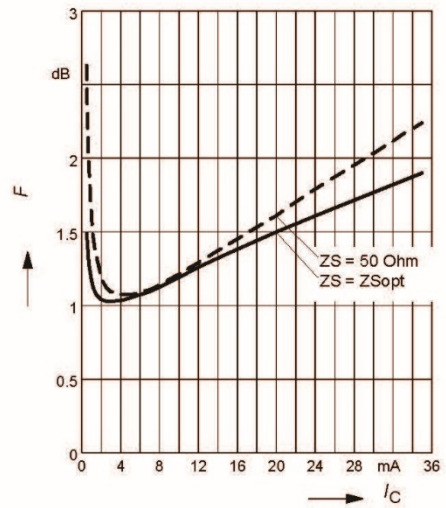
Noise figure  $F = f(f)$

$V_{CE} = 2\text{ V}$ ,  $Z_S = Z_{Sopt}$



Noise figure  $F = f(I_C)$

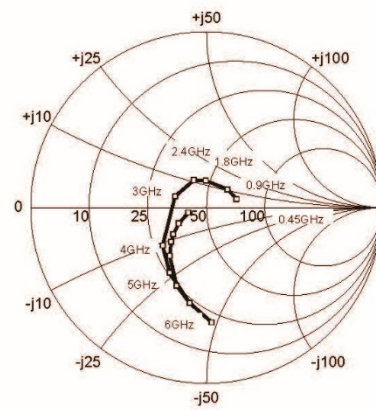
$V_{CE} = 2\text{ V}$ ,  $f = 1.8\text{ GHz}$



Source impedance for min.

noise figure vs. frequency

$V_{CE} = 2\text{ V}$ ,  $I_C = 5\text{ mA} / 20\text{ mA}$



**SPICE GP Model**

For the SPICE Gummel Poon (GP) model as well as for the S-parameters (including noise parameters) please refer to our internet website [www.infineon.com/rf.models](http://www.infineon.com/rf.models).

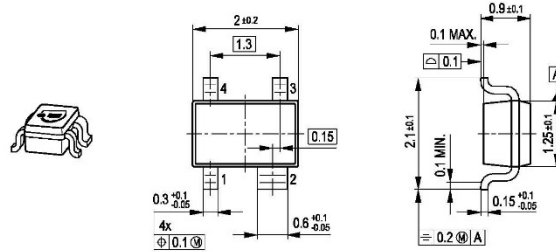
Please consult our website and download the latest versions before actually starting your design. You find the BFP420 SPICE GP model in the internet in MWO- and ADS-format, which you can import into these circuit simulation tools very quickly and conveniently. The model already contains the package parasitics and is ready to use for DC and high frequency simulations. The terminals of the model circuit correspond to the pin configuration of the device. The model parameters have been extracted and verified up to 10 GHz using typical devices. The BFP420 SPICE GP model reflects the typical DC- and RF-performance within the limitations which are given by the SPICE GP model itself. Besides the DC characteristics all S-parameters in magnitude and phase, as well as noise figure (including optimum source impedance, equivalent noise resistance and flicker noise) and intermodulation have been extracted.



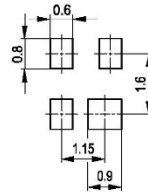
Package SOT343

BFP420

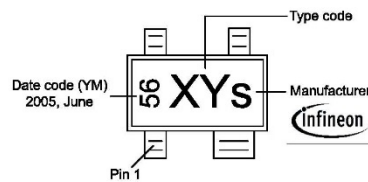
Package Outline



Foot Print

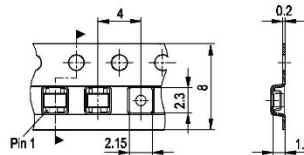


Marking Layout (Example)



Standard Packing

Reel ø180 mm = 3.000 Pieces/Reel  
 Reel ø330 mm = 10.000 Pieces/Reel



BFP420

---

Edition 2009-12-02  
Published by  
Infineon Technologies AG  
85579 Neubiberg, Germany  
© Infineon Technologies AG 2009.  
All Rights Reserved.

**Attention please!**

The information herein is given to describe certain components and shall not be considered as a guarantee of characteristics.  
Terms of delivery and rights to technical change reserved.  
We hereby disclaim any and all warranties, including but not limited to warranties of non-infringement, regarding circuits, descriptions and charts stated herein.

**Information**

For further information on technology, delivery terms and conditions and prices please contact your nearest Infineon Technologies Office ([www.infineon.com](http://www.infineon.com)).

**Warnings**

Due to technical requirements components may contain dangerous substances.  
For information on the types in question please contact your nearest Infineon Technologies Office.  
Infineon Technologies Components may only be used in life-support devices or systems with the express written approval of Infineon Technologies, if a failure of such components can reasonably be expected to cause the failure of that life-support device or system, or to affect the safety or effectiveness of that device or system.  
Life support devices or systems are intended to be implanted in the human body, or to support and/or maintain and sustain and/or protect human life. If they fail, it is reasonable to assume that the health of the user or other persons may be endangered.