

GaN HEMT İLE YÜKSEK VERİMLİ X BAND F SINIFI GÜÇ KUVVETLENDİRİCİSİ TASARIMI

Osman CEYLAN (*ceylanos@itu.edu.tr*)

İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Hasan Bülent YAĞCI (*bulent.yagci@itu.edu.tr*)

İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Selçuk PAKER (*spaker@itu.edu.tr*)

İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada X bandında çalışan, yüksek verimli F sınıfı güç kuvvetlendiricisi Galyum Nitrit Yüksek Elektron Hareketlilikli Tranzistor (High Electron Mobility Transistor, GaN tHEMT) kullanılarak tasarlanmıştır. Bu tasarımda kullanılan Triquint TGF2023-1-01 tranzistoru için Modelithics geliştirdiği doğrusal olmayan tranzistor modeli kullanılmıştır. Tasarlanan devrenin daha geniş frekans bandından çalışmasını sağlamak için kapasitif elemanlar radyal yapıli mikroşerit hatlar ile gerçekleştirilmiştir. Tasarım sonucunda 8.2 GHz merkez frekansında elde edilen en yüksek verim %62, güç kazancı ise 9.3dB'dir. Tasarlanan devre geniş bantlı iletişim sistemlerinde (170MHz) kullanılmaya uygun olarak bant içerisindeki verimi %60'ın üzerindedir. Çalışma sonunda GaN HEMT kullanarak yüksek çıkış gücüne sahip yüksek verimli kuvvetlendirici elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *GaN, X Band, Güç Kuvvetlendiricisi, F Sınıfı, Dairesel Yapılı Hat.*

HIGH EFFICIENCY X BAND GaN HEMT CLASS F POWER AMPLIFIER DESIGN

Osman CEYLAN (*ceylanos@itu.edu.tr*)

*Istanbul Technical University, Electronics and Communication Engineering Department,
Istanbul, Turkey*

Hasan Bülent YAĞCI (*bulent.yagci@itu.edu.tr*)

*Istanbul Technical University, Electronics and Communication Engineering Department,
Istanbul, Turkey*

Selçuk PAKER (*spaker@itu.edu.tr*)

*Istanbul Technical University, Electronics and Communication Engineering Department,
Istanbul, Turkey*

ABSTRACT

In this study a GaN HEMT X Band Class F Power Amplifier is presented. Center frequency of the amplifier is 8.2GHz and amplifier has 62% peak efficiency with 9.3dB power gain. Modelithics advanced GaN HEMT nonlinear transistor model is used at design process. Radial stubs are preferred to increase bandwidth. Amplifier has 170MHz bandwidth above 60% efficiency. Therefore, proposed amplifier is suitable for high data rate communication systems.

Keywords: *GaN, X Band, Power Amplifier, Class F, Radial Stub.*

1. GİRİŞ

Yüksek güçlü RF kuvvetlendirici başta iletişim sistemleri olmak üzere, radarlarda, mikrodalga ısıtma sistemlerinde, mikrodalga görüntüleme de kullanılmaktadır. Bu kuvvetlendiriciler, kullanıldıkları sistemlerin genelde son elektronik devresi olup yayın yapan sistemlerde anten ile sonlandırılırlar. Güç kuvvetlendiricileri, en çok güç tüketen birim olup sistemin toplam güç tüketimini belirleyen önemli bir devredir. Güç kuvvetlendiricilerinin verimlerini arttırmak kullanıldıkları sistemlerin uzun ömür, düşük işletme/bakım maliyeti ve küçük boyut gibi üstünlüklerini kazanmasını sağlayacak en önemli etkidir. Çıkış gücü seviyesi, verim, çalışma frekansı ve bant genişliği güç kuvvetlendiricilerinin değerlendirilmesinde ve sınıflandırılmasında kullanılan önemli verilerdir.

Galyum Arsenik Metal Yarıiletken Alan Etkili Tranzistorun (Gallium Arsenide Metal Semiconductor Fiel Effect Transistor, GaAs MESFET) 1970'lerde X bant gibi yüksek frekanslarda da kullanılabilir hale gelmesiyle vakum tüplü güç kuvvetlendiricilerinin yerini çok hızlı bir şekilde almaya başlamıştır [1]. İlerleyen yıllarda alan etkili tranzistorun geliştirilmesiyle elde edilen Yana Doğru Dağılmış Metal Oksitli Yarıiletken (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor) (LDMOS) yapılı tranzistorlerin L ve S bantta düşük maliyetli çözüm sunmasıyla, LDMOS tranzistorler de geniş bir kullanım alanı bulmuşlardır. Zamanla artan bant genişliği ihtiyacı daha yüksek frekanslarda çalışan geniş bantlı devrelere olan ihtiyacı arttırmıştır. Yüksek Elektron Hareketlilikli Tranzistorlar (High Electron Mobility Transistor, HEMT) yüksek frekanslı sistemler için uygun yapılardır ve bu tranzistorlerin 1990larda Galyum Nitrit (GaN) tabanlar üzerinde ilk defa sunulmasıyla, sağladıkları diğer önemli üstünlüklerden de dolayı yüksek frekanslı ve yüksek güçlü sistemlerde hızla kullanılmaya başlamıştır [2]. GaN HEMTler

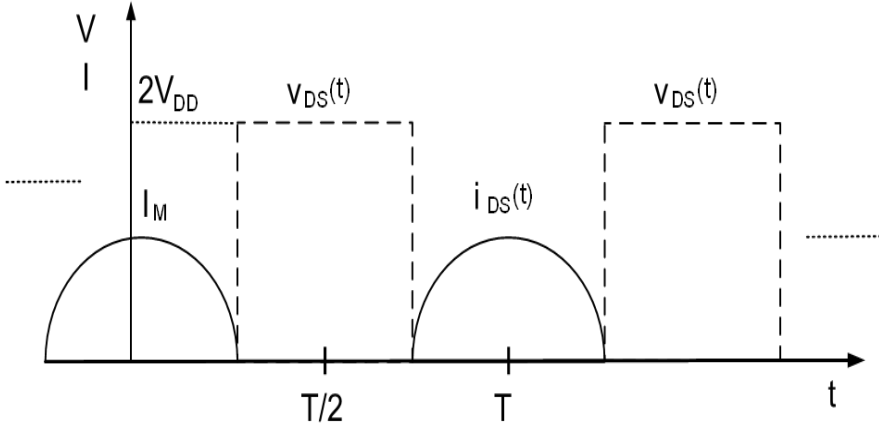
yüksek bant aralığı (bandgap) sayesinde (3.4eV) daha yüksek gerilimlerde çalışabilmekte, yüksek doyma hızı (saturation velocity) nedeniyle daha yüksek güç yoğunluğuna ulaşabilmektedir. Isıl iletkenliğinin yüksek oluşu da GaN tranzistörleri yüksek güçlü sistemler için tercih edilir hale getirmektedir [2].

Bu çalışmada bir GaN HEMT'in (TGF2023-2-01 Triquint [3]) doğrusal olmayan özellikleri incelenmiş ve X bantta çalışan F sınıfı bir güç kuvvetlendiricisi doğrusal olmayan model kullanılarak tasarlanmış ve ideal bir F sınıfı kuvvetlendirici ile karşılaştırılmıştır. Tasarımda daha geniş bant sağlamasından dolayı radyal yapılı mikroşerit hatlar kullanılmıştır.

1.1. F Sınıfı Güç Kuvvetlendirici Temelleri

Kuvvetlendiriciler basit olarak iki şekilde sınıflandırılabilir: Kutuplama tiplerine göre kuvvetlendiriciler ve dalga şekillendirmeye dayalı kuvvetlendiriciler [4]. Kutuplama tiplerine göre sınıflandırılan güç kuvvetlendiricileri sükûnette akıttıkları akıma göre isimlendirilirler. A, AB, B, C sınıfı kuvvetlendiriciler bu tür kuvvetlendiricilerdir. Bu tür kuvvetlendiricilerde A sınıfından C'ye doğru verim artmakta, ancak kazanç düşmekte ve doğrusallık bozulmaktadır. Dalga şekillendirmeye dayalı güç kuvvetlendiricilerinde, akım ve gerilim tranzistör üzerinde aynı anda mevcut olmayacak şekilde uygun bir şekilde sonlandırılır. Bu tür kuvvetlendiricilere örnek olarak da D, E, F, J sınıfı gibi kuvvetlendiriciler gösterilebilir.

İdeal bir F sınıfı güç kuvvetlendiricisinde tranzistörden akım akarken tranzistör üzerindeki gerilim sıfırdır, tersi durumda, yani tranzistör üzerinde gerilim olduğunda da akım sıfırdır. Bu durumda herhangi bir zamanda akım ya da gerilim sıfır olduğu için tranzistör üzerinde güç harcanmaz, böylece verim artar. Bu durum Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. İdeal F Sınıfı Kuvvetlendirici Gerilim ve Akım Şekilleri

B sınıfı kutuplanmış, ideal bir tranzistor için (diz gerilimi (knee voltage) = 0V) F sınıfı kuvvetlendiricinin temel analizlerini yaparken Fourier açılımı kullanılabilir [4]. Tranzistor üzerindeki akım ve gerilim için aşağıdaki bağıntıları yazabiliriz:

$$i_D(\varnothing) = \sum_{n=0}^{\infty} I_n \cos(n\varnothing) \quad (1)$$

$$V_{DS}(\varnothing) = \sum_{n=0}^{\infty} V_n \cos(n\varnothing) \quad (2)$$

İdeal durumdaki akım ve gerilim şeklini sağlayabilmek için (1) ve (2) ifadelerindeki akım ve gerilim ifadelerinin katsayıları aşağıdaki gibi olmaktadır [4]:

$$I_n = \begin{cases} \frac{I_{en \text{ büyük}}}{\pi} & n = 0 \\ \frac{I_{en \text{ büyük}}}{2} & n = 1 \\ \frac{2I_{en \text{ büyük}}}{\pi} \frac{(-1)^{\frac{n}{2}-1}}{n^2 - 1} & n \text{ çift} \\ 0 & n \text{ tek} \end{cases} \quad (3)$$

$$V_n = \begin{cases} V_{DD} & n = 0 \\ -\frac{4V_{DD}}{\pi} & n = 1 \\ 0 & n \text{ çift} \\ \frac{4V_{DD}}{\pi} \frac{(-1)^{\frac{n+1}{2}}}{n} & n \text{ tek} \end{cases} \quad (4)$$

(3) ve (4) katsayıları kullanılarak harmoniklerin empedansları bulunabilir:

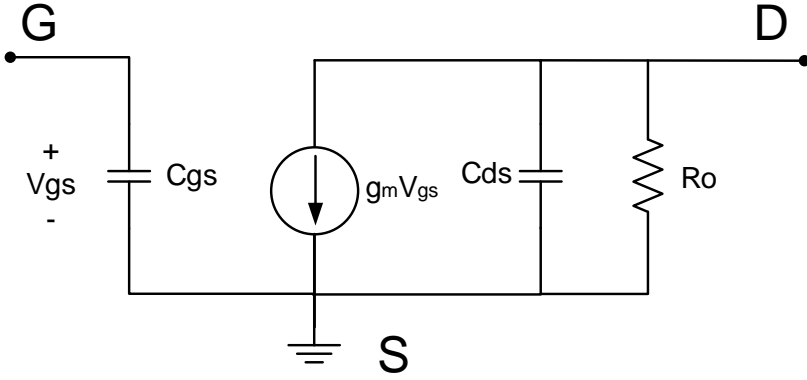
$$Z_n = \frac{V_n}{I_n} = \begin{cases} -\frac{8}{\pi} \frac{V_{DD}}{I_{tepe}} & n = 1 \\ 0 & n \text{ çift} \\ \infty & n \text{ tek} \end{cases} \quad (5)$$

Bu empedanslar incelendiğinde, F sınıfı kuvvetlendiricinin çıkış katı tasarımında çift sayılı harmoniklerin kısa devre edilmesi, tek sayılı harmoniklerin de açık devre edilmesi gerektiği açıkça görülmektedir.

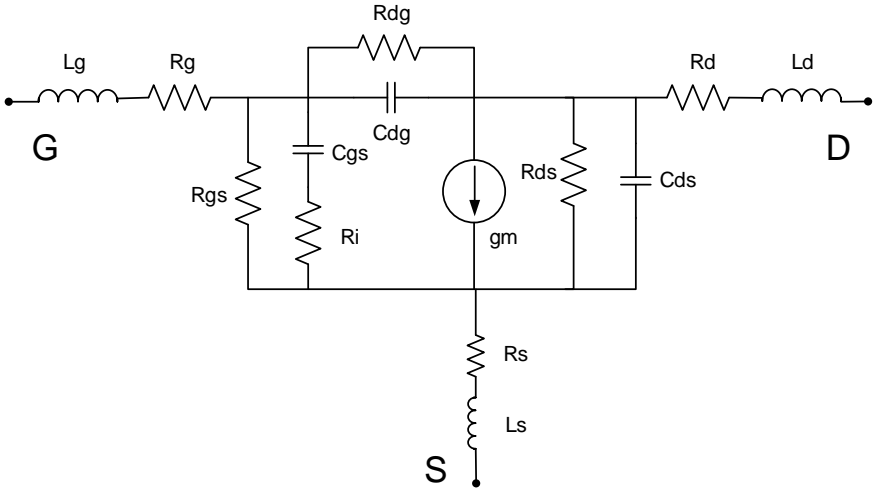
1.2. Doğrusal Olmayan Etkiler (Nonlinear Effects)

Kuvvetlendirici tasarımında kullanılan transistörler frekans ve güç arttıkça doğrusallıktan uzaklaşmaya başlarlar. Sadece akım kaynağı ve çıkış direnci ile modellenen yapıdan, daha gelişmiş yapıda model kullanımı doğrusal olmayan etkileri gözlemleyebilmek için

gereklidir. Yüksek frekanslarda çalışabilen alan etkili tranzistorlar için temel bir model Şekil 1.2’de verilmiştir [4]. Bu model yüksek frekanslı devre elemanlarında genel analizler ve tasarımlar için uygundur. Ancak yüksek güçlü sistemlerde büyük işaretler tranzistor üzerinde önemli doğrusal olmayan etkiler oluşturmaktadır. Bu nedenle yüksek frekanslı ve yüksek güçlü sistemlerde Şekil 1.3’tekinе benzer bir model karşımıza çıkmaktadır.



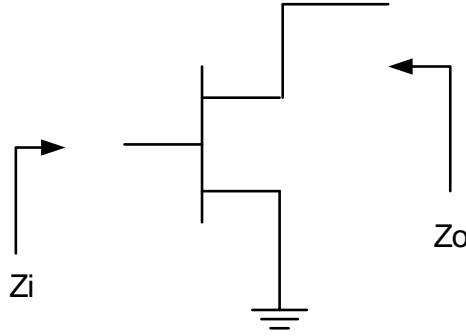
Şekil 1.2. Alan Etkili Tranzistorlar için Temel Eşdeğer Devre



Şekil 1.3. Güç Tranzistorları için Yüksek Frekans Eşdeğer Devresi

Özellikle giriş ve çıkışta yüksek genlikli işaretlerin bulunması, başta giriş ve çıkışta bulunan C_{gs} ve C_{ds} kapasiteleri olmak üzere birçok parazitik devre elemanlarının değerlerinin zamanla değişmesine sebep olmaktadır. Değişen devre elemanı değerleri harmoniklerin üretilmesine sebep olmakta, bu nedenle çıkış işareti bozmaktadır. Doğrusal olmayan bu etki ideal koşullar dikkate alınarak yapılan tasarımlarda, tasarım ile ölçümler arasında ciddi farklara sebep olmaktadır.

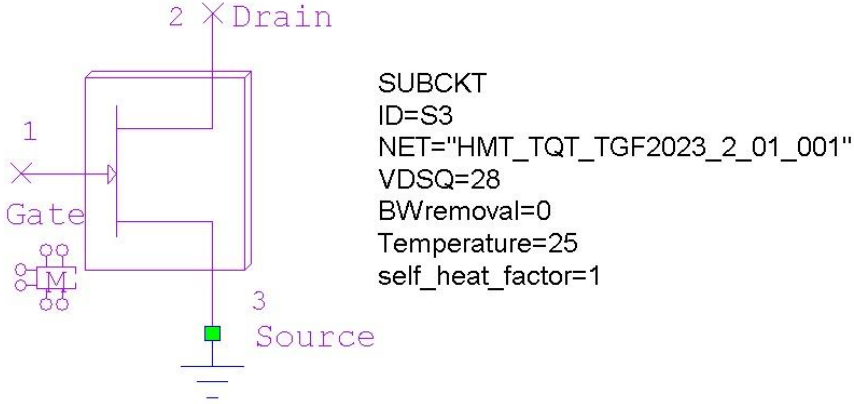
Yüksek güç altındaki etkileri daha iyi incelemek için bu çalışmada tasarlanan F sınıfı kuvvetlendiricide doğrusal olmayan bir model yardımıyla yüksek güç altındaki giriş ve çıkış empedansları belirlenmiştir. Bu sayede doğrusal olmayan etkilerle birlikte bütün parazitik devre elemanları da tasarımda kullanılmıştır (Şekil 1.4).



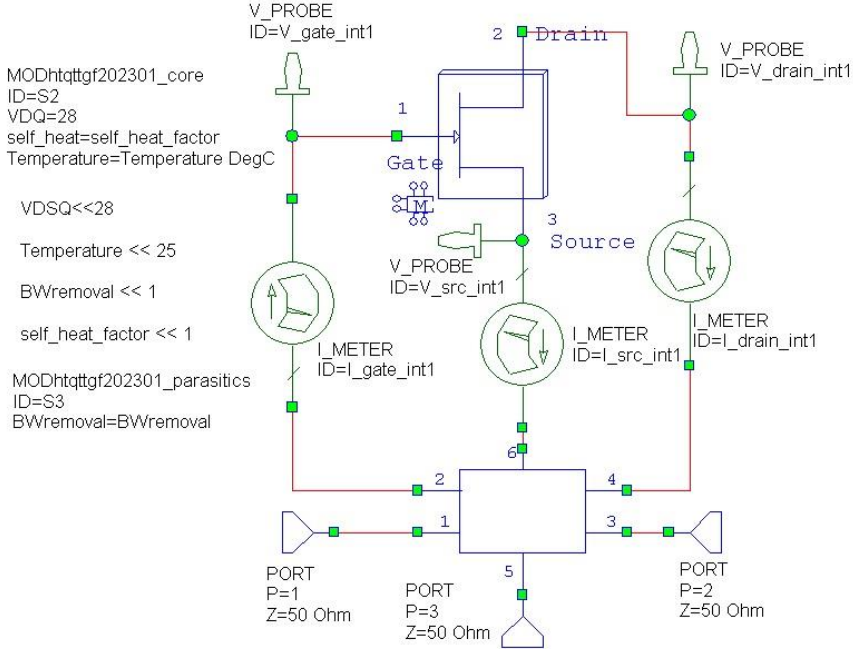
Şekil 1.4. Giriş ve çıkıştan görülen empedans değerleri

Empedansların belirlenebilmesi için yük-çekim (load-pull) ve kaynak-çekim (source-pull) analizleri 8.2GHz merkez frekansta 27dBm giriş gücü için yapılmıştır. Doğrusal olmayan model olarak Modelithics firmasının sıcaklık duyarlılığı bulunan gelişmiş modeli kullanılmıştır (Şekil 1.5). Model yapısında ilgili firma tarafından hazırlanmış ve iç yapısı gizli bir HEMT çekirdek ile parazitik etkiler içeren ek bir yapının birleştirilmesi ile oluşturulmuştur (Şekil 1.6). Modelde “VDSQ” savaktaki DC besleme değerini, “BWremoval” bağlantı teli etkisini (Bond wire) (bağlantı teli etkisi açık=0), “Temperature” test sıcaklığını, “self_heat_factor” tranzistor

çalışırken ortaya çıkacak ısıdan etkilenip etkilenmeyeceğini belirlemede kullanılmaktadır. Tasarlanan kuvvetlendirici sürekli işaret ile çalışılacağı için “self_heat_factor” değeri “1” olarak belirlenmiştir.



Şekil 1.5. Triquint TGF2023-2-01 için Modelithics Doğrusal Olmayan Modeli



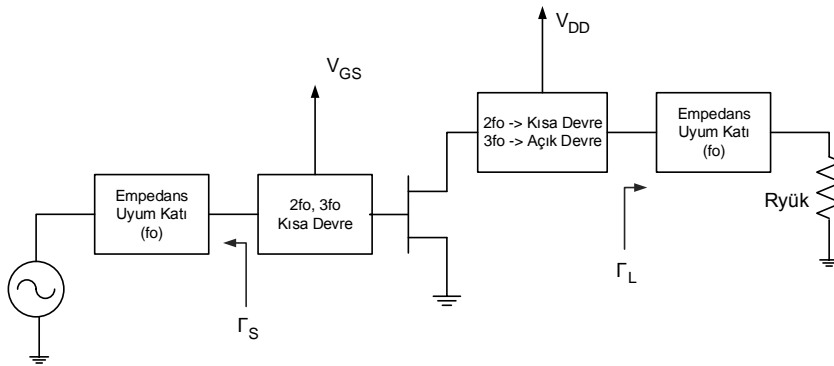
Şekil 1.6. Triquint TGF2023-2-01 için Modelithics modelinin iç yapısı

2. TASARIM

Giriş kısmında anlatıldığı gibi F sınıfı kuvvetlendiricilerde ideal durumda bütün çift harmonikler kısa devre olacak şekilde, tek harmonikler de açık devre olarak şekilde sonlandırıldığında verim %100 olmaktadır. Ancak tranzistorun kazanç-bant genişliğinin sınırlı oluşu (özellikle C_{ds} kapasitesinin etkisi) ve devre karmaşıklığının artmasıyla sonucunda kayıpların da yükselmesi sebebiyle pratikte ilk birkaç harmoniğin sonlandırılması yeterli olmaktadır [1]. Raab [5] yaptığı çalışmada ilk 2. harmoniğin uygun sonlandırılması durumunda verimin %70.7, ilk 3. harmoniğin uygun sonlandırılması durumunda ise verimin %81.7 olacağı göstermiştir.

Seçilen tranzistorun kazanç-bant genişliği 30GHz olduğu için ve 8.2GHz merkez frekanslı tasarımda ilk 3 harmoniğin dikkate alınması, devre karmaşıklığını arttırmamak ve diğer harmonikleri kullanmak uygulamada mümkün olmayacağı için yeterlidir.

Tasarlanan kuvvetlendirici yapısı 4 bloktan oluşmaktadır: Harmoniklerin şekillendirilmesi için gerekli yapılar tranzistora yakın, asıl işaret için olan empedans uydurucuları da yükten önce ve kaynaktan sonra konumlandırılmıştır (Şekil 2.1). Giriş katında 2. ve 3. harmonikler kısa devre olacak şekilde, çıkış katındaysa 2. harmonik kısa 3. harmonik açık devre olacak şekilde devre tasarımı yapılmıştır.

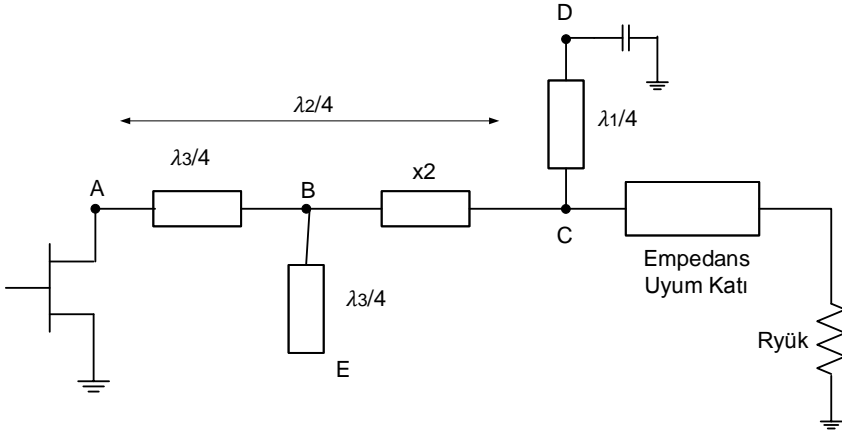


Şekil 2.1. Devrenin genel yapısı

Çıkış katında 2. harmoniğin kısa devre ve 3. harmoniğin açık devre olarak sonlandırılması için Şekil 2.2’de verilen yapı kullanılmıştır. Bu yapıda ilgili hatların uzunlukları harmoniklerin dalga boyları cinsinden gösterilmiştir. Bu sonlandırma devresi incelendiğinde harmonikler için Tablo 2.1’de verilen empedanslar oluşmaktadır.

Tablo 2.1. Tasarımdaki Empeadans Değerleri

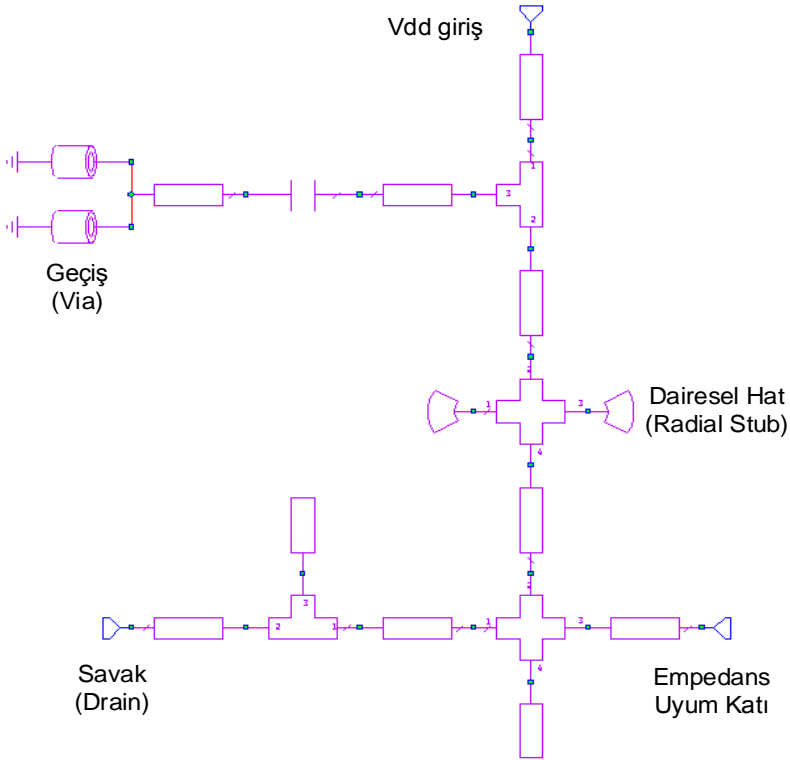
Nokta	Empedans Durumu
A	2fo kısa devre, 3fo açık devre
B	3fo kısa devre
C	fo açık devre, 2fo kısa devre, 3fo açık devre
D	fo kısa devre, 2fo kısa devre, 3fo kısa devre
E	3fo açık devre



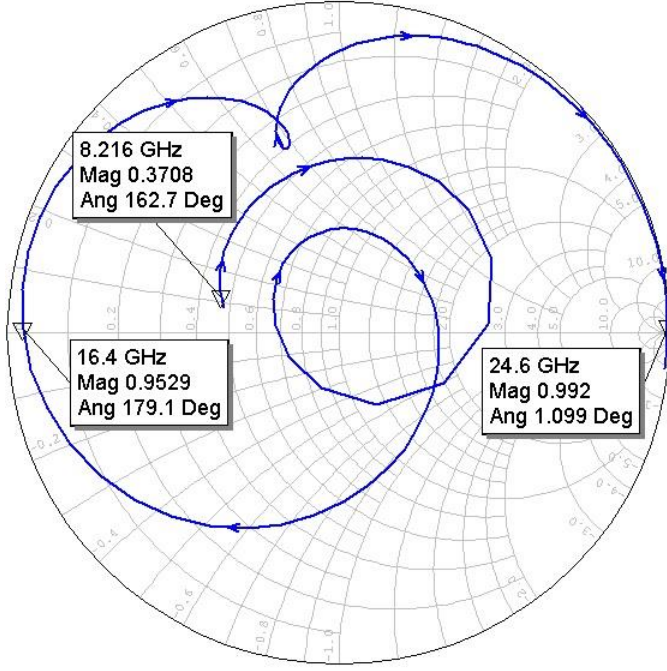
Şekil 2.2. Tasarımda kullanılan sonlandırma devresi

Şekil 2.2’deki devre NI AWR Microwave Office aracı ile bilgisayar destekli olarak hazırlanmıştır. Mikroşerit hatların karakteristik

empedans olarak 50Ω tercih edilmiştir. Taban olarak Rogers firmasına ait RT/duroid 6035HTC (0.508mm, DK=3) seçilmiştir. Şekil 2.2’de verilen yapıda da görüldüğü gibi D noktasında harmonik frekanslarında kısa devre etkisi oluşturulması için bir kondansatör gereklidir. Mevcut kondansatörler incelendiğinde kondansatörlerin çalışma frekanslarının yetersiz olduğu görülmektedir. Bu nedenle 1. ve 2. harmonikte yüksek değerli kapasite etkisi oluşturacak yapıda radyal hat (radial stub) kullanılmıştır (Şekil 2.3). Radyal hatların diğer önemli özelliği de dikdörtgen yapıli mikroşerit yapılaraya göre daha geniş bantlı olmalarıdır. Tasarlanan devre ile 2. harmonik için kısa devreye yakın, 3. harmonik için de açık devreye yakın bir sonlandırım elde edilmiştir ve Şekil 2.4’te savak ucundan görülen giriş empedans değerleri verilmiştir.

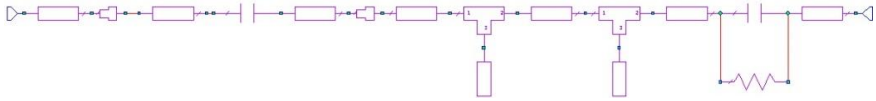


Şekil 2.3. Harmonik sonlandırım ve besleme devresi

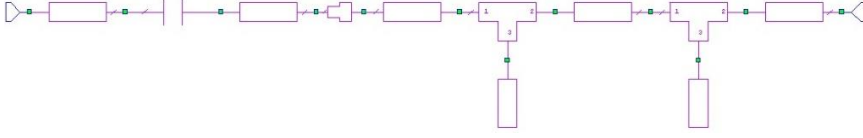


Şekil 2.4. Savaktan görülen empedans değerleri

Harmoniklerin uygun sonlandırılması için gerekli devrenin tasarımının ardından bu yapı tranzistore eklenerek merkez frekans için gerekli uygun sonlandırım yük ve kaynak çekim (Source, Load Pull) yöntemiyle belirlenmiştir. Giriş katında 2. ve 3. harmonikler için kısa devre olacak şekilde sonlandırım tercih edilmiştir. Giriş için bulunan yansıma değeri (Γ_S) $0.52 \angle -102.3^\circ$ ve çıkış için bulunan yansıma değeri (Γ_L) $0.42 \angle -93.0^\circ$ 'dir. Elde edilen yansıma değerleri için gerekli empedans uydurucu devreler ayrı ayrı tasarlanmıştır (Şekil 2.5 ve Şekil 2.6)



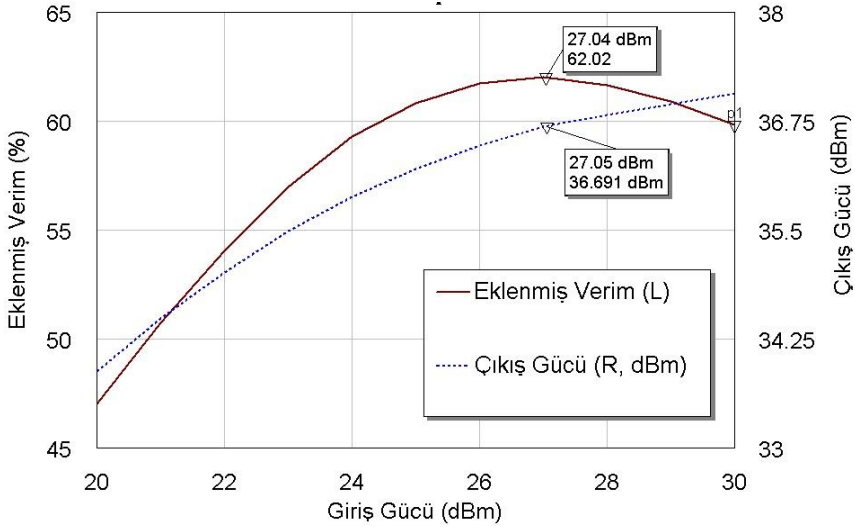
Şekil 2.5. Giriş katı empedans uyum devresi



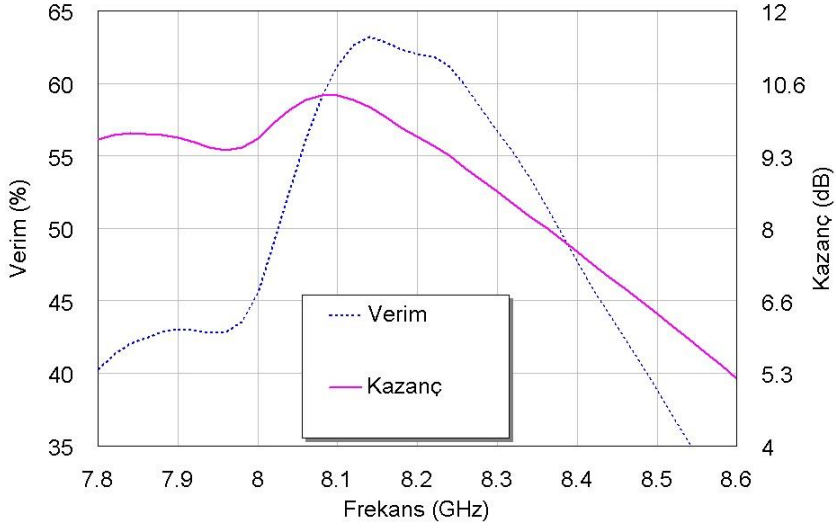
Şekil 2.6. Çıkış katı empedans uyum devresi

3. BENZETİM SONUÇLARI

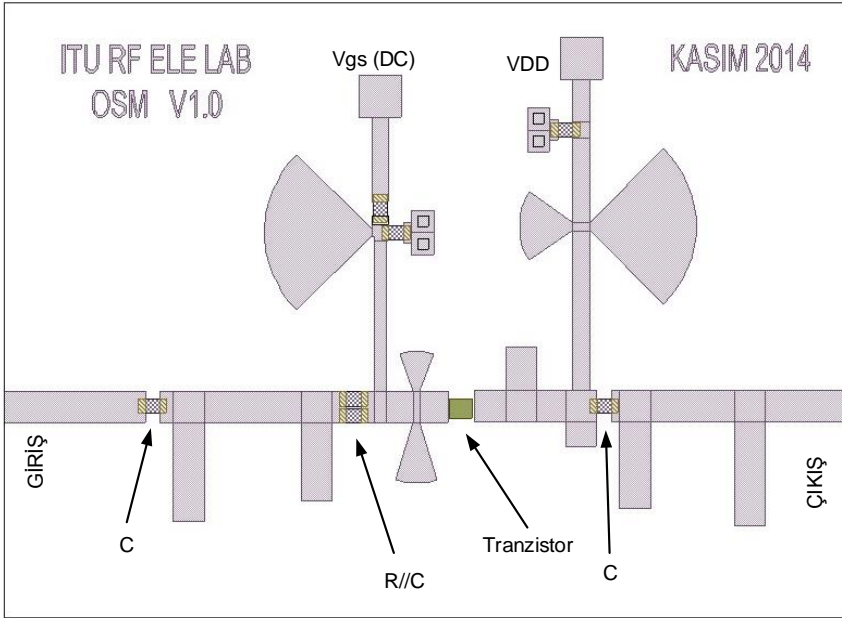
Tasarımın son aşamasında bütün katlar birleştirilmiş ve devrenin başarımı incelenmiştir. Yapılan benzetimlerde, 8.2GHz merkez frekansta 27dBm giriş gücü için 36.7dBm çıkış gücüne ulaşılmış ve güç eklenmiş verim (power added efficiency, PAE) %62 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.1). Bu durumdaki kazanç da yaklaşık 9.3dB'dir. %60 ve üzeri verim (27dBm giriş gücü için) 170 MHz bant genişliğinde sağlanmıştır (8088 MHz – 8258 MHz) (Şekil 3.2). %60 üstü verim bölgesinde kazanç değişimi 1dB civarındadır. Bütün katlar birleştirildiğinde devre sınırları ile birlikte devre boyutu 20mm x 30mm olmaktadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.1. Eklenmiş verim ve çıkış gücü (PAE and AM-AM)



Şekil 3.2. Tasarlanan kuvvetlendiricinin kazanç ve veriminin frekansla değişimi



Şekil 3.3. Tasarlanan kuvvetlendiricinin serimi, 20mm x 30mm

4. SONUÇ

Yapılan çalışmada X bantta çalışan bir güç kuvvetlendirici GaN HEMT kullanarak bilgisayar destekli yazılım araçları ile doğrusal olmayan tranzistor modeli kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarımda radyal hatların kullanımı ile geniş bantlı yüksek değerli kapasitif elemanlar gerçekleştirilmiştir. Bu yapının bir diğer katkısı da üretim kaynaklı olabilecek küçük sapmalardan devrenin etkilenmemesi sağlamasıdır.

İlk 3 harmoniğin uygun sonlandırılmış teorik bir F sınıfı kuvvetlendirici verimi %82'dir. Tranzistor modeli kullanılarak yapılan ve ideal empedans uydurucu yapılar ile 3. harmoniğe kadar uygun sonlandırılması durumunda elde edilen verim ise %68'dir. İdeal empedans sonlandırıcıları yerine ayrı devre elemanları ve mikroşerit yapıların eklenmesiyle birlikte verim %62'ye düşmüştür. Tasarlanan devredeki verim teorik verime göre yaklaşık %20 düşmüştür. Bu durum teorik tasarımdan pratiğe geçişte yüksek frekans ve güçte etkili parazitik devre elemanlarının etkilerinin önemli seviyede göstermektedir.

Serimi de hazırlanan çalışmada bir sonraki aşamada devrenin üretimi ve testlerinin yapılması planlanmaktadır. Tasarım sürecinde yüksek frekans tasarım ilkelerine dikkat edilerek tasarım yapılmıştır. Modelin yüksek başarımı ve mikroşerit hatların uygun şekilde kullanımı ile üretimin ardından büyük bir sapma olmaması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Gao, S., “High Efficiency Class F RF/Microwave Power Amplifiers”, MTTs Microwave Magazine, Cilt 7, Sayı 1, 40–48, 2006.
- [2] Moore, A. ve Jimenez, J., “GaN RF Technology for Dummies, Triquint Special Edition”, John Wiley & Sons, Hoboken NJ, 2014.
- [3] Triquint TGF2023-2-01 6 Watt Discrete Power GaN on SiC HEMT Datasheet, Triquint internet sitesi (www.triquint.com), 2013.
- [4] Colantonio, P., Giannini, F. ve Limiti, E., “High Efficiency RF and Microwave Solid State Power Amplifier”, John Wiley & Sons, GB, 2009.
- [5] Raab, F.H., “Class F Power Amplifiers with Maximally Flat Waveforms”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech., Sayı 45, s.2007-2012, Kasım 1997.