

Analisa Ketidaklinearan pada Penguat Daya *Switching* Kelas-E untuk Aplikasi Frekuensi Radio Pita Lebar

Dessy Oktani¹

Politeknik Negeri Batam, Batam, Indonesia

E-mail: dessy@polibatam.ac.id

Received: 18-07-2022

Accepted: 01-08-2022

Published: 01-08-2022

Abstrak

Dalam sistem telekomunikasi digital nirkabel frekuensi tinggi, kinerja sebuah penguat akan sangat berdampak secara signifikan terhadap konsumsi daya. Konsumsi daya yang tinggi akan sangat berpengaruh terhadap masa pakai baterai, terlebih pada perangkat *handheld*. Pada penelitian ini akan dirancang sebuah penguat daya *switching* kelas E pita lebar 2.4 GHz dan dianalisa ketidaklinearan. Rancangan dibuat dengan menggunakan HEMT berbahan galium nitrit agar mendapatkan efisiensi cukup tinggi yaitu di atas 70%. Optimasi rangkaian dilakukan dengan menambahkan transistor *switching* pada *source* untuk mendapatkan tambahan efisiensi. Pengujian kelinearan rangkaian dilakukan dengan memberikan masukan multi-nada untuk mengukur IMD (Intermodulation) yang dihasilkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan menggunakan GaN HEMT efisiensi yang didapatkan mencapai 75% dengan daya keluar 44 dBm dan penguatan 9 dBm pada masukan 1-nada, sedangkan pada dua nada dicapai efisiensi 55%. Dengan tambahan *switching* pada *source*, dan efisiensi pada dua nada menjadi 59% dengan daya keluar sebesar 40 dBm, terjadi penguatan sebesar 6 dBm. Hasil pengukuran IMD menunjukkan bahwa pada jarak antar frekuensi 100Mhz rangkaian penguat memiliki kelinearan yang lebih tinggi dibandingkan pada jarak antar frekuensi 20MHz, yaitu didapatkan IIP3 sebesar 41,81 dBm dan OIP3 sebesar 49,68 dBm.

Kata kunci: *Switching power amplifier*, GaN HEMT, kelas E, penguat daya

Abstract

Nonlinearity of the electronic component is the common characteristic due to natural property of its material. But this nonlinearity has the critical impact when the component assembled to a circuit. In example is nonlinearity of the transistor that has the big impact to efficiency of the power amplifier. That is critical issue since the efficiency of the power amplifier has the relation to the battery life of the handheld equipment. On this research, a class E switching power amplifier for broadband 2.4 GHz is designed and nonlinearity is observed. The circuit design is using HMET from Galium Nitrit to achieve above 70% efficiency. Additional switching transistor added to the Source side to increase the efficiency. Nonlinearity characterization observed by IMD measurement using multi tone signal. The simulation shows that by using the GaN HEMT, efficiency up to 75% with 44 dBm power out and 9 dBm gain can be achieved at the 1-tone input and efficiency up to 78% at the 2-tone input. IMD measurement shows that the amplifier circuit more linear at the spacing 100 MHz than 20 MHz with the IIP3 at 41.81 dBm and OIP3 at 49.68 dBm.

Keywords: *Switching power amplifier, GaN HEMT, class E*

Pendahuluan

Kondisi pandemi yang terjadi memaksa manusia menggunakan komunikasi secara nirkabel, dengan menjaga jarak dan sebisa mungkin *contactless*. Selain itu perkembangan industri 4.0 dimana semua perangkat terhubung guna dikendalikan secara otomatis membuat kebutuhan sistem telekomunikasi dengan kapasitas pengiriman dan penerimaan data menjadi semakin besar, semua permasalahan ini dapat dilakukan dengan menggunakan sistem telekomunikasi digital.

Dalam sistem telekomunikasi digital nirkabel frekuensi tinggi, misalnya 2.4 GHz, kinerja sebuah penguat akan sangat berdampak secara signifikan terhadap konsumsi daya. Konsumsi daya yang tinggi akan sangat berpengaruh terhadap masa pakai baterai. Teknologi termutakhir adalah penguat dengan menggunakan teknologi *switching*. Pada teknologi penguat RF yang berbasis *switching* semakin tinggi frekuensi, semakin cepat proses *switching* yang terjadi, sehingga ketidakidealan sebuah komponen elektronik akan berdampak besar pada kinerja sebuah penguat RF, salah satu contohnya adalah dampaknya terhadap masalah efisiensi.

Beberapa konsep desain penguat daya, dirancang untuk mampu memberikan efisiensi penuh (100%) pada kondisi ideal[2], misalnya pada penguat *switching* seperti kelas-D, E, dan F karena tidak terdapat *overlapping* tegangan dan gelombang arus[4]. Tetapi terjadi penurunan kinerja disebabkan oleh kapasitansi parasitik dan resistansi dari transistor saklar ketika terdapat dua sinyal input dengan frekuensi berbeda. Pada penelitian sebelumnya dilakukan menggunakan MOSFET pada frekuensi 1,8 GHz dengan *power added efficiency* (PAE) 38%[1] Perancangan menggunakan GaN HeMT dilakukan pada frekuensi 1,9 – 4,3 GHz didapatkan PAE sebesar 57-62%[5]. Hamid raza melakukan penelitian pada tahun 2018 menggunakan GaN HeMT untuk penguat kelas AB mendapatkan PAE sebesar 50,86% pada frekuensi 2,8 GHz[20]. Penguat daya kelas E dengan PAE 75,8% didapatkan pada frekuensi 3,5 GHz[13].

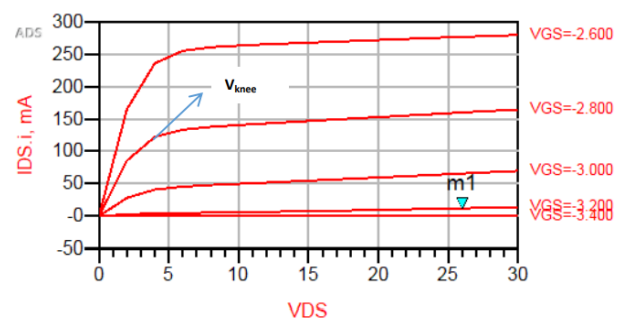
Pada penelitian ini dirancang penguat daya *switching* kelas-E yang bekerja pada frekuensi 2,4 GHz menggunakan perangkat lunak ADS. Untuk melihat karakteristik dan ketidaklinearannya dilakukan metode pengetesan dua nada, sehingga diperoleh nilai PAE, penguatan, distorsi harmonik, dan nilai distorsi intermodulasi untuk melihat linearitas dari rancangan yang dibuat.

Metode Penelitian

Pada tulisan ini dilakukan perancangan dan analisa ketidaklinearan penguat RF *switching* kelas E dengan GaN untuk aplikasi pita lebar menggunakan metoda perancangan *harmonic balanced* dengan tahapan sebagai berikut: 1.Kurva karakteristik arus dan tegangan (I-V) digunakan untuk menentukan titik kerja dari transistor yang digunakan. 2.*Load pull* dengan cara mengubah beban sesuai ayunan gelombang tegangan dan arus sehingga diperoleh kontur daya dan PAE, tujuannya untuk memperoleh daya yang optimal. 3.Penyesuaian impedansi *input* dan *output* agar tercapai transfer daya maksimum. 4.Karakteristik dua nada dilakukan untuk melihat ketidaklinearan dari penguat RF *switching*.

A. Kurva Karakteristik I-V (arus dan tegangan)

Kurva karakteristik I-V digunakan untuk melihat titik kerja dari transistor, seperti terlihat pada gambar 1. Arus I_{DS} naik seiring dengan kenaikan tegangan V_{DS} sampai pada tegangan tertentu akan mengalami saturasi. Semakin positif nilai V_{GS} nya, nilai I_{DS} pada data saturasinya semakin besar.

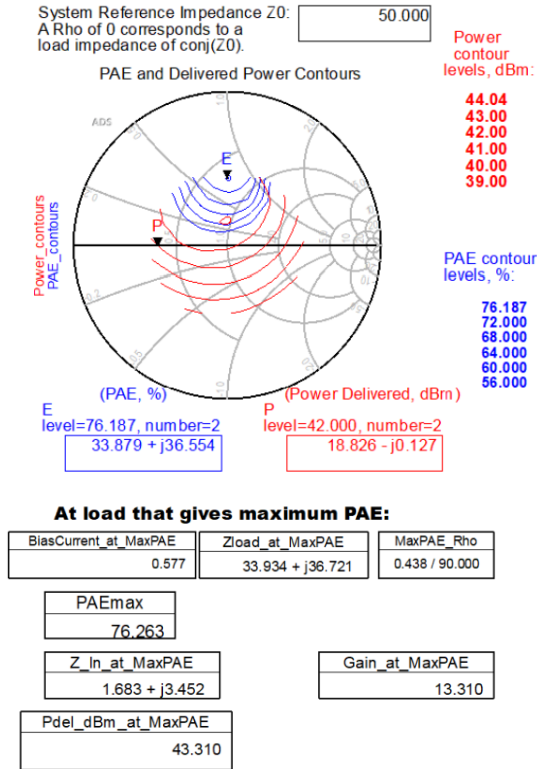


Gambar 1. Kurva karakteristik I-V GaN HEMT.

B. Loadpull

Dalam simulasinya, *load pull* mensweeping nilai impedansi yang ada pada divais kemudian mengukur spesifikasi pokok dari divais tersebut pada masing-masing nilai impedansi. Data performansi dengan nilai konstan yang dihasilkan kemudian diplot pada *smith chart* berupa kontur. Dari data kontur tersebut dapat dilihat dengan jelas berapa impedansi yang ada pada divais dan performansi yang bisa diharapkan dengan divais tersebut. Pada setiap divais, daya yang disalurkan ke beban akan sangat tergantung pada impedansi beban, sedangkan impedansi akan optimal pada kondisi beban mendekati short circuit. Gambar 2 merupakan data kontur PAE pada

simulasi loadpull, dimana didapatkan PAE maksimum sebesar 76% dengan gain 13 dB dan daya 43 dBm pada Z_{in} 1,683+j3,452 dan $Z_{load} = 33,934 + j36,721$.



Gambar 2. Data kontur PAE loadpull.

C. Penyesuaian Impedansi

Rangkaian penyesuaian impedansi dihubungkan antara sumber dan beban, rangkaian biasanya dirancang sedemikian rupa sehingga mentransfer hampir semua daya ke beban, yang mana impedansi masukan sama dengan konjugasi kompleks dari impedansi keluaran sumber.

Agar daya yang dilewatkan ke beban hanya berada pada frekuensi fundamental maka di tambahkan rangkaian tank resonator pada keluarannya. Dimana nilai L dan C dihitung dengan persamaan 1:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

dimana:

- f : frekuensi fundamental
- L : Induktansi
- C : kapasitansi

D. Karakterisasi dua nada

Karakterisasi multi nada digunakan untuk melihat kinerja penguat RF pada *broadband* (pita lebar) yaitu dengan memasukkan beberapa frekuensi (nada) masukan. Jika suatu rangkaian penguat bersifat linear secara sempurna, maka penguat tersebut akan menghasilkan sinyal keluaran yang hanya pada frekuensi masukan. Namun ketika suatu rangkaian penguat mengandung sifat ketidaklinearan, maka pada keluarannya akan menghasilkan sinyal tambahan dengan frekuensi yang berbeda terhadap sinyal-sinyal masukannya. Sehingga sifat tidak linear sebuah rangkaian penguat akan terlihat jelas pada saat rangkaian tersebut jika diberikan masukan multi nada. Sinyal tambahan akibat sifat tidak linear dari penguat tersebut disebut IMD.

Gambar 3 menunjukkan skematik dari rangkaian karakterisasi multinada. Pada penelitian ini sinyal masukan yang dipakai adalah dua nada dengan besaran frekuensi seperti ditulis pada persamaan (2) dengan kombinasi jarak antar frekuensi 20 MHz dan 100 MHz. V_{GS} diberikan sebesar -3.2 volt dan V_{DS} sebesar 48 volt. Impedansi sumber sebesar 1.7+j3.5 sesuai dengan yang didapatkan pada *loadpull*, dengan variasi daya dari 20 hingga 50 dBm.

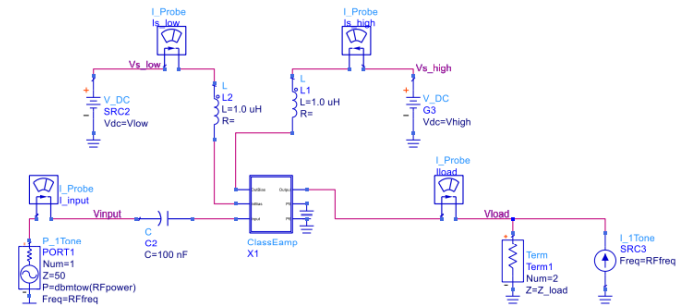
$$f_1 = RF_{freq} + \frac{freqspacing}{2}$$

$$f_2 = RF_{freq} - \frac{freqspacing}{2} \quad (2)$$

Dimana:

RF_{freq} : frekuensi radio yang digunakan

$Freq\ spacing$: jarak antar frekuensi yang ditentukan



Gambar 3. Skematik karakterisasi dua nada

Hasil dan Diskusi

A. Penguat Daya Kelas E satu nada

Untuk menganalisa kinerja penguatan daya dari penguat RF *switching* kelas E GaN HEMT di frekuensi dasar (fundamental) satu nada 2.4 GHz dengan menggunakan rangkaian skematik gambar 1. Dari simulasi setimbang harmonik yang dilakukan, diperoleh hasil kinerja penguatan daya RF ditampilkan dalam Tabel I dimana hasil simulasi menggunakan variasi daya sumber dari 20 hingga 50dBm. efisiensi sebesar 75% ketika daya sebesar masukan 36 dBm dan didapat daya keluaran 44 dBm yang artinya terjadi penguatan sebesar 8 dB.

TABEL I
HASIL SIMULASI PENGUAT DAYA SATU NADA

RF Power, dBm	Transducer Power Gain	Power Added Effisiensi,%	Daya Keluaran, dBm
20	12.092	21.621	32.092
21	12.073	23.832	33.073
22	12.084	26.782	34.084
23	12.087	30.040	35.087
24	12.079	33.621	36.079
25	12.057	37.539	37.057
26	12.021	41.802	38.021
27	11.969	46.419	38.969
28	11.899	51.396	39.899
29	11.808	56.699	40.808
30	11.634	61.861	41.634
31	11.284	66.052	42.284
32	10.782	69.319	42.782
33	10.167	71.823	43.167
34	9.468	73.656	43.468
35	8.696	74.714	43.696
36	7.857	74.906	43.857
37	6.976	74.068	43.976
38	6.082	72.522	44.082
39	5.181	70.665	44.181
40	4.278	68.224	44.278
41	3.395	65.663	44.395
42	2.496	62.875	44.496
43	1.570	59.802	44.570
44	0.664	55.969	44.664
45	-0.250	51.656	44.750
46	-1.182	46.757	44.818
47	-2.138	40.786	44.862
48	-3.117	33.596	44.883
49	-4.124	25.000	44.876
50	-5.113	14.990	44.887

B. Penguat Daya Kelas E dua nada

Karakterisasi dua nada (*two-tone characterization*) dilakukan untuk memperoleh karakteristik ketidaklinearan penguat daya RF *switching* kelas E GaN HEMT. Karakteristik ketidaklinearan diperoleh dari spektrum frekuensi di keluaran penguat daya RF *switching*, dengan mengamati distorsi intermodulasi khususnya distorsi inter-

modulasi orde ke-3. Karakteristik distorsi intermodulasi orde ke-3 penguat daya RF *switching* GaN HEMT diamati dari kurva relasi IMD3 versus Pin. Karakterisasi dua nada dilakukan dengan frekuensi dua nada f1 dan f2 dengan jarak antar frekuensi (spasi) yaitu 20 MHz untuk kedua topologi penguat daya rf *switching* kelas E yang berbeda tanpa atau dengan *switching* transistor di *source*.

Hasil simulasi karakterisasi dua nada penguat daya kelas E GaN HEMT ditunjukkan pada tabel II dengan spasi antar frekuensi 20MHz. Efisiensi terbaik sebesar 55% pada saat daya 33 dBm dengan penguatan 8 dB, dan daya keluaran, PO sebesar 41 dBm.

TABEL II
HASIL SIMULASI PENGUAT DAYA DUA NADA TANPA SWITCHING TRANSISTOR PADA SOURCE

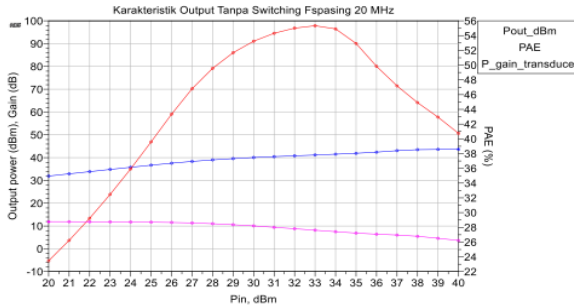
$\Delta f = 20 \text{ MHz}$			
Source Power, dBm	Transducer Power Gain	Power Added Effisiensi,%	Daya Keluaran, dBm
20	11.911	23.466	31.911
21	11.894	26.234	32.894
22	11.864	29.236	33.864
23	11.819	32.468	34.819
24	11.755	35.925	35.755
25	11.672	39.591	36.672
26	11.554	43.361	37.554
27	11.345	46.805	38.345
28	11.011	49.558	39.011
29	10.576	51.681	39.576
30	10.050	53.241	40.050
31	9.451	54.314	40.451
32	8.804	55.011	40.804
33	8.147	55.339	41.147
34	7.511	54.914	41.511
35	6.908	52.936	41.908
36	6.418	49.830	42.418
37	6.038	47.183	43.038
38	5.496	44.910	43.496
39	4.603	42.941	43.603
40	3.644	40.740	43.644
41	2.659	37.956	43.659
42	1.642	34.783	43.642
43	0.603	31.348	43.603
44	-0.468	27.503	43.532
45	-1.549	23.111	43.451
46	-2.696	17.406	43.304
47	-3.866	10.802	43.134

Kurva karakteristik keluaran penguat daya RF *switching* kelas E GaN HEMT pada gambar 4 memperlihatkan penguatan daya terus menurun disebabkan karena nilai daya masukan yang diberikan bertambah besar dimana nilai

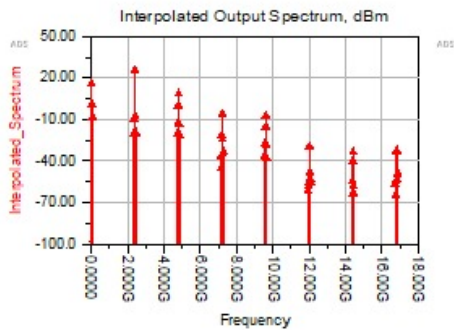
$$Gain = 10 \log \frac{P_o}{P_{in}}$$

Spektrum harmonik dan intermodulasi yang terjadi pada keluaran dua nada penguat daya RF *switching* kelas E GaN HEMT ini dapat digam-

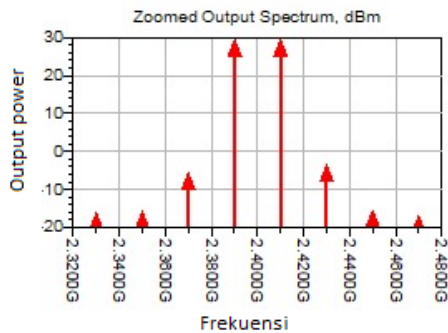
barkan seperti terlihat pada gambar 5 sedangkan gambar 6 merupakan spektrum harmonik dan intermodulasi ketika dilihat pada frekuensi fundamentalnya.



Gambar 4. Grafik karakteristik *output* fspacing 20 MHz



Gambar 5. Spektrum harmonik dan intermodulasi dua nada penguat daya RF *switching* kelas E GaN HEMT dengan $\Delta f = 20$ MHz



Gambar 6. Spektrum keluaran dua nada penguat daya RF *switching* kelas E GaN HEMT $\Delta f = 20$ MHz pada frekuensi fundamental

TABEL III
PERBANDINGAN KARAKTERISTIK SATU NADA DAN DUA NADA

Parameter Saat Efisiensi Terbaik	Satu Nada	Dua Nada
Efisiensi	75%	55%
Daya Sumber	36 dBm	32 dBm
Penguatan	9 dBm	9 dBm
Daya Keluar	44 dBm	41 dBm

TABEL IV
PERBEDAAN KARAKTERISTIK DUA NADA JARAK ANTAR FREKUENSI 20MHZ DENGAN DAN TANPA TRANSISTOR *SWITCHING* PADA *SOURCE*

Parameter Saat Efisiensi Terbaik	Tanpa <i>Switching</i> Tambahan	Dengan <i>Switching</i> Tambahan
Efisiensi	55%	59%
Daya Sumber	33 dBm	34 dBm
Penguatan	8 dBm	6 dBm
Daya Keluar	41 dBm	40 dBm

Dari data hasil simulasi yang diperoleh, terlihat bahwa pada masukan satu nada efisiensi terbaik didapatkan sebesar 75% dengan daya sumber 36 dBm sementara pada masukan dua nada hanya mencapai 55% dengan daya sumber 32 dBm sebagaimana ditampilkan pada tabel III. Efisiensi menjadi menurun ketika menggunakan masukan dua nada dikarenakan terjadi intermodulasi dari dua frekuensi yang digunakan pada masukannya.

Dari hasil simulasi pada rangkaian dengan tambahan *switching* pada *source*, terlihat bahwa terjadi peningkatan PAE sebesar 4% seperti terlihat pada tabel IV. Sehingga diperoleh efisiensi akhir mendekati 60%.

TABEL V
PERBANDINGAN IP3 DENGAN $\Delta f = 20$ MHz

Karakteristik	Tanpa <i>switching</i> tambahan	Dengan <i>switching</i> tambahan
IIP3 (dBm)	44.9	39.8
OIP3 (dBm)	45.4	47.3

Pada tabel V terlihat bahwa pada jarak antar frekuensi 20MHz rangkaian tanpa *switching* tambahan memiliki titik potong yang lebih tinggi (lebih linier) dibandingkan dengan rangkaian dengan tambahan *switching*, sedangkan dari segi efisiensi rangkaian dengan *switching* tambahan memiliki efisiensi yang lebih tinggi terlihat besarnya output yang dihasilkan (OIP3).

Simpulan

Telah dirancang rangkaian penguat daya *switching* class E menggunakan GaN HEMT dengan tambahan *switching* pada *source*, dari hasil simulasi dengan menggunakan beberapa variasi daya, jarak antar frekuensi dan *duty cycle* dengan masukan satu nada dan dua nada menunjukkan bahwa saat masukan satu nada menghasilkan PAE lebih tinggi daripada saat masukan dua nada yaitu sebesar 75%. Sedangkan pada saat masukan dua nada PAE tertinggi yaitu mendekati 55%. Hal tersebut

disebabkan karena pada saat masukan dua nada terjadi distorsi intermodulasi. Tambahkan *switching* pada *source* berhasil memberikan tambahan PAE sebesar 4% sehingga menjadi 59% ketika diberikan *duty cycle* 75% pada *switching* tambahan tersebut. Jarak antar frekuensi yang lebih besar juga berpengaruh terhadap PAE yang dicapai. Terbukti penggunaan jarak antar frekuensi 100 MHz menghasilkan PAE 58%, lebih rendah daripada saat menggunakan jarak antar frekuensi 20 MHz, selain bahwa pada jarak antar frekuensi 100 MHz memiliki kinerja yang lebih linear jika dilihat grafik IP3nya. Dari sekian variasi simulasi didapatkan hasil terbaik dan lebih linear pada dua nada dengan menggunakan transistor *switching* pada *source* yaitu dengan nilai IIP3 bernilai 41.81 dBm, OIP3 bernilai 49,68 dBm dan PAE sebesar 58%. Nilai daya masukan Pin berbanding lurus dengan PAE dan berbanding terbalik dengan gain. Artinya makin besar daya masukan Pin, maka gain semakin menurun sementara PAE makin besar. Oleh karena itu gain dan PAE merupakan *trade off* yang akan dipilih sesuai dengan kebutuhan perancangan

Daftar Pustaka

- [1] Kubowicz, Richard (2000): Class-E Power Amplifier, Thesis, University of Toronto.
- [2] Nathan O. Sokal (2002): Class-E High-Efficiency Rf/Microwave Power Amplifiers: Principles Of Operation, Design Procedures, and Experimental Verification,
- [3] Steve C. Cripps. (2006): RF power amplifier for Wireless Communication 2nd, Artec House, 156 – 177.
- [4] R, Negra., dkk (2007): Switch-Based GaN HEMT Model Suitable for Highly-Efficient RF Power Amplifier Design.
- [5] Paul Saad., dkk (2010) : Design of a Highly Efficient 2–4-GHz Octave Bandwidth GaN-HEMT Power Amplifier
- [6] Robin F. Kearey, B.Sc., (2010): A High Efficiency *Switching* Mode Amplitudo Modulator for Class-E Power Amplifier in Nano Satellites, Thesis, Delf University of Technology
- [7] Marante , Reinel., Dkk (2010): Nonlinear Characterization Techniques for Improving Accuracy of GaN HEMT Model Predictions in RF Power Amplifiers IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Anaheim, CA, USA, pp. 1680-1683.
- [8] P.-L. Sochor., dkk (2011) : Design and Realisation of a 50 W GaN Class-E Power Amplifier.
- [9] Moreno, Jordi Ambrós. (2011): Design and assembly of a class E power amplifier @2GHz, Thesis, Universitat Politecnica De Catalunya .
- [10] Esposto, Michele., Chini, Alessandro., and Rajan, Siddharth., (2011): Analytical Model for Power *Switching* GaN-Based HEMT Design, IEEE Transactions On Electron Devices, VOL. 58, NO. 5.
- [11] Kenle, Chen. dan Peroulis, Dimitrios. (2011): Design of Highly Efficient Broadband Class-E Power Amplifier Using Synthesized Low-Pass Matching Network, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 59, No. 12.
- [12] Otsuka, Hiroshi., dkk (2011): Semi-physical Nonlinear Circuit Model with Device/Physical Parameters for HEMTs, International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2011, 3(1), 25–33, # Cambridge University Press and the European Microwave Association, 2011
- [13] Jee, Seunghoon., dkk (2012): *Switching* Behavior of Class-E Power Amplifier and Its Operation Above Maximum Frequency, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, VOL. 60, NO. 1
- [14] Abdelmalek Douara., Dkk (2014): I-V Characteristics Model For AlGaIn/GaN HEMTs Using Tcad-Silvaco, Journal of New Technology and Materials, Vol. 04, No.02 19-24
- [15] Abbasian, Sadegh., (2015): Radio Frequency Switch-mode Power Amplifiers and Synchronous Rectifiers for Wireless Applications, Doctor of Philosophy, University of British Columbia.
- [16] Abdelaziz M. A. Abdelbar., Ayman M. El-Tager (2018): Nonlinear Modelling of RF GaN Devices and Utilization in RF Power Amplifiers for 4G Applications
- [17] Dhanyal, Hamid Raza., Dkk (2018): Design and Development of 45 Watt GaN HEMT Power Amplifier with High Speed Gate *Switching* for Pulse Radar Application.
- [18] K. Husna Hamza, D. Nirmal. (2019): A review of GaN HEMT broadband power amplifiers
- [19] Kamper, Michael : Differential Switched Mode RF Power Amplifiers, 11-40.
- [20] O. Jardel., dkk : A new nonlinear HEMT model for AlGaIn/GaN switch applications.