

تصميم مكبر قدرة نوع (F) لتطبيقات (GSM) بالاعتماد على تقنية الامثلية

احمد عبد الجبار إسماعيل
جامعة الموصل/كلية الهندسة
قسم الهندسة الكهربائية

د . احمد ذنون يونس / أستاذ مساعد
جامعة الموصل/كلية هندسة الالكترونيات
قسم النظم والسيطرة

الخلاصة

مكبر القدرة نوع (F) هو احد أنواع مكبرات القدرة المفتاحية الأكثر استخداما في أنظمة الاتصالات الراديوية لكونه يمتاز بكفاءة وقدرة إخراج عالية بالإضافة لكونه يعمل في مدى واسع من الترددات . تعتمد خطية وكفاءته وتعقيد الدائرة لهذا المكبر على دائرة الحمل ونقطة عمل المكبر . هذا البحث يتناول تصميم مكبر قدرة نوع (F) باستخدام الترانزستور (GaAs) للعمل في أنظمة الغلاف الثابت بتطبيق تقنية الأمثلية لإيجاد ممانعة الإدخال والإخراج المثالية وتحديد أفضل نقطة عمل للمكبر . تم تصميم دائرة الحمل لتشكيل موجة الفولتية والتيار باستخدام دائرة مرشح إمرار واطئ وموائمة الحمل مع التردد الأساسي لتحقيق موائمة مثالية والحصول على كفاءة عالية بأقل تعقيد واقل عناصر مستخدمة ولتحسين خطية المكبر تم إضافة ابر قطري عند إخراج المكبر ليكون بمثابة دائرة قصر أمام الترددات العالية . تم محاكاة التصميم باستخدام البرنامج (ADS) وكانت كفاءة القدرة المضافة للمكبر المصمم تساوي (75.6%) عند قدرة إخراج (29.5dBm) وبكسب مقداره (16dB) ومقدار التشويه من الدرجة الثالثة يساوي (-46dBc) .

الكلمات الدالة: مكبرات القدرة المفتاحية ، دائرة الحمل ، تشكيل الموجة ، أنظمة (GSM)

Design Class (F) Power Amplifier for (GSM) Application Based on Optimization

Ahmad T. Younis

University of Mosul
Electronic Engineering College
Systems and Control Dept.

Ahmad Abdul-Jabbar Ismail

University of Mosul
Electrical Dept.

Abstract

Non-linear Class-F PA has drawn a great attention among all different classes of PAs because of their capability of giving high power, providing good PAE and work in high frequency .The problem of class F PA is Poor linearity. The efficiency linearity and complexity of class (F) power amplifier depend on the load network. In this research, Class-F amplifier with carefully chosen bias points , input and output impedance, designed load matching network and harmonic traps to get linearity and efficiency greeting with (GSM) application . The load network was designed by low pass flitter and matching network was designed to obtain the required optimum impedance at fundamental only to reduce complexity of PA and adding radial stub to provide a short circuit for higher degree harmonics and improve the linearity . The final design produced a PAE of 75.6% with 29.5dBm output power with (16dB) gain and TH distorted -46dBc.

1. المقدمة:

تعد الكفاءة العالية لمكبر القدرة من الأمور المهمة جدا في أجهزة الاتصال الحديثة وبخاصة في محطات الإرسال وذلك لتقليل استهلاك القدرة وتقليل الكلفة وتصغير الحجم . لذلك يتم بناء مكبرات القدرة باستخدام مكبرات القدرة المفتاحية التي تمتاز بكفاءتها العالية . تعمل هذه المكبرات في منطقة قريبة من منطقة التشبع والتي تكون فيها قدرة الإخراج والكفاءة عالية لكنها تكون ذات ختية ضعيفة [1]. تم في هذا البحث تصميم مكبر قدرة نوع (F) وهو احد أنواع المكبرات المفتاحية للعمل في مرسة (GSM) بكفاءة قدرة مضافة للمكبر المصمم تساوي (75.6%) عند قدرة إخراج (29.5dBm) وبكسب مقداره (16dB) وبختية مناسبة عند التردد (850MHz) باستخدام الترانزستور (GaAs) بالاعتماد على تقنية الأمتلية . حيث تم الحصول على القدرة العالية من خلال الكسب العالي للمكبر والاختيار الأمثل لنقطة عمل الترانزستور التي تكون عندها مركبة التردد الأساسي أعظم ما يمكن . أما الكفاءة العالية فقد تم الحصول عليها من خلال تقليل الخسائر الناتجة عن استهلاك القدرة في الترانزستور و تقليل الخسائر في دوائر الموائمة في الإدخال والإخراج . أما خسائر الترانزستور تم تقليلها إلى اقل حد عن طريق تشكيل موجة فولتية والتيار وتقليل التداخل بينهما عبر الترانزستور [2] ، أما خسائر القدرة الناتجة عن الموائمة فقد تم تقليلها عن طريق إجراء الموائمة الجيدة مع الممانعة المثالية عند إدخال وإخراج الترانزستور [3] . تم تحسن ختية المكبر عن طريق اختيار نقطة عمل بعيدة عن منطقة التشبع لتكون الإشارة الخارجة بأعظم اتساع واقل تشويه ممكن ، وتم تحسين ختية المكبر أيضا بتهيئة دائرة قصر أمام الترددات العالية ومنعها من الوصول للحمل باستخدام ابتز قطري (radial stub) الذي يعمل كمرشح إمرار واطى .

2. الأساس النظري

2.1. علاقة الكفاءة وقدرة الإخراج بزواية التوصيل

يعد الترانزستور مصدر تيار معتمد . وفي ترانزستور تأثير المجال تتحكم فولتية القاعدة بزواية التوصيل وبالتالي بقيمة وشكل تيار المصرف تبين المعادلة (1) العلاقة بين تيار المصرف I_{ds} مع زاوية التوصيل [3] .

$$i_{ds}(\theta) = I_{max} \frac{\cos \theta - \cos(\alpha/2)}{1 - \cos(\alpha/2)} \quad \dots \dots \dots (1)$$

حيث (I_{max}) هو أعظم تيار يمر في مصرف الترانزستور و (α) زاوية التوصيل وبذلك تكون دالة تحويل فورير لتيار المصرف كما في المعادلة (2) .

$$i_{ds}(\theta) = I_{dc} + I_1 \cos \theta + I_2 \cos 2\theta + I_3 \cos 3\theta + \dots \dots \dots (2)$$

وتكون قيم المركبات الثلاث الأولى وقيمة مركبة التيار المستمر بدلالة I_{max} كما في المعادلة (3) .

$$I_{dc} = \frac{I_{max}}{2\pi} \frac{2 \sin(\alpha/2) - \alpha \cos(\alpha/2)}{1 - \cos(\alpha/2)} \quad \dots \dots \dots (3)$$

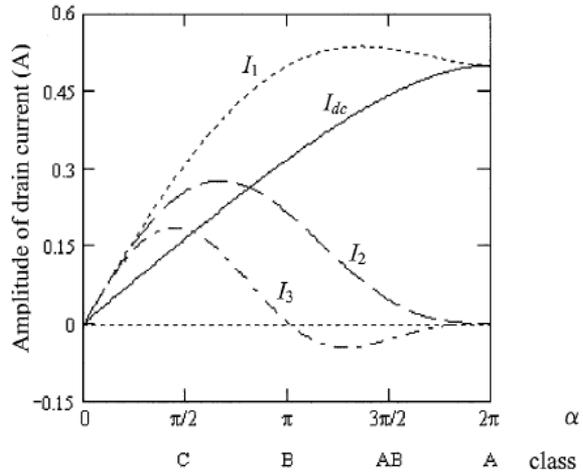
$$I_1 = \frac{I_{max}}{2\pi} \frac{\alpha - \sin \alpha}{1 - \cos(\alpha/2)} \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$I_2 = \frac{I_{max}}{2\pi} \frac{2 \sin(\alpha/2) - \frac{1}{3} \sin(3\alpha/2)}{1 - \cos(\alpha/2)} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$I_3 = \frac{I_{max}}{6\pi} \frac{(1 - \cos \alpha) \sin \alpha}{1 - \cos(\alpha/2)} \quad \dots \dots \dots$$

(6) الشكل (1) يبين علاقة اتساع المركبات الثلاثة السابقة ومركبة التيار المستمر بزواية التوصيل (α) عندما I_{max} يساوي أمبير واحد في الأنواع التقليدية من المكبرات (A, AB, B and C) [2].

العلاقات السابقة تبين إن شكل موجة التيار تعتمد على زاوية التوصيل (α) حيث تكون الخطية أفضل ما يمكن في الصنف (A) فجميع المركبات تساوي صفر عدا المركبة الأساسية وتساء الخطية كلما قلت زاوية التوصيل فيبتعد شكل موجة الإخراج عن شكل الموجة الجيبية مما يؤدي إلى ظهور مضاعفات التردد الأساسي حسب نظرية تحويل فورير [2] [3]. وتبين العلاقات السابقة كذلك إن قيمة المركبة الأساسية I_1 تكون بأعظم قيمة في مدى الصنف (AB). ولما كانت كفاءة المكبر تعتمد على قدرة الإخراج والقدرة المجهزة من مصدر القدرة المستمرة. لذلك فالكفاءة تعتمد على المركبة الأساسية لتيار المصدر وزاوية التوصيل والمعادلة (7) تصف العلاقة بين الكفاءة وزاوية التوصيل [4].



الشكل (1) تغير اتساع مركبات التيار عندما يكون $I_{max} = 1A$

$$d = \frac{P_{out}}{P_{dc}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha - \sin \alpha}{2 \sin(\alpha/2) - \alpha \cos(\alpha/2)} \right) \quad \dots \dots \dots (7)$$

يمكن بناء مكبر القدرة (F) من الأصناف التقليدية من المكبرات (B, AB, C) [5] وقد تم في هذا البحث اختيار نقطة العمل بين الصنف (B) والصنف (AB) باستخدام تقنية الامثلية للحصول على أعظم قدرة إخراج.

2.2. كسب القدرة

إن دائرة مكبر القدرة من الدوائر غير الخطية يمكن تمثيلها على أنها دائرة ذات منفذين يمكن تمثيل خصائصها بعدة معاملات ولعل أبرز تمثيل مناسب هو بواسطة معاملات التشتت (S) (Scattering Parameter) حيث يمكن تمثيل الدائرة ذات المنفذين بواسطة معاملات التشتت (S) بسهولة ويتيح لنا هذا التمثيل تحليلاً رياضياً دقيقاً [6]. إن كسب القدرة يعتمد بصورة أساسية هي (Gp) [7], [8]:

$$G_T = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{|1 - \Gamma_{in} \Gamma_S|^2} |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22} \Gamma_L|^2} \quad \text{(transducer power gain)} \quad \dots \dots \dots (11)$$

$$G_a = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{|1 - S_{11} \Gamma_S|^2} |S_{21}|^2 \frac{1}{1 - |\Gamma_{out}|^2} \quad \text{(available power gain)} \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$G_P = \frac{1}{1 - |\Gamma_{in}|^2} |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22} \Gamma_L|^2} \quad \text{(operating power gain)} \quad \dots \dots \dots (13)$$

عندما تكون الموائمة جيدة في الإدخال والإخراج فإن معاملات الانعكاس والتشتت

$$\Gamma_{in} = S_{11}, \quad \Gamma_{out} = S_{22}, \quad G = L = 0$$

وعند هذه الحالة يمكن اختزال معاملات الكسب إلى:

$$G_T = |S_{21}|^2, \quad G_a = \frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{22}|^2}, \quad G_P = \frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{11}|^2} \quad \dots \dots \dots (14)$$

بدرجة الموائمة في الإدخال والإخراج هي العلاقات التالية [7], [8]:

$$M_{in} = \frac{P_{in}}{P_{AVS}} = \frac{G_T}{G_P} = \frac{(1-|\Gamma_{in}|^2)(1-|\Gamma_s|^2)}{|1-\Gamma_{in}\Gamma_s|^2} \dots\dots\dots(15)$$

$$M_{out} = \frac{P_L}{P_{AVN}} = \frac{G_T}{G_a} = \frac{(1-|\Gamma_{out}|^2)(1-|\Gamma_L|^2)}{|1-\Gamma_{out}\Gamma_L|^2} \dots\dots\dots(16)$$

حيث M_{out} , M_{in} (input and output mismatch factors) يمثل معامل الموائمة في جهة الإدخال والإخراج وأفضل قيمة لهما تساوي واحد (unity) عندها يكون $[8](G_T=G_P=G_a)$. تبين أهمية عامل الكسب G_T فهو يتأثر بموائمة الإدخال والإخراج . ويمكن التعبير عن المعادلة (15) (dB) فتصبح بالصيغة التالية :

$$M_{in}|_{dB} = G_P|_{dB} - G_T|_{dB} \dots\dots\dots(17)$$

(17) تمثل دالة الهدف الرئيسية في عملية الامثلية التي على أساسها تم بناء المكبر . فعندما يكون الفرق بين الكسب الإجمالي والكسب المؤثر قليل وقريب من الصفر فهذا يعني أن الموائمة جيدة والمكبر يعمل في المنطقة الخطية وعندها تصبح قيمة الكسب الإجمالي (S_{21}) فقط حتى ولو تغيرت القدرة الداخلة للمكبر كما (14) . وبحسب متطلبات التصميم يمكن كتابة المعادلة (17) بالصيغة التالية .

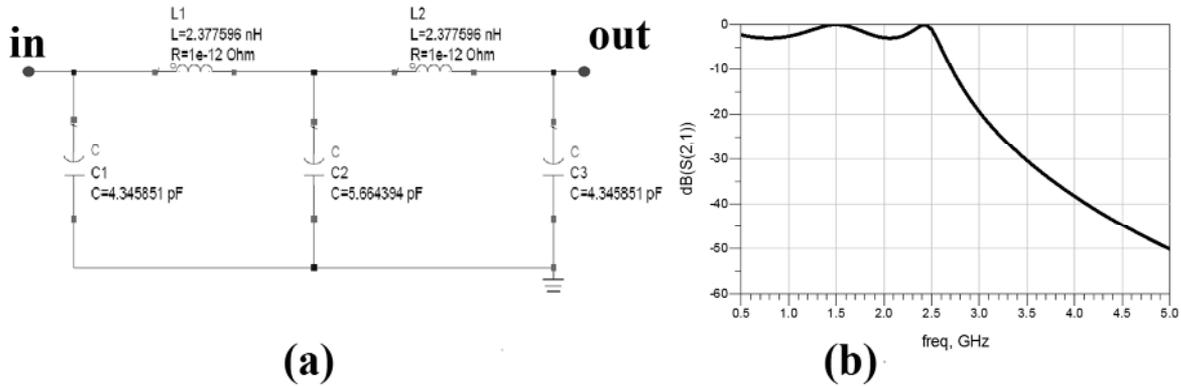
$$G_P|_{dB} - G_T|_{dB} < 1dB \dots\dots\dots(18)$$

(18) هي تحوير من المعادلة (17) بعد الاخذ بنظر الاعتبار الشروط الحدية المطلوبة لعملية الامثلية لتحقيق افضل واقل قيمة لعامل الموائمة في الادخال وادخلت كمعادلة رئيسية في خوارزمية الامثلية .

3. تركيب مكبر القدرة

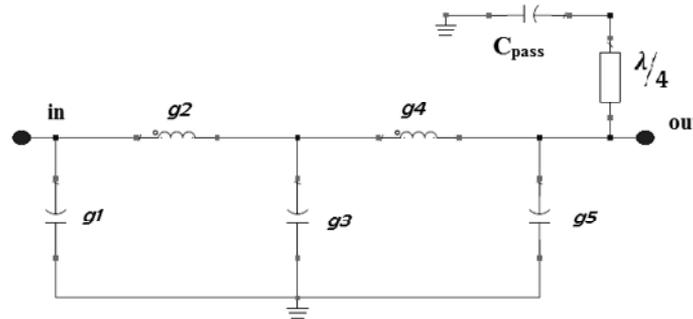
3.1. تصميم دائرة تشكيل الموجة

ان النقطة الاساسية في كفاءة مكبرات القدرة المفتاحية هي هندسة تشكيل الموجة والتي يتم من خلالها تقليل التداخل بين موجة فولتية وموجة التيار لتقليل القدرة المبددة في الترانزستور . ولان الترانزستور يعتبر مصدر تيار معتمد لذلك فان موجة التيار تكون معتمدة على فولتية الإدخال والمحددات الفيزيائية للترانزستور مثل فولتية العتبة وخصائص التشبع والعناصر الطفيلية . وهكذا تكون موجة التيار حاملة لعدد غير منتهي من التوافقيات كما في المعادلة (2) .
الفولتية فيتم تشكيلها بواسطة التيار وممانعة الحمل [9] . (F) يتم تشكيل تيار المصرف بهيئة موجة شبه نصف جيبيه وذلك بتهيئة دائرة قصر أمام المركبات الزوجية . ويتم تشكيل فولتية المصرف بهيئة موجة مربعة وذلك بتهيئة دائرة مفتوحة أمام المركبات الفردية . يعد عدد المركبات المشاركة في تشكيل الموجة واتساعها مؤثرا على كفاءة مكبر ودرجة تعقيده [10],[11],[12] وقد تم مراعاة ذلك في هذا التصميم . (F) يعد تردد العمل من المحددات الإضافية التي يجب أن تأخذ بالحساب لان الترددات العالية في هذا المكبر تصبح عديمة الفائدة بسبب وجود العناصر الطفيلية (parasitic) [5] ، ولكون المكبر المصمم يعمل على ترددات عالية (850 MHz) الترددات المؤثرة لغاية التوافقية الفردية الخامسة . تم بناء دائرة تشكيل الموجة بطريقة مرشح إمرار واطى للسيطرة على عدد واتساع المركبات الفردية المساهمة في تشكيل الموجة حتى $(5f_0)$ [12] بحيث تبدي الدائرة ممانعة مناسبة أمام المركبات المختلفة للحصول اتساع مناسب لتلك المركبة عند إخراج الترانزستور وتم تنفيذه باستخدام مرشح نوع (Chebyshev Filter) (2) يبين دائرة الـ والذي يحقق المواصفات التالية : (Filter order =5) (Pass band Corner Frequency (Fp) = 2.55 GHz) (Stop band Frequency (Fs) =3.315 GHz) (Pass band ripple (Ap) =3) (Stop band Attenuation (As) = 20dB) .



والشكل (2) : (a) دائرة مرشح امرار واطى (b) الاستجابة الترددية لعامل الكسب مع التردد

أما المركبات الزوجية فيتم السيطرة عليها من خلال دائرة القصر التي يوفرها خط النقل ($\lambda/4$) (C_{PASS}). (3) يبين دائرة تشكيل الموجة كاملة .



الشكل (3) دائرة تشكيل الموجة لمكبر القدرة نوع (F)

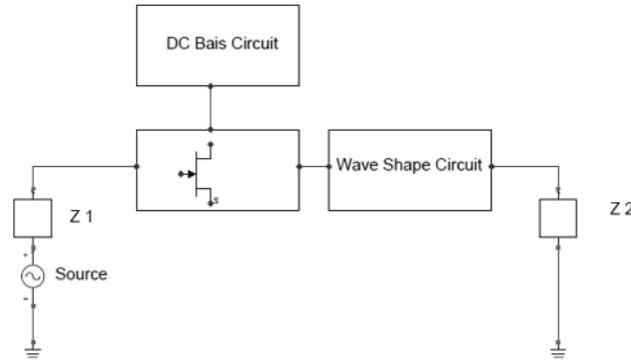
3.2. إيجاد ممانعة الإدخال والإخراج بطريقة الامثلية

ممانعة الإدخال والإخراج المثالية للمكبر تتغير مع تغير نقطة انحياز المكبر وقيمة قدرة الإخراج والكفاءة والكسب بالإضافة إلى التأثير المتبادل فيما بينهم [2],[5],[10] لذلك ركز هذا البحث على إيجاد ممانعة الإدخال والإخراج في وقت واحد بدلا من طريقة سحب الحمل والمصدر باستخدام طريقة الامثلية بعد إدخال المتغيرات والشروط الحدية المؤثرة قيمة ممانعة الإدخال والإخراج . فبعد تصميم دائرة انحياز المكبر ودائرة تشكيل الموجة حيث تم اعتبار دائرة تشكيل الموجة جزء من إخراج الترانزستور (4) . تم تحديد المتغيرات والشروط الحدية لعمل الترانزستور (GSM) . وكانت الشروط الحدية هي كفاءة القدرة المضافة ($PAE > 50\%$)

($P_L > 26 dBm$) ($P_{AVS} < 15 dBm$) التي يتحدد من خلالها الكسب ولضمان استقرارية المكبر تم إضافة هدف آخر هو ($R_{Fun} > 0$) أي القيمة الحقيقية لممانعة الإدخال وإخراج للمركبة الأساسية أكبر من صفر ، ولكي يعمل المكبر في المنطقة بين الصنف (A) (AB) التي تكون فيها المركبة الأساسية أعظم ما يمكن المعادلة (4) وضع شرط تحديد فولتية القاعدة ضمن المدى ($-3 < V_{GS} < -2$) وهذا خاص بالترانزستور المستخدم . ولضمان المكبر في المنطقة الخطية ونقل أعظم قدرة

إعطاء هذه الشروط أوزان متساوية . أما المتغيرات التي يتم التحكم بها البرنامج للوصول إلى أفضل موازنة هي (Z_1) وهي ممانعات غير معتمدة توضع في إدخال وإخراج المكبر تتغير قيمها ضمن مدى مناسب والقيمة النهائية التي يتم

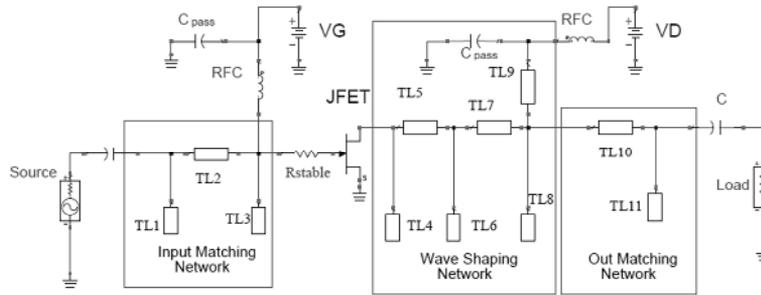
عندها تحقيق الأهداف هي الممانعة المثالية وهي دالة الهدف وتم تنفيذ عملية الامثلية باستخدام خوارزمية كرادين (ADS).



الشكل (4) مخطط عام يبين طريقة إيجاد ممانعة الإدخال والإخراج المثالية للمكبر

4. تحقيق وتركيب مكبر القدرة

بعد إيجاد قيمة الممانعة المثالية في الإدخال والإخراج وتصميم دوائر الموائمة تم بناء المكبر بطريقة العناصر المنتشرة على الشرائح المايكروية باستخدام الشريحة (RF4) وتم بعد ذلك محاكاة التصميم باستخدام البرنامج (ADS) تحسين استقرارية المكبر بضبط فولتية القاعدة وإضافة مقاومة (R_{stable}) على التوالي مع قاعدة الترانزستور، وتم إجراء عملية الضبط على أبعاد الشرائح المايكروية للحصول على أعظم كفاءة وأعظم قدرة بخطينية مناسبة والشكل (5) يبين دائرة (PA1). وكانت الأبعاد النهائية بوحدات الملي متر كما في الجد (1).



الشكل (5) دائرة مكبر القدرة نوع (F) الدائرة الأساسية (PA1)

جدول (1) أبعاد خطوط النقل بعد إجراء عملية الضبط بالملي متر

	TL1	TL2	TL3	TL4	TL5	TL6	TL7	TL8	TL9	TL10	TL11
W	3.088	3.093	3.088	3.088	3.093	3.088	3.09	3.088	3.088	3.088	3.088
L	37.4	22.18	29	26.5	7.8	30.64	7.84	48.8	26.5	16.54	15.45

(72%)

(18 dB)

(PA1)

(29 dBm). أما الخطية فلم تكن بالمستوى المطلوب. إن احد أسباب تدهور الخطية هو وصول

التوافقيات إلى الحمل بسبب عدم توفر دائرة قصر مثالية عن طريق خط النقل ($\lambda/4$) (TL9) عبر متسعة التسريب

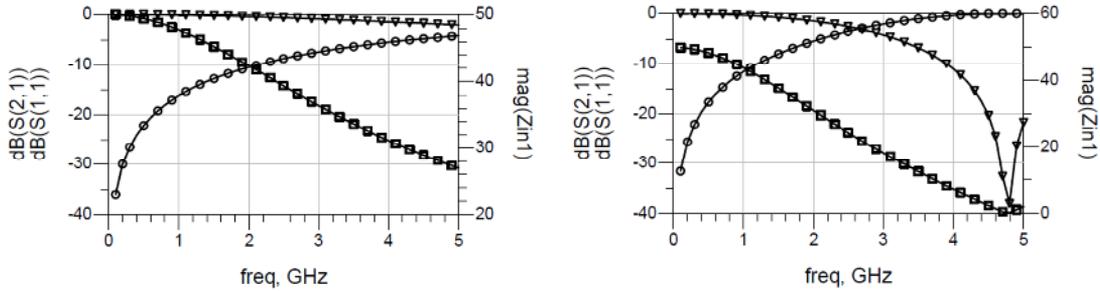
(Radial stub) عند نهاية خط النقل ($\lambda/4$)

(C_{pass}) إلى الأرضي ، تم تحويل دائرة المكبر PA1

ليكون بمثابة مرشح إمرار واطئ لمنع وصول الترددات العالية إلى الحمل . وتم اختيار الأبتز القطري لان خواصه اقرب

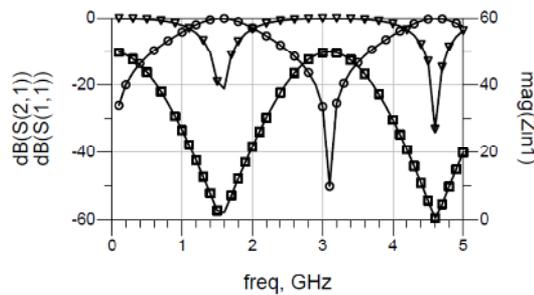
إلى خواص المتسعة المثالية [5] (6) يوضح ويقارن

ذو النهاية المفتوحة (2) يلخص خواص ا



(a)

(b)



(c)

mag(Zin1) \triangle dB(S(2,1)) \square dB(S(1,1)) \circ

الشكل (6): مقارنة الممانعة والتوهين لكل من (a) المتسعة (b) خواص الأبتز القطري (c) الأبتز ذو النهاية المفتوحة

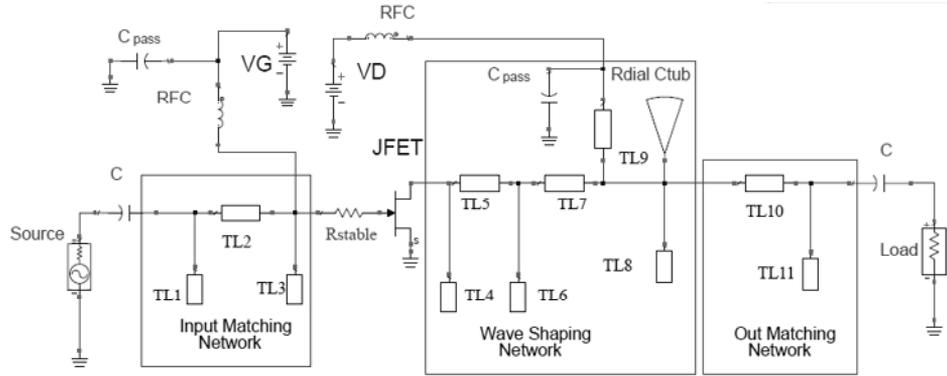
الجدول (2) يلخص خواص الأبتز القطري مقارنة بخواص المتسعة والأبتز ذو النهاية المفتوحة

		المثالية	
ضيق	عريض	عريض	مدى الممانعة الصغيرة
ضيق			
يستجيب للتوافقيات	لا يستجيب للتوافقيات	لا يستجيب للتوافقيات	استجابته للتوافقيات

(7) كانت على حساب الكفاءة حيث قلت الكفاءة

إن تحسين الخطية بإضافة الإبر القطري (PA2)

(70%)

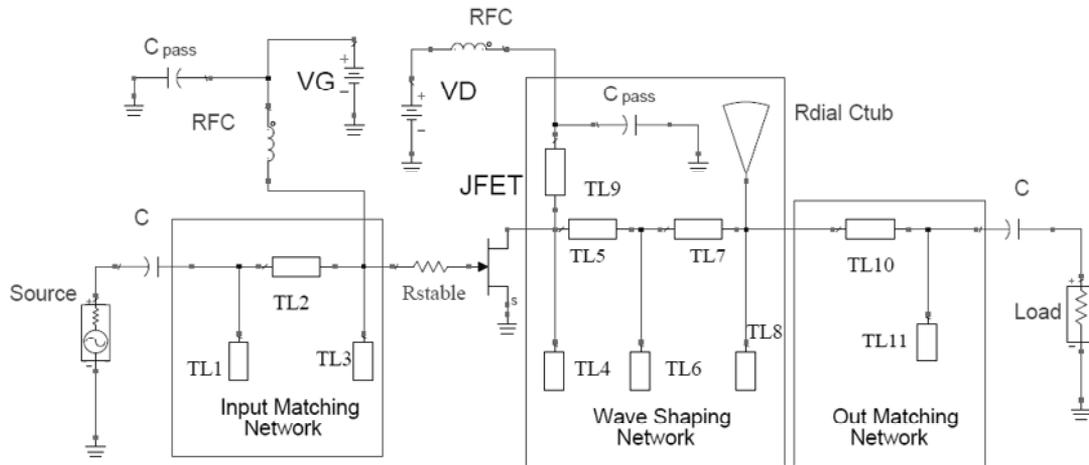


الشكل (7) تركيب دائرة مكبر القدرة صنف (F) PA2

ومن اجل تعويض الكفاءة تم تطوير آخر لـ (PA2) بتحويل خط النقل ($\lambda/4$) جهة المصرف أي قبل (8) PA3 وهذا يجعل عدد مركبات التيار المساهمة في تشكيل موجة التيار اكبر لان مرشح الإمرار الواطئ لم يعد يحجب مركبات التيار ذات العالية . فكانت النتائج للمكبرات الثلاثة كما في (3).

الجدول (3) مقارنة بين التصاميم الثلاثة المحورة عن التصميم الأساسي

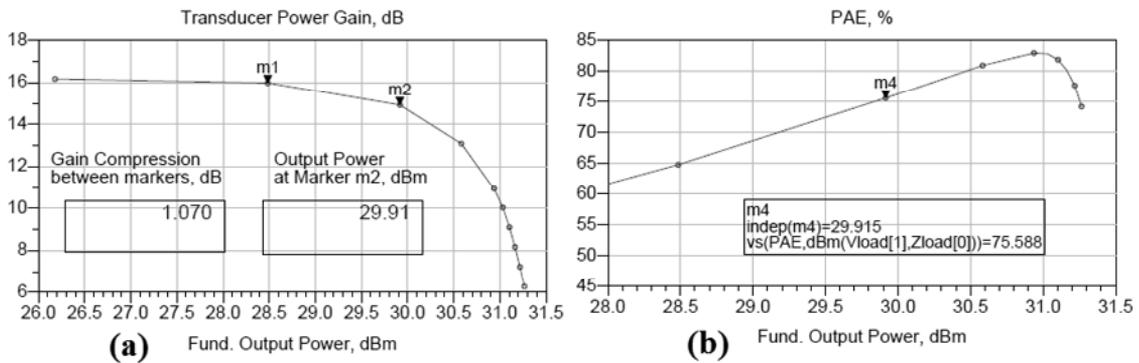
	PA1 Fig.(3.20)	PA2 Fig.(3.21)	PA3 Fig.(3.22)
PAE	72%	70%	75.6%
Power	29 dBm	29 dBm	29.5 dBm
Gain	18 dB	17 dB	16 dB
AM-AM	(0.2)-(1)dB/dB	(0.1)-(0.6)dB/dB	(0.2)-(1)dB/dB
AM-FM	(-0.2)-(0.6)degrees/dB	(-0.2)-(1) degrees/dB	(-0.2)-(0.2) degrees/dB
TH	< -35dBc	< -38dBc	< -46dBc



الشكل (8) دائرة مكبر القدرة نوع (F) الدائرة النهائية (PA3)

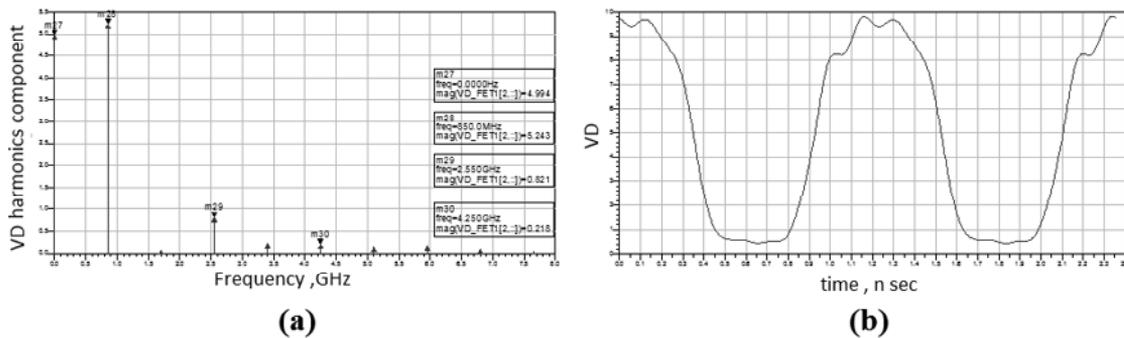
5. تحليل ومناقشة النتائج

تم دراسة وتحديد التوافقيات المؤثرة في تشكيل موجة الفولتية والتيار و حساب الكسب والكفاءة ومقدار التشويه في الزاوية والانتساع ومقدار التشويه في المركبة الثالثة نسبة إلى المركبة الأساسية (TH dBc) باستخدام تحليل النغمة الواحدة للدائرة الائية .
 درة تبين أن المكبر المصمم له كسب ثابت تقريبا مع تغير قدرة الإدخال حتى منطقة الانضغاط وهذا يدل على أن دوائر الموائمة (P_L) تساوي القدرة الخارجة منه إلى الحمل (P_{in}) .
 (GT) يساوي كسب العمل (Gp) وعند هذه الحالة فان الكسب يعتمد بصورة مباشرة على قيمة معامل الكسب (S_{21}) (14) .
 (9-a) يبين تغير قيمة كسب القدرة الإجمالي مع قدرة الإخراج حيث يبين أن الكسب ثابت عند القيمة (16 dB) (28.5dBm) ويبدأ بالهبوط حتى يصل إلى (15 dB) (29.91dBm) وهذا يعني أن المكبر يمتاز بكسب ثابت لمدى واسع من تغير القدرة الداخلة .

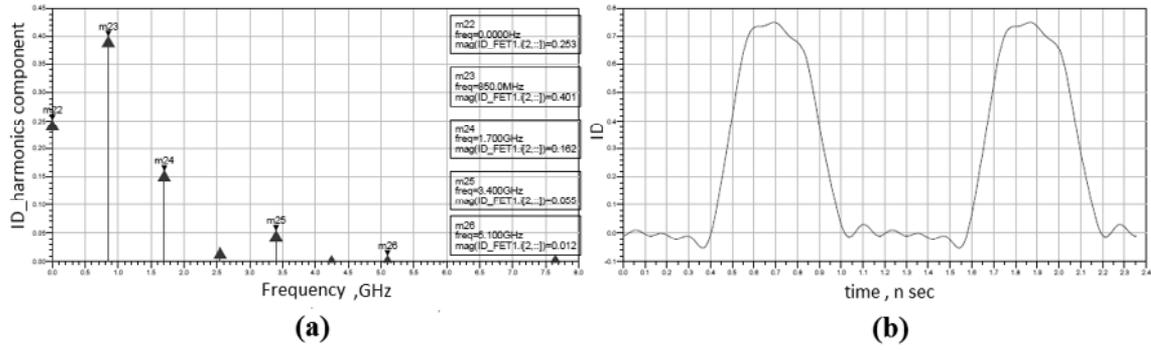


الشكل (9): (a) تغيير كسب القدرة (b) تغيير كفاءة القدرة المضافة، مع قدرة الإخراج

لقد كان لتصميم دائرة تشكيل الموجة التي تم من خلالها السيطرة على اتساع مركبات الفولتية والتيار المختلفة وتشكيل موجة الفولتية بهيئة موجة مربعة وموجة التيار بهيئة موجة نصف جيبية وتقليل مقدار التداخل بينهما الأثر البالغ (F) . حيث يبين (9-b) تغير كفاءة القدرة المضافة للمكبر مع قدرة الإخراج ويبين أن (75.6%) عند نقطة الانضغاط وهي بذلك تعتبر الكفاءة العظمى التي يعمل عليها المكبر ضمن مدى الخطية المناسبة . وبين (10) (11) اتساع مركبات الفولتية والتيار وكذلك شكل موجة الفولتية والتيار الناتجة عن



الشكل (10) مركبات فولتية المصروف والموجة الناتجة عنها



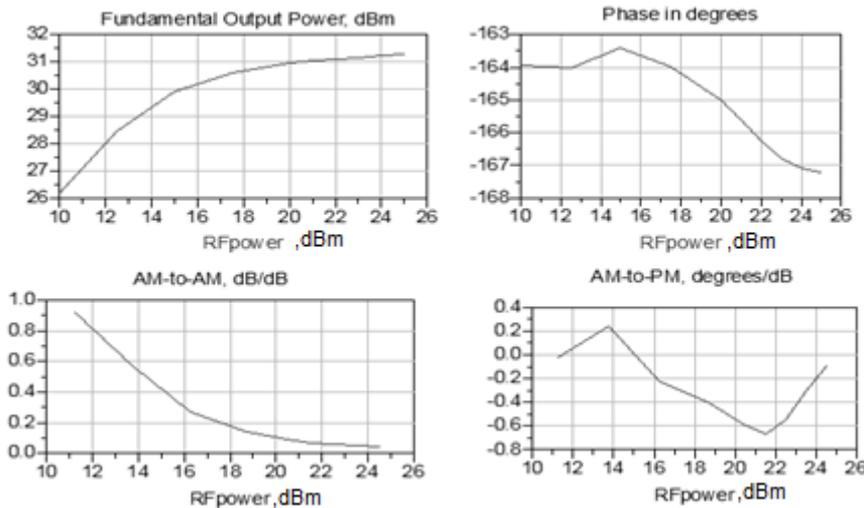
الشكل (11) مركبات تيار المصرف والموجة الناتجة عنها

فبحسب التصميم كانت المركبات الفردية الداخلة في تشكيل موجة فولتية هي (1,3,5) وهذا مانجده في (10) حيث نجد المركبات الفردية ذات القيم المؤثرة في طيف فولتية المصرف . ونجد أيضا المركبات الزوجية الداخلة في تشكيل موجة التيار هي (1,2,4,6) (11) . وفي هذه الحالة تكون الكفاءة المثالية تساوي (85.7%) . على كفاءة القدرة المضافة المثالية سوف نستعين بالمعادلة (19) [3] .

$$PAE = \eta \left(1 - \frac{1}{GT}\right) \dots\dots\dots(19)$$

ومن تطبيق المعادلة السابقة على المكبر في منطقة الانضغاط (1dB) نحصل على قيمة القدرة المضافة المثالية $(PAE = 85.7 \left(1 - \frac{1}{16}\right) = 80.34\%)$ وهذه النتيجة مقاربة للنتيجة التي تم الحصول عليها من نتائج المحاكاة مما يدل على عمل دائرة تشكيل الموجة بشكل جيد . والفرق بين النتيجتين يعود إلى عدم السيطرة على اتساع مركبات الفولتية والتيار بشكل مثالي ولعدم إلغاء المركبات الزوجية من طيف إشارة الفولتية بصورة نهائية وكذلك لم يتم إلغاء المركبات الفردية من طيف إشارة التيار .

يعد مقدار التشويه في الزاوية والاتساع ومقدار اتساع التوافقيات المتولدة نسبة إلى المركبة الأساسية من أهم مقاييس الخطية في أنظمة الغلاف الثابت والشكل (12) يبين مقدار التشويه في الزاوية والاتساع . حيث وجد أن أعظم تشويه في الزاوية يساوي (0.237 degrees/dB) تشويه في الاتساع يساوي (0.572 dB/dB) (13.75 dBm) وهذه القيم تعتبر مناسبة للعمل في نظام (GSM) [13],[14] . (4) يبين اتساع التوافقيات نسبة إلى المركبة الأساسية .



الشكل (12) يبين مقدار التشويه في الزاوية والاتساع

الجدول (4) يبين اتساع مركبات التوافقيات نسبة إلى المركبة الأساسية عند قيم مختلفة لقدرة الإدخال

Available source power dBm	Fundamental output power dBm	Second harmonic dBc	Third harmonic dBc	Fourth harmonic dBc	Fifth harmonic dBc
10.00	26.18	-63.79	-55.61	-41.41	-68.3
12.50	28.485	-64.04	-55.81	-40.34	-63.72
15.00	29.915	-64.31	-46.31	-38.93	-63.79

(5) بين النتائج التي تم الحصول عليها وبين نتائج مجموعة من الباحثين الذين عملوا في تطبيقات (GSM)

الجدول (5) مقارنة النتائج بالأعمال السابقة

Ref.	PAE%	maximum output power/ dBm	Gain (dB)	Third Harmonic dBc	Amplifier Type	Transistor TYPE
[5]	88.97	38.35	13.35	63.241	Class F	GaN
[10]	74	20	9	-42	Class F	CaAs
[13]	78.1	29	10.55	-31	Class E	CaAs
[14]	62.8	36.6	6.9	~	Doherty	CaAs
[15]	68.6	31.4	14.7	-48.8	Class F	CaAs
This work	75.6	29.5	15	-46	Class F	CaAs

6. الخلاصة

تم تصميم مكبر قدرة نوع (F) بطريقة الامثلية حيث من خلال هذا التصميم تم بناء مكبر قدرة له قدرة إخراج عالية إذ تم مقارنته بالأنواع التقليدية من المكبرات إذا ما تم استخدام نفس الترانزستور عند نفس الظروف وبخطية جيدة مناسبة للعمل في تطبيقات (GSM). وكان للاختيار الدقيق لقيم فولتية الانحياز وقيم ممانعة الإدخال والإخراج باستخدام تقنية الامثلية الدور الكبير في ارتفاع قيمة كسب القدرة وثباته لمدى واسع من تغير قدرة الإدخال. وكان لإضافة الأتر القطري تأثير على تحسين خطية المكبر حيث قل اتساع المركبة الثالثة بمقدار (3dBc). وكان لزيادة عدد المركبات الزوجية الداخلة في تشكيل موجة التيار أثرا في رفع كفاءة القدرة المضافة إلى (75.6%) وانعكس ذلك إيجابا على خطية المكبر بحيث قل اتساع المركبة الثالثة بمقدار (8dBc).

Reference

1. K. Chen, D. Peroulis, " Design of Highly Efficient Broad band Class-E Power Amplifier Using Synthesized Low-Pass Matching Networks", IEEE, Microwave Theory and Techniques, Vol. 59, No. 12, December 2011.
2. A . Z. Markos, "Efficiency Enhancement of linear CaN RF Power Amplifier Using the Doherty Technique ", Ph.D , Thesis , electrical engineering /computer science. Kassel University, 2008 .
3. Kyu Hwan An, " CMOS RF Power Amplifier for Mobial Wireless Communication", Ph.D Thesis , Georgia Institute of Technology , December 2009.
4. Ockgoo Lee, "High Efficiency Switching CMOS Power Amplifier for Wireless Communications ", Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology December 2009.
5. K. S. Tsang, " Class-F Power Amplifier with Maximized PAE", M.Sc. Thesis, the Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, August 2010.
6. Chris Bowick, " RF Circuit Design" Newnes, 1982, P.66-70.
7. Guillermo, Gonzlaez "Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design", Prentice Hall, Second edition, 1997, P.184-194.

8. [8] I. A. Glover, S. R. Pennock and P. R. Shepherd , "Microwave Devices ,Circuits and Subsystem for Communication Engineering " John Wiley & Sons Ltd , 2005 , P. 219-223.
9. J. Moon, J. Lee, R. S. Pengelly , R.Baker, and B. Kim, "Highly Efficient Saturated Power Amplifier ",IEEE Microwave Magazine, January/February 2012,P.125-131.
10. Shirt Fun OOI," Design of a high efficiency class f Power Amplifier integrated with Microstrip Antenna ", Ph.D. Thesis, school of computing ,engineering and information sciences northumbria university at newcastle ,2007.
11. A.Grebennikov ,N.O. Sokal , "Switchmode RF Power Amplifiers" Elsevier, 2007,P.95-106
12. M. Wren, T. J. Brazil, " Experimental Class-F Power Amplifier Design Using Computationally Efficient and Accurate Large-Signal pHEMT Model" IEEE transactions on microwave theory and techniques, VOL. 53, NO. 5, MAY 2005,P1723-1731.
13. W.K. Yaqoop ,"Improving The Performance of Class-E Power Amplifier in Mobile Unit of Cellular System ", Ph.D. Thesis, Electrical Engineering, University of Mosul , 2012.
14. k. H. Hamid," Study and Design of Doherty Power Amplifier" , M.Sc. Thesis, Electrical Engineering, University of Mosul , 2012.
15. R. B. Mohammed," Study and Design of Power Amplifiers for Cellular communications", M.Sc. Thesis, Electrical Engineering, University of Mosul , 2010.