التوافقيات وأنظمة إلكترونيات القدرة الكهربائية

هاشم ورقوزق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق

علي الجازي
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق

الملخص

تعمل التوافقيات على إنقاص مردود التجهيزات الكهربائية وتشويه حسن أدائها ، كما تعمل على رفع درجة حرارة الأجهزة والمعدات المستخدمة في نظم الطاقة الكهربائية (محركات، مولدات ، محولات ، كابلات .....) . كما أنها تشوه دقة القياس في دارات الحواكم ودوائر توليد النبضات ودارات القياس للمرور بالصفر . هذا كما يلاحظ وجود بعض المشاكل في المحركات الميكروية للحواسب .

- البحث في موضوع التوافقيات ليس بالأمر الجديد ، ولكن في السنوات الأخيرة اكتسب هذا الموضوع صفة الحداثة ، وأخذ أهمية واسعة نظراً لتزايد حجم التجهيزات الكهربائية المركبة على الشبكات والتي يمكن اعتبارها المصدر الرئيس للتوافقيات .
- بدأنا في هذه الدراسة بإعطاء المعادلات الرياضية العامة للأمواج التي قد نصادفها في خرج المبدلات الإلكترونية للقدرة ، ولأمواج على مداخل الأحمال الصناعية .

باستخدام تحليل فورييه يمكن تحليل وحساب مطال وزاوية كل مدروج وذلك حتى نصل للرتبة أربعين. يمكن أيضاً الطلب من البرنامج رسم مجموع التوافقيات المحسوبة للتأكد من دقة الحساب، ويمكن بالوقت نفسه كل مدروجة واستنتاج عامل التشوه الكلي THD% . زود البرنامج بستة خيارات ويمكن اختيار البرنامج المساعد تبعاً للشكل العام للموجة المراد تحليلها حتى تتوافق المعادلات الرياضية مع شكل الموجة .

مقدمة :

تؤثر التوافقيات كما نعلم، في حسن أداء عمل المحركات والمولدات والمحولات الكهربائية، كما ترفع من حرارة كابلات الاستطاعة والمكثفات والتجهيزات الإلكترونية .كما تشوه دقة القياس في أجهزة القياس وتؤثر في حساسية الريليات والقواطع وأنظمة الاتصالات . في مبدلات الاستطاعة الساكنة مثل المقومات والمعرجات تنحرف نقطة المرور بالصفر ،و تسبب التوافقيات مشاكلَ عملية في الحواسب الميكروية بسبب نشوء العزم النبضي في المحرك الذي يقود الأقراص وغيره.

لذا فإن البحث في موضوع التوافقيات ليس بالأمر الجديد إنما اكتسبت مشكلة التوافقيات في السنوات الأخيرة بعداً جديداً نظراً لتزايد مصادر التوافقيات وارتفاع استطاعاتها المركبة (K.V.A.) . بالنسبة لاستطاعة الشبكة . لمَّا كانت أنظمة إلكترونيات القدرة الكهربائية المستخدمة سواء في قيادة محركات التيار المستمر أم المحركات التحريضية والمحركات التزامنية وغيرها هي السبب الأساسي في نشوء التوافقيات فإننا أردنا من هذا البحث أن لا يبتعد عن أنظمة إلكترونيات القدرة الكهربائية والأمواج الناتجة عن هذه الأنظمة والعمل على تقديم العلاقات الرياضية المعروفة الممكن استخدامها لتحليل موجة توتر الخرج، ومن ثَمَّ تحديد رتبة التوافقيات ومطالها في هذه الأمواج .لذا قمنا بعرض أسلوب القياس لموجة التوتر أو التيار والبرنامج المستخدم لحالة من الحالات العملية نستطيع من خلالها تقدير رتبة التوافقيات المحمولة على موجة التوتر ويمكن مستقبلاً تطوير مثل هذه البرامج لتشمل جميع العلاقات الرياضية المستنتجة .

١ـ تعاريف:

عامل التشوه الكلي (THD %) (Total Harmonic distortion) يعبر عن مدى نقاوة الموجة الكهربائية ، ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$THD\% = \frac{\sqrt{V_{2rms}^2 + V_{3rms}^2 + ... + V_{nrms}^2}}{V_{1rms}^2} x100$$

$$= \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + ... + H_n^2}}{H_1^2} x100$$

حيث : V1rms القيمة الفعالة للمركبة الأساسية لموجة التوتر ،وتكافئ H1

V2rms , V3rms , …….. القيم الفعالة للتوافقيات الأخرى ، وتكافئ …. , H2 , H3

عامل التشوه في الموجة النقية يجب أن يساوي الصفر (THD = 0) لكن عملياً بسبب تزايد مصادر التوافقيات في الشبكات الكهربائية فإن تحديد هذا العامل أصبح ضرورياً، وبناءً عليه فإن المؤسسات العالمية حددت قيماً لهذا العامل يجب عدم تجاوزها ، حيث إنَّ IEEE GUID –215-1981 أعطت الحدود الآتية لهذا العامل بحيث تبقى موجة التوتر صالحة للاستخدام :

VOLTAGE CLASS	DEDICATED SYSTEM THD	GENERAL SYSTEM THD
2.4 – 69 KV	8%	5%
112 KV and above	1.5%	1.5%

كذلك في شبكات التوزيع للتوتر المنخفض (distribution nets) يجب أن يكون هذا العامل أقل من (5% وهو يختلف من بلد لآخر ، مثلاً إنكلترا واستراليا تحددان عامل التشوه بـ 3% وتحدد التشوه الناتج عن توافقية وحيدة للتوتر بـ 2% لذا فإن IEEE تعمل دائماً على وضع حدود للتوافقيات سواء للزبائن الخاصين أم للنظام عامة .

[1] تستجر الأحمال غير الخطية تيارات تحتوي نسبة عالية من التوافقيات، ونصادف حالياً الأحمال غير الخطية في مختلف أوجه الفعاليات الهندسية، وأهم هذه الأحمال هي :

- شواحن المدخرات .
- أنظمة تغيير السرعة للمحركات التحريضية والتزامنية ومحركات التيار المستمر .
- بادئ الحركة الإلكتروني .
- أنظمة عدم انقطاع القدرة (UPS) وأنظمة التقويم .
- جسور التقويم .
- الأفران القوسية والأفران التحريضية .
- الأحمال المنزلية (التلفزيون –VCRs – اللمبات الفلورسانتية – لمبات التفريغ).
- المنظمات من تيار متناوب إلى تيار متناوب في عمليات التسخين والإنارة (Dimmers) .
- أنظمة PCs والطرفيات (Peripherals) مع أنظمة التغذية المتقطعة , Modems) Printers) المفاعلات المشبعة .

٢ـ تحليل فورييه :

لا تعطي مجموعات التبديل من التيار الجيبي إلى التيار المستمر مباشرة توتراً مستمراً نقياً ، حيث موجة توتر الخرج غالباً ما تحتوي على مجموعة كبيرة من التوافقيات ، وإذا كان الحمل المطبق يتطلب توتراً مستمراً ، فإننا عندئذ بحاجة لنظام ترشيح يعمل على حذف التوافقيات في موجة التوتر المستمر، من ناحية أخرى ، هذه المجموعة بحد ذاتها تعمل على تشويه موجة المنبع الجيبي ويستلزم تنقيتها من التوافقيات . كذلك أنظمة التحويل من التيار المستمر إلى التيار المتناوب (المعرجات عند أي تردد مطلوب)، هذه الأنظمة لا توفر لنا بشكل مباشر أمواجاً جيبيةً، وللحصول على هذه الأمواج الجيبية النقية نحتاج لمعرفة رتبة التوافقيات الموجودة والعمل على تصميم دارة المرشح الجيبي المناسب بقصد حذف التوافقيات غير المرغوب فيها وتضخيم، أو تحسين التوافقية المناسبة للعمل .

الإجابة عن هذه المسائل يتم من خلال تحليل فورييه والذي ينص على أن أي إشارة دورية يمكن التعبير عنها بمجموعة من الأمواج الجيبية ذات تردد من مضاعفات التردد الأساسي للموجة .وهو يعطي وصفاً مساعداً للإشارات غير المعروفة ذات التغيرات المفاجئة .

-إن أي تابع دوري $F(t) = F(t+T)$ يمكن التعبير عنه بمجموعة من الحدود الجيبية والحدود التجيبية كما هو في المعادلة أدناه :

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nwt) + bn \sin(nwt) \qquad (1)$$

حيث $w = 2\pi/T$ السرعة الزاوية .

يطبق هذا التحليل بشكل عام على الإشارات الدورية ذات الانقطاعات المفاجئة (مثل الأمواج في مسائل

إلكترونيات القدرة الكهربائية) إلا أن هنالك بعض الاستفسارات حيث هنالك بعض التوابع غير الدورية خاصة لا تنطبق عليها سلسلة فورييه ، و هذه التوابع في الحقيقة لا تعطي أي مفاهيم فيزيائية .

تنتج الدارات الكهربائية العملية إشارات دورية تطابق الشروط الرياضية لتحليل فورييه ، وهذه المعاملات المعبر عنها في العلاقة(١) أعلاه تعطى كما يأتي:

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_{\tau}^{\tau+T} f(t)dt \qquad , \qquad a_n = \frac{2}{T}\int_{\tau}^{\tau+T} f(t)\cos(nwt)dt$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_{\tau}^{\tau+T} f(t)\cdot\sin(nwt)dt \qquad (2)$$

يمكن حساب هذه التكاملات مبتدئين بأي قيمة لـ (τ) ، مادامت فترة التكامل تأخذ كامل الدور . وعليه نختار قيمة مناسبة لـ (τ) (مثل $\tau = 0$) (أو $\tau = T/2$) ، $w = 2\pi/T$ ، وفي دراستنا لإلكترونيات القدرة من الأفضل تبديل المتحول (wt) بحيث يصبح ($\theta = wt$) حيث تدعى (θ) بالزمن الزاوي ، وإن عملية تبديل المتحول تساعد في هذا النوع من الدراسة، انطلاقاً من أن المعرجات والمقومات تعتمد في عملها على مفهوم زوايا الإزاحة بالطور .

بعد تغيير المتحول وجعل ($\tau = 0$) (نعرف معاملات سلسلة فورييه مرة ثانية كما يأتي:

$$\left.\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} F(\theta)\cdot d(\theta) \\ a_n &= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} F(\theta)\cdot\cos(n\theta)\cdot d(\theta) \\ b_n &= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} F(\theta)\cdot\sin(n\theta)\cdot d(\theta) \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

ذلك أن القياس الزاوي يلائم شكل الأمواج التي تختلف بالتردد ولا تختلف بالشكل (مثال على ذلك: خرج مقوم جسري سواء كان دخله إشارة متناوبة ذات تردد 40 أو 50 أو 60 هرتزاً فإن الناتج هو دائماً إشارة ذات تقويم كامل ، لكن يختلف ترددها من حالة لأخرى).

غالباً مايستخدم المهندسون الكهربائيون صيغة أخرى لسلسلة فورييه ، تدمج بين معاملات الجيب والتجيب و نسميه تابع التجيب المزاح (phase shifted cosine) وتأخذ السلسلة الشكل العام:

$$F(t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos(nwt + \theta_n) \qquad (4)$$

حيث :

$$\theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$$

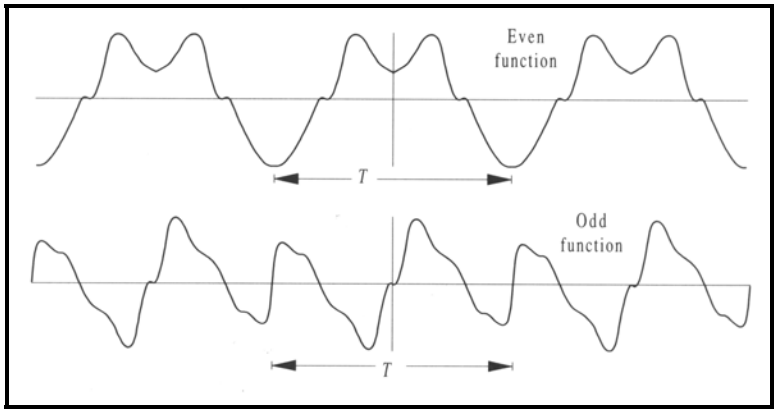
$$C_0 = a_0 \quad , \quad \theta_0 = 0 \quad , \quad C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

في مجموعات التقويم التابع $F(t)$ مكون من قطعة جيبية ، أيضاً كثير من أشكال المنابع تكون جيبية . إن تكاملات فوريه من أجل تلك الأمواج يكون حسابها سهلاً على الحاسب وتعطى نتائج التكامل للعلاقات الرياضية بالشكل :

$$\int_0^{\pi} \sin(mx)\sin(nx)dx = \begin{cases} 0 & , \quad m \neq n \\ \dfrac{\pi}{2} & , \quad m = n \end{cases}$$

$$\int_0^{\pi} \cos(mx)\cdot\cos(nx)dx = \begin{cases} 0 & , \quad m \neq n \\ \dfrac{\pi}{2} & , \quad m = n \end{cases} \qquad (5)$$

- من الضروري أحياناً العودة لمسألة التناظر في العلاقات وذلك كما في الشكل (1) ، مثلاً إذا كان التابع ($F(t)$) ذا تناظر فردي (أي كان متناظراً بالنسبة للمحور (y) مثل التابع ($\cos\theta$) فإن العوامل $bn=0$ من أجل جميع قيم (n) . وإذا كان التابع ذا تناظر زوجي (أي كان متناظراً حول المبدأ مثل $\sin\theta$) عندئذ فإن العوامل $an=0$ من أجل جميع قيم (n)
- المعادلة $C_n \cos(nwt + \theta n)$ تدعى توافقيات التابع $F(t)$ ، والمركبة التوافقية الموافقة لـ(n) نطلق عليها التوافقية (n) ، العامل (Cn) هومطال (Component Amplitude)التوافقية ، (θn) زاوية التوافقية (Component phase) .

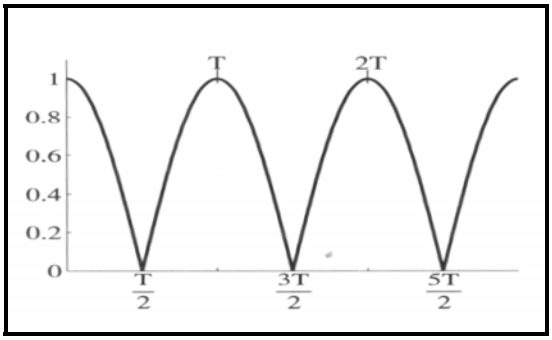


الشكل ١ :

- العامل C0=a0 نطلق عليه المركبة المستمرة للتابع F(t) ، العامل $C_1 \cos(wt + \theta_1)$ نطلق عليه المركبة الأساسية للتابع F(t) . التردد يساوي (1/T) هو التردد الأساسي للتابع F(t) .
- لكل مركبة قيمة فعالة R.M.S $Cn(RMS) = Cn/\sqrt{2}$, C0(R.M.S)=C0
- إذا كان التابع هو موجة توتر الخرج لمقوم (ac –dc) القيمة الهامة هنا هي C0 .
- إذا كان التابع F(t) هو موجة توتر الخرج لمبدل (AC – AC) يعمل عند تردد من (60) إلى (180) هرتزاً القيمة (Cn) الموافقة للتردد (180) هرتزاً هي المفيدة هنا ، وعموماً في إلكترونيات القدرة الكهربائية التوافقية التي تهمنا في الدراسة تسمى بالتوافقية المرغوب بها. أما باقي التوافقيات تدعى بالتوافقيات غير المرغوب بها، وتعدُّ كل التوافقيات ما عدا التوافقية الأساسية المدروسة توافقيات ضجيج وسنوضح ذلك في المثالين الآتيتين:

مثال (١) :

إن خرج مقوم (full wave rectifier) شكل (2) ذا موجة كاملة يعطى بالعلاقة $V_0 \cos(w_{in} t)$ ويحتوي على مركبة تردد أساسية (fundamental frequency) ومركبات تردد أخرى ويلزم دائماً معرفة المركبة المرغوب بها، والمركبات غير المرغوب بها في موجة توتر الخرج .كذلك معرفة القيم الفعالة RMS المرغوب بها.



الشكل ٢: يوضح شكل موجة توتر الخرج لجسر التقويم

بفرض: (Win) التردد الزاوي لموجة الدخل . (W) التردد الزاوي لموجة الخرج وعليه :

$$W = \frac{2\pi}{T} = 2Win \qquad (6)$$

يتم حساب المعاملات (a0 , bn , an) من تحليل فوريه : $a_0 = \frac{1}{T}\int_{t}^{t+T} F(t)dt$

$$a_0 = \frac{W_{in}}{\pi}\int_{-\pi/2win}^{+\pi/2win} V_0\cos(w_{in}t)dt$$
$$= \frac{2W_{in}}{\pi}\int_{0}^{+\pi/2win} V_0\cos(w_{in}t)dt = \frac{2V_0}{\pi} \qquad (7)$$

$$a_n = \frac{2W_{in}}{\pi}\int_{-\pi/2win}^{+\pi/2win} V_0\cos(w_{in}t)\cos(nwt)dt$$
$$= \frac{4}{\pi}\int_{0}^{\pi/2} V_0\cos(\theta)\cos(2n\theta)d\theta$$
$$a_n = \frac{4V_0}{\pi}\frac{\cos(n\pi)}{1-4n^2} \qquad (8)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi}\int_{-\pi/2}^{+\pi/2} V_0\cos\theta\sin(2n\theta)d\theta = 0 \quad \text{for all} \quad n \geq 1 \qquad (9)$$

نتيجة ذلك يمكن إعادة كتابة سلسلة فورييه لمقوم الموجة الكاملة بالشكل :

$$F(t) = \frac{2V_0}{\pi} + \frac{4V_0}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\cos(n\pi)}{1-4n^2}\cos(nwt)\ ,\ W=2Win \qquad (10)$$

ومنه فإن التردد الأساسي لموجة الخرج هو ضعف تردد الدخل . المركبة المطلوبة هنا هي المركبة المستمرة وبقيمة فعالة قدرها $(\frac{2V_0}{\pi})$ والمطال Cn يتناقص بسرعة كلما زادت (n) وأكبر قيمة غير مطلوبة هي عندما (n=1) وهو : $\frac{4V_0}{3\pi}\cos(2w_{in}t)$

مثال (٢) :

في المعرجات تعمل القواطع (الثيرستورية أو الترانزسستورية) على التبديل بين قطبي المنبع المستمر معطية بالخرج توتراً ذا شكل موجة مربعة . غالباً ترشح هذه الموجة لأقرب شكل جيبي . ولحسن اختيار المرشح يلزم عادة معرفة مطال التوافقيات المرغوب بها في الموجة المربعة ذات السرعة الزاوية (w) (radian frequency)

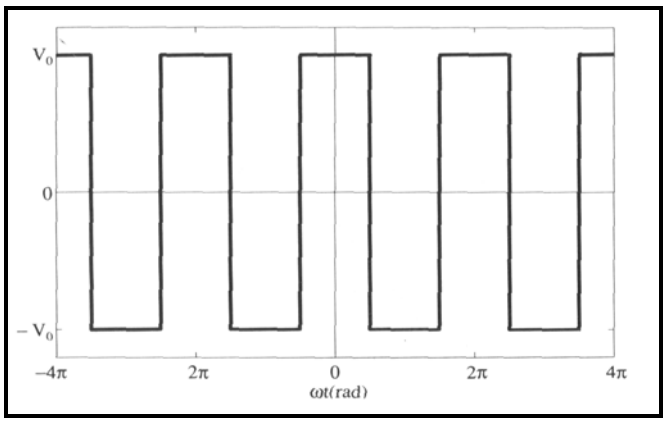
الموجة المربعة ذات مطال (Vo) ودور ($T = \frac{2\pi}{W}$) (حسب الشكل (3)

القيمة المتوسطة (Average Value) للموجة المربعة الناتجة عن المعرج (sq(wt يساوي الصفر . وبالعودة للتناظر حول المحاور وهنا المحور (y) نجد أنَّ (bn=0) لكل قيم (n) . وبتغيير العامل $\theta = wt$ واختيار $\tau = \frac{-T}{4}$ فإن العامل an يمكن حسابه للموجة $[V_0 sq(\theta)]$ من العلاقات المعروفة :

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{3\pi/2} V_0 \, sq(\theta) \cos(n\theta) d\theta$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} V_0 \cos(n\theta) d\theta - \frac{1}{\pi} \int_{\pi/2}^{3\pi/2} V_0 \cos(n\theta) d\theta$$

$$a_n = \frac{4V_0}{n\pi} \sin(\frac{n\pi}{2})$$



الشكل ٣:

ومن ثَمَّ فإن مطال (an) يتناقص كتابع (1/n) إذاً من أجل (n=1) يكون لدينا أكبر مطال ، وهو بالنتيجة

المركبة المطلوبة في تطبيقات المعرج وذات سعة تساوي ($\frac{4V_0}{\pi}$) .

ملاحظة : لتسهيل الحسابات السابقة يمكننا أحياناً اتباع القواعد التالية :

١-إذا كان التابع زوجياً في المجال ($\frac{-T}{2}$, $\frac{T}{2}$) تصبح الثوابت كما يأتي:

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^{T/2} F(t)dt \ , \ a_n = \frac{4}{T}\int_0^{T/2} F(t)\cos\frac{2\pi n}{T}t\,dt \ , \ b_n = 0 \quad (11)$$

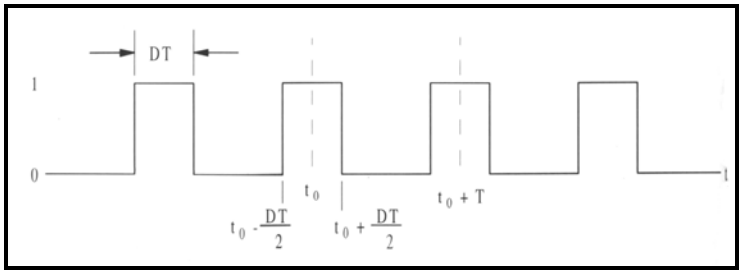
٢-إذا كان التابع فردياً في المجال ($\frac{-T}{2}$, $\frac{T}{2}$) تصبح الثوابت كما يأتي:

$$a_0 = a_n = 0 \quad , \quad b_n = \frac{4}{T}\int_0^{T/2} F(t)\sin\frac{2\pi n}{T}t\,dt \quad (12)$$

٣ـ تمثيل سلاسل فورييه للتوابع النبضية :

لكي نستفيد من تحليل فورييه نحتاج إلى دراسة التوابع النبضية والفكرة تكمن في حساب سلاسل فورييه للتوابع النبضية بطريقة عامة متجنبين إعادة هذه الحسابات مستقبلاً، ذلك أن أي تابع نبضي q(t) إما أن يكون (0) أو (1) وغالباً ما يكون دورياً ، ورسم مثل هذا التابع سيكون قطاراً من النبضات المربعة . لذا سنأخذ سلسلة من النبضات العامة ونذكر سلسلة فورييه لها وذلك كما ورد في أحدث المراجع العلمية[2] , [3]

سلسلة النبضات ذات دور (T) إحدى هذه النبضات محورها يؤخذ عند t=t0 كما في الشكل (4)



الشكل ٤:

لكل نبضة زمن استمرار (DT) حيث (D) نطلق عليه (duty cycle) أو (duty ratio) (فترة العمل من الدور) أو دور التشغيل ودائماً $0 \le D \le 1$ تردد هذا القطار $f = \frac{1}{T}$ وترددها الزاوي $W = \frac{2\pi}{T}$.

بحساب مركبات فورييه للتابع q(t) نرى أنَّ المركبة المستمرة a0 تعطى بالعلاقة الآتية:

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} q(t)dt$$

مع العلم أن جزء الدور الموافق لـ q(t)=1 هو فقط الذي سيساهم في التكامل ، لأن q(t)=0 فيما عدا المجال الواقع بين $(t_0 - DT/2 \ , \ t_0 + DT/2)$ وعليه فإن التكامل سيصبح على الشكل :

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_{t_0-DT/2}^{t_0+DT/2} q(t)dt = \frac{I}{T}\int_{t_0-DT/2}^{t_0+DT/2} 1.dt = \frac{DT}{T} = D$$

وبالعودة لشكل الموجة السابقة نتأكد أن للموجة قيمة زمنية متوسطة (D) وهو (duty ratio) (فترة العمل من الدور) أو دور التشغيل ومنه $q_{RMS} = \sqrt{D}$.

يمكن بالأسلوب نفسه أن يتم حساب (C_n , θ_n , b_n , a_n) والنتيجة هي :

$$C = \frac{2}{\pi}\frac{\sin(n\pi D)}{n} \quad , \ n \neq 0$$

$$\theta_n = -nwt_0 \qquad \text{wher } w = 2\pi/T$$

وعليه يمكن تعريف زاوية مرجعية $\phi_0 = wt_0$ و $\theta_n = -n\phi_0$ وبهذا يمكن أن تعطى علاقة q(t) العامة بالشكل :

$$q(t) = D + \frac{2}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin(n\pi D)}{n}\cos(nwt - n\phi_0)$$

ونتيجة لذلك يمكننا القول إنَّ تمثيل فورييه يبين أن التابع العام (q(t)) يمكن أن يحدد بشكل كامل بثلاثة معايير فقط وهي :

١-دور التشغيل D .

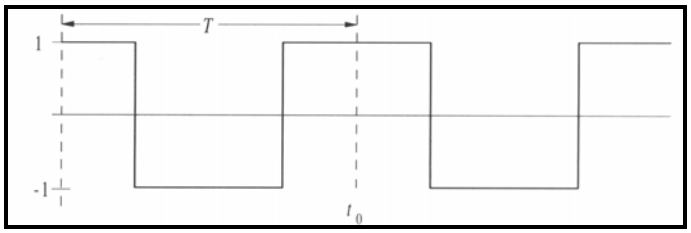
٢-التردد الزاوي $w = 2\pi f$ أو الدور (T) .

٣-الزمن المرجعي t_0 أو الزاوية المرجعية ϕ_0 .

هذه القيم تحدد التابع النبضي تماماً وعملية القطع للقواطع المستخدمة يمكن تحديدها بواحد أو اثنين من هذه المعايير .

٤ـ نشر فورييه لبعض أشهر التوابع في إلكترونيات القدرة :

أ- إذا كان التابع نبضياً من الشكل المبين (5)



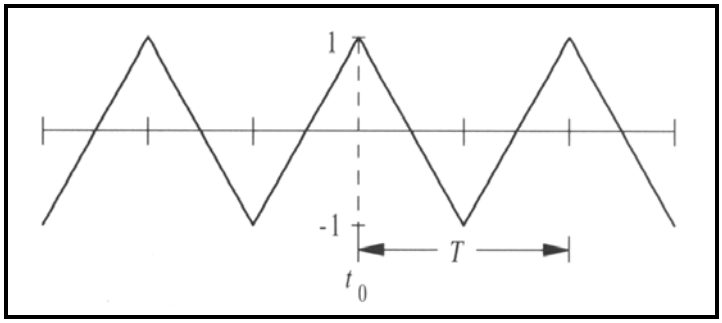
الشكل ٥:

هذا التابع متناظر بالنسبة لمحور العينات (y) ومن ثمَّ bn=0 ومن العلاقات المعروفة يمكن عندئذ إعطاء علاقة التابع حسب منشور فورييه :

$$\begin{aligned} sq(t) &= \frac{4}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin(n\pi/2)}{n}\cos(nwt - n\phi_0) \\ &= \frac{4}{\pi}\sum_{n=1,3,5}^{\infty}\frac{(-1)^{n-1/2}}{n}\cos(nwt - n\phi_0) \end{aligned} \qquad (13)$$

$$sq_{RMS}=1 \ , \quad sq\,THD = \sqrt{\frac{\pi^2}{8}-1}$$

ب- إذا كان التابع مثلثياً حسب الشكل (6)



الشكل ٦:

هذا التابع يساوي :

$$F(t)=\begin{cases}1-t & 0\le t\le 0\\ t-3 & 2\le t\le 4\end{cases}$$

التوافقيات الفردية معدومة لأن التابع زوجي $\Leftarrow$ bn=0

$$a=\frac{2}{T}\int_0^{\frac{2}{T}}F(t)\,dt=0 \qquad , \qquad a_n=\frac{-4}{\pi^2 n^2}\left[(-1)^n-1\right]$$

ومن ثمَّ يعطى منشور فوريه حسب العلاقة :

$$F(t)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{8}{\pi^2(2n-1)}\cdot\cos\frac{\pi(2n-1)\cdot t}{2} \qquad (14)$$

أو يعطى المنشور حسب العلاقة أدناه وكلاهما بالنتيجة واحد

$$F(t)=\frac{4}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1-\cos(n\pi)}{n^2}\cdot\cos(nwt-n\phi_0)$$

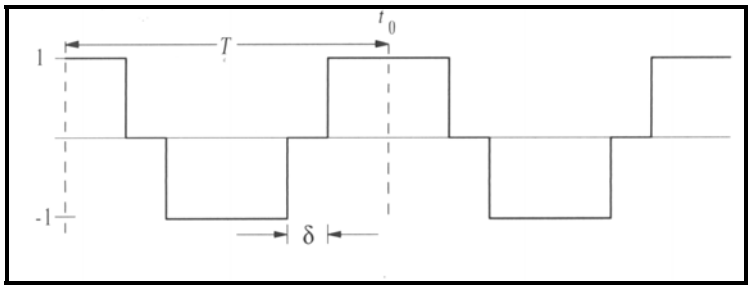
$$F(t)=\frac{8}{\pi^2}\sum_{n=1,3,5}^{\infty}\frac{1}{n^2}\cdot\cos(nwt-n\phi_0)$$

$$RMS=\frac{\sqrt{3}}{2} \qquad , \qquad THD=\sqrt{\frac{\pi^2}{90}-1}$$

جـ- إذا كان التابع من الشكل شبه المربع (quasi – square wave) وذلك لخرج معرج توتر (Voltage source inverter) (VSI) فإن علاقة منشور فورييه له تعطى :

$$VSI = \frac{4}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin(n\pi/2)\cdot\cos(n\delta/2)}{n}\cos(nwt - n\phi_0) \qquad (15)$$

بفرض أن $[\,d = \frac{1}{2} - \frac{\delta}{2\pi}\,]$ عندئذ القيمة الفعالة للتابع $VSI_{RMS} = \sqrt{2d}$



الشكل ٧:

د- إذا كانت موجة الخرج كما في خرج جسر تقويم تفرعياً مضاعفاً (PD3) أو أي عدد من الأطوار (m) (حسب الشكل (D-8) فإن منشور فورييه لهذا التابع هو :

$$m\,rectifier(t) = \frac{m}{\pi}\sin\frac{\pi}{m} + \\ + \frac{m}{\pi}\sin\frac{\pi}{m}\sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{\cos(n\pi)}{nm+1} - \frac{\cos(n\pi)}{nm-1}\right]\cdot\cos(nmw_{in}t) \qquad (16)$$

والقيمة الفعالة $m\,rectifier\,RMS = \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{m}{4\pi}\sin(\frac{2\pi}{m})}$

٥ـ الخطوات التنفيذية لبرنامج تحليل التوافقيات المستخدم:[4]

بينا في الصفحات السابقة المعادلات الخاصة المختصرة الممكن استخدامها لإيجاد التوافقيات حسب سلسلة فورييه ، أي أن معرفة التابع $F(t)$ تساعد على معرفة التوافقيات بعد استخدام العلاقات السابقة.إنما الواقع العملي الذي نقابله يختلف عن ذلك في الحقيقة ، وعند تطبيق راسم الإشارة نجد أن شكل موجة التوتر أو التيار غير جيبية (مشوه) ، ولا نعلم معادلتها الحقيقية ، ونظراً لحجم نسبة التشوه لا يمكن وضع علاقة مباشرة لها، والعلاقات السابقة صالحة للأشكال النظرية الممكن الحصول عليها في إلكترونيات القدرة .

وكي نستطيع إيجاد التوافقيات في الواقع العملي نتبع مخبرياً الأسلوب الآتي:

- نقوم بتسجيل موجة التوتر أو التيار المراد حساب التوافقيات فيها في ذاكرة الحاسب وذلك باستخدام بطاقة تحصيل نوع (PCL – 711) تستخدم مع حاسب نوع (PC /XT /AT/IBM) أو الحواسب المتوافقة معه وتمتاز هذه البطاقة بما يلي :
  - تمتلك ثماني قنوات تمثيلية : Analog input eight signal ended
  - تحتوي على مبدل تمثيلي – رقمي : AD574 – 12 bit
  - زمن التبديل الأعظمي للمبدل 25 ميكرو ثانية.
  - مطال الدخل التمثيلي : +/-5V .
  - يتم التحكم بقدح المبدل A/D ونقل المعلومات المبدلة عبر برنامج البطاقة .
  - تمتلك البطاقة (16) مدخلاً رقمياً و(16) مخرجاً رقمياً .
  - دقة القياس : +/- 1 bit 0.015% of reading

بعد تسجيل شكل الإشارة المدروسة على شكل ملف ومراعاة أسلوب قياس التيار والتوتر، أي استخدام عمليات العزل الكهربائي قبل تطبيق أية إشارة على بطاقة التحصيل ، نقوم بعدئذ بمعالجة هذا الملف في الحاسب باستخدام برنامج خاص تم وضعه من قبلنا . ونوضح فيما يأتي المراحل العملية المتبعة :

٥-١- خطوات تشغيل بطاقة التحصيل :

- استدعاء برنامج (QB4) حيث لغة برنامج قيادة البطاقة المكتوبة هو (QB4).
- استدعاء برنامج القيادة المسمى (FINAL) من خلال البرنامج (QB4 EXE).
- بعد أن يصبح البرنامج جاهزاً في ذاكرة الحاسب يطلب من المستثمر إدخال الأوامر الآتية:
  - اسم الملف المراد تخزين العينات الناتجة عن الإشارة المقاسة فيه.
  - إدخال رقم القناة المراد القياس عليها إذا أردنا قياس إشارة واحدة أو أكثر
  - إدخال رقم القناة النهائية المراد القياس من خلالها .
  - إدخال عدد العينات المراد قياسها للإشارة .
  - الضغط على مفتاح "ENTER " وبعد تجهيز المقاييس اللازمة لأخذ الإشارة ، يعمل على بدء البرنامج بالعمل وتخزين العينات ضمن الملف .
  - في نهاية العملية يتوقف البرنامج ، وعليه نطلب البرنامج من جديد لعرض الأشكال المسجلة عليه والتأكد من صحتها، وذلك بعد مقارنتها براسم الإشارة المهبطي .

٥-٢- مراحل عمل برنامج تحليل التوافقيات :

١- استدعاء برنامج تحليل التوافقيات وهو مكتوب حالياً بلغة (Turbo pascal) باسم " FORIA.PAS " .

٢-تشغيل البرنامج كأي برنامج يعمل بلغة (Turbo pascal) .

٣-إدخال اسم الملف المراد قراءته وهذا الملف الذي تم تخزينه من خلال برنامج بطاقة التحصيل

وليكن مثلاً " NA1.PCL " .

٤ـيطلب منا البرنامج إدخال عدد العينات المراد قراءتها ، أي يتم إدخال رقم العينة الأولى ثم إدخال رقم العينة الأخيرة .

٥ـإدخال رقم القناة المراد القراءة منها .

٦ـيقوم الحاسب بعرض العينات التي تم اختيارها على الشاشة وعددها .

٧ـيقوم الحاسب بعدئذ برسم شكل الإشارة من خلال العينات التي تم اختيارها .

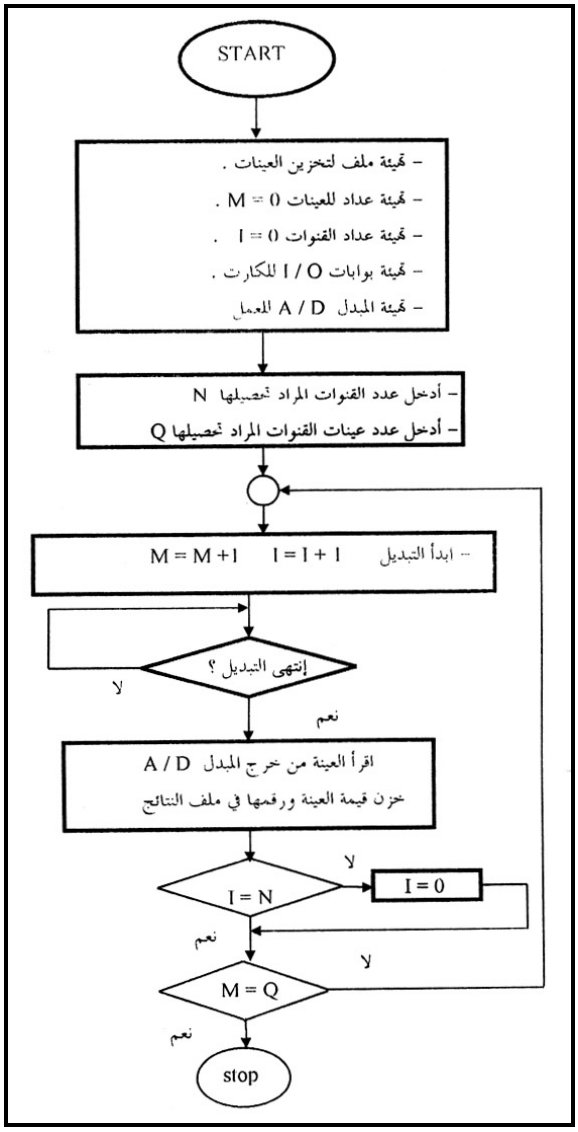
٨ـ يطلب الحاسب الموافقة لإجراء عملية التحليل ، ويتم ذلك بإدخال الحرف (y) .

٩ـيطلب الحاسب إدخال عدد التوافقيات المراد تحليلها وإظهارها على الشاشة، وعليه تظهر على الشاشة أرقام هذه التوافقيات .

١٠ـبعد إجراء الحساب تتم في هذه المرحلة عملية رسم التوافقيات على الشاشة واحدة بعد الأخرى ، بحيث تظهر التوافقية الأساسية وباقي التوافقيات الأخرى على الشكل نفسه، ومجموع هذه التوافقيات هي الموجة الأساسية المأخوذة من القياس الأصلي الأولي .

٥ـ٣ـ المخطط الانسيابي :

نورد فيما يلي المخطط الانسيابي لبرنامج قيادة بطاقة التحصيل والبرنامج المستخدم ، كما نورد المخطط الصندوقي لبرنامج تحليل التوافقيات الموضوع .

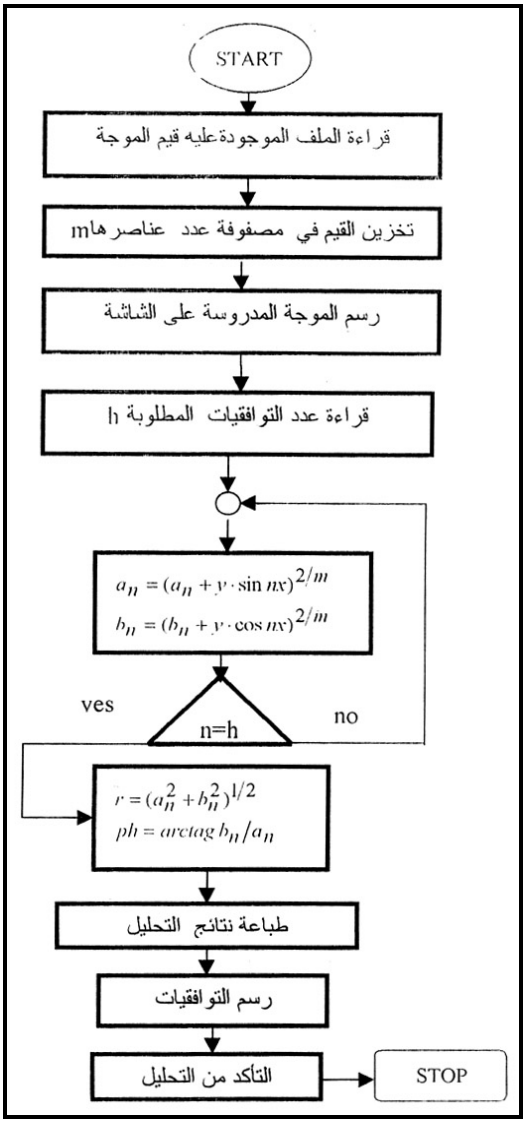


الشكل ٨: المخطط الانسيابي لبرنامج قيادة بطاقة التحصيل

البرنامج (.PROG)

```
CLS
DIM dta%(20000)
PORT% = &H220
INPUT "File Name to Save DATA : "; a$
C$ = a$ + ".PCL"
OPEN C$ FOR OUTPUT AS #1
'******** STEP 1: SET SCAN CHANNEL RANGE ********
INPUT "START CHANNEL NUMBER ? <0 -- 7> ", start%
INPUT "STOP  CHANNEL NUMBER ? <0 -- 7> ", stp%
'******** STEP 2: IMPLEMENT TRIGGER & PROGRAM TRANSFER
********
INPUT "NUMBER OF CONVERSIONS ? <1 -- 20000> ", n
TIMER ON
TIME$ = "00:00:00"
DUMMY = INP(PORT% + 4)
ch% = start%
FOR LP1 = 0 TO n - 1
OUT PORT% + 10, ch%
ch% = ch% + 1
IF ch% > stp% THEN ch% = start%
FOR WAIT1 = 0 TO 5: NEXT WAIT1
OUT PORT% + 12, 0
AA: DH% = INP(PORT% + 5)
IF DH% > 15 GOTO AA
DL% = INP(PORT% + 4)
dta%(LP1) = (DH% * 256 + DL% - 2048) - 2.5
NEXT LP1
x = TIMER
'******** STEP 3: DISPLAY DATA ********
timex = x / n
FOR i = 0 TO n - 1
```

```
                dat# = dta%(i) * 5 / 2048
            ' dat1# = (dat# * 1 / 180) * 1000
                dat1# = dta%(i) * 2.16 / 4
            PRINT i + 1; "ch:"; ch%; "data:";
            PRINT USING "####.#####"; dat#;
                PRINT "time:"; timex * i
                    PRINT #1, i,
                PRINT #1, dta%(i),
        '  PRINT #1, USING "##.########"; dta%(i);
                    '  PRINT #1, "",
            PRINT #1, USING "####.#####"; dat#;
                    PRINT #1, "",
            PRINT #1, USING "###.########"; dat1#;
                    PRINT #1, "",
            PRINT #1, USING "##.######"; timex * i;
                    PRINT #1, "",
ch% = ch% + 1: IF ch% > stp% THEN PRINT #1, "": ch% = start%
                NEXT i
PRINT "total time:[sec]"; x: PRINT #1, "total time:[sec]", x
                CLOSE #1
                END
```



الشكل ٩: المخطط الانسيابي لبرنامج تحليل التوافقيات

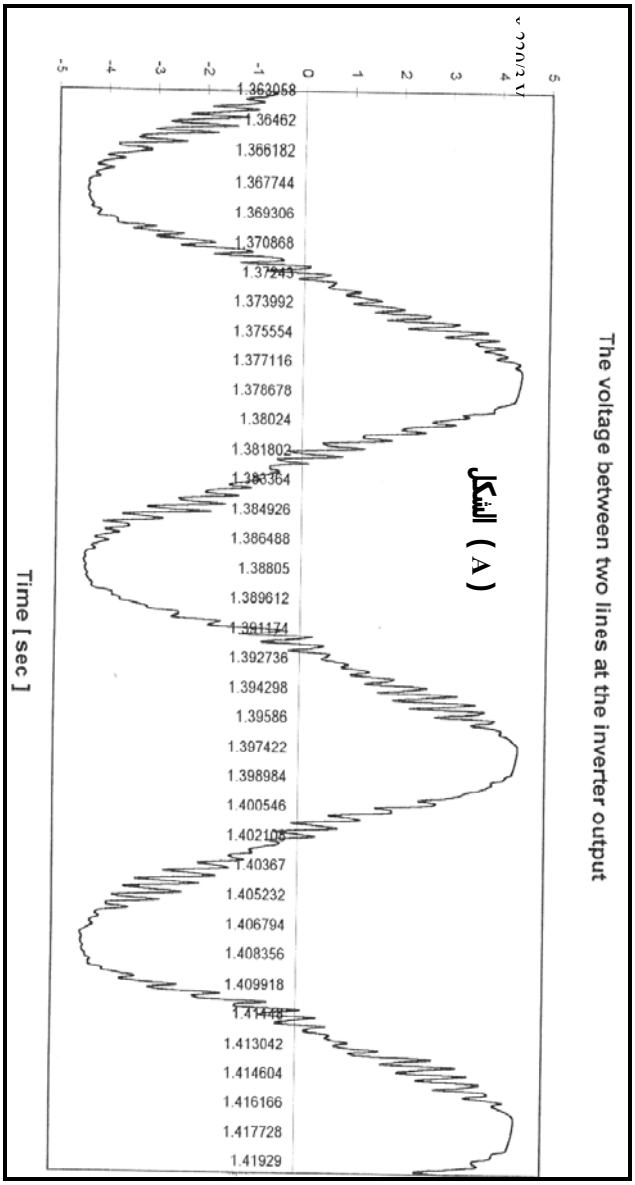
٥-٤- بعض الأمثلة العملية :

- الشكل (A) يبين موجة التوتر المتناوب بين خطين الناتجة من معرج التوتر ويمكن عرض هذه الأمواج سواء كتابع لعدد العينات ، أم كتابع للزمن ،والشكل (B)يبين موجة التيار المتناوب في خرج المعرج المغذي لمحرك تحريضي.
- في الشكل (C) أشكال التوافقيات الناتجة في موجة التوتر مرسومة حسب قيم الجدول التحليلي للتوافقيات ورتبها ومطالها .
- في الشكل (D) نبين أشكال التوافقيات الناتجة في موجة التيار مرسومة حسب قيم الجدول التحليلي للتوافقيات ورتبها ومطالها.

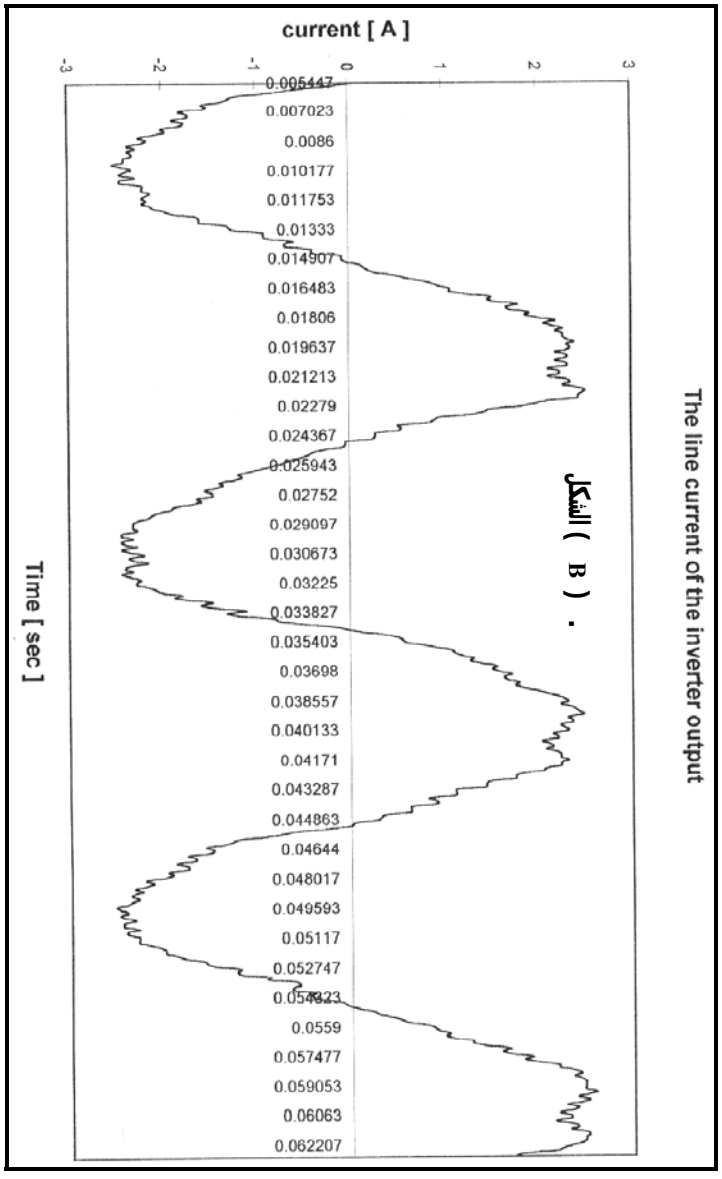
الخاتمة :

كانت غايتنا في هذا البحث التوصل إلى طريقة عملية لإظهار التوافقيات المحملة على أمواج التوتر والتيار والتعرف على درجة التشوه لهذه الأمواج عن طريق قياس رتبة ومطال التوافقيات المحمولة وذلك على الرغم من وجود أجهزة صناعية تباع في الأسواق لقياس وتحليل التوافقيات ، و ذلك لأن إلكترونيات القدرة الكهربائية أضحت من المصادر الأساسية لنشوء التوافقيات ،ومن خلال دراستنا لمنشور سلسلة فوريه نرى تغير العلاقة الرياضية الموصفة لموجة التوتر أو التيار من حالة إلى أخرى وبشكل كبير ، ونظراً لعدم ذكر الأسلوب الحقيقي الذي تتبعه هذه الأجهزة الصناعية لقياس التوافقيات ، فإننا نرى أن وضع العلاقات الرياضية أو اتباع الأسلوب التحليلي الذي اعتمدناه يكون حلاً سليماً لمعرفة صحة القرارات الناتجة عن رتب التوافقيات ومطالها ، ذلك أننا نقوم في البداية بمراقبة شكل الإشارة وأخذ مطالها حسب العينات ثم نعالجها ونعيد رسمها للتأكد من أن مجموع التوافقيات المعطاة في البرنامج يعطي أقرب شكل للشكل الأساسي المعتمد منذ البداية .

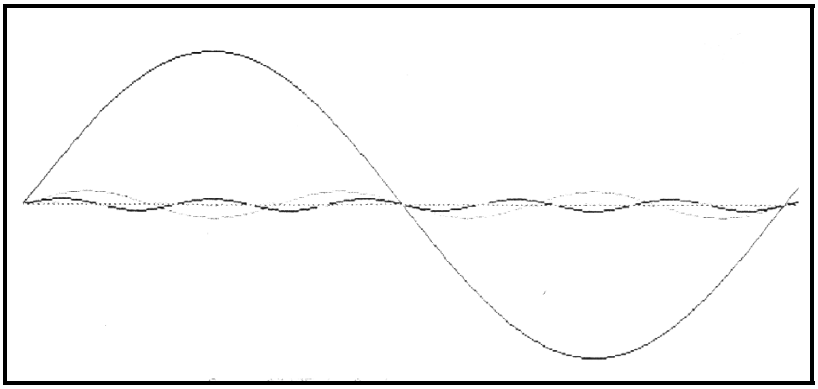
هذا البرنامج الموضوع يعالج الأمواج المتناظرة بالنسبة لمحور السينات ، وكي يستطيع حل جميع أشكال العلاقات الرياضية يجب تعديله وإضافة ما يلزم كي يستطيع حل جميع الأشكال المتوقعة من الأمواج .


The voltage between two lines at the inverter output
Time [sec]
1.363058
1.36462
1.366182
1.367744
1.369306
1.370868
1.37243
1.373992
1.375554
1.377116
1.378678
1.38024
1.381802
1.383364
1.384926
1.386488
1.38805
1.389612
1.391174
1.392736
1.394298
1.39586
1.397422
1.398984
1.400546
1.402108
1.40367
1.405232
1.406794
1.408356
1.409918
1.41148
1.413042
1.414604
1.416166
1.417728
1.41929

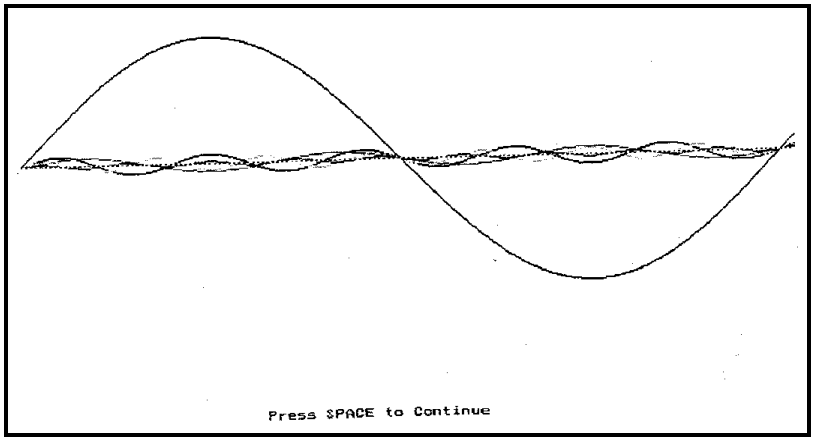
الشكل (٨)


current [A]
-3
-2
-1
0
1
2
3
0.005447
0.007023
0.0086
0.010177
0.011753
0.01333
0.014907
0.016483
0.01806
0.019637
0.021213
0.02279
0.024367
0.025943
0.02752
0.029097
0.030673
0.03225
0.033827
0.035403
0.03698
0.038557
0.040133
0.04171
0.043287
0.044863
0.04644
0.048017
0.049593
0.05117
0.052747
0.054323
0.0559
0.057477
0.059053
0.06063
0.062207
Time [sec]
The line current of the inverter output

الشكل (B) .



الشكل(C)



الشكل(D)

لذا قمنا بوضع سبعة برامج مساعدة أخرى ، اخترناها بحيث تشمل أغلب الأشكال و الأمواج التي نصادفها في المجال التطبيقي . هذه البرامج المساعدة شملت :

أ- الموجة الجيبية Sine wave
ب- موجة النبضية المتناظرة بالنسبة لمحور العينات Pulse wave
جـ- خرج جسر تقويم أحادي الطور . Converter wave
د- الموجة المثلثية المتناظرة بالنسبة لمحور العينات . Delta wave
هـ- موجة سن المنشار . Tooth wave

و- الموجة ذات الشكل المربع . Square wave
ك- موجة شبه مربعة quasi-square wave .

- عندما نريد إجراء تحليل فورييه لأي من هذه الأمواج ، يجب في البداية رؤية شكل الموجة على راسم الإشارة المهبطي ، وعندئذ يمكن تحديد أي برنامج مساعد من البرامج السبعة يفضل استخدامه ، لأن المعادلة العامة المستخدمة للتحليل سوف تكون عندئذ هي أقرب المعادلات صدقاً وقرباً من الواقع للموجة المرئية وعندئذ يمكن فتح نافذة وطلب هذا البرنامج واستكمال إجراءات القياس .

إن البرنامج الموضوع يمكننا من حساب مطال التوافقيات حتى الرتبة (40) كما يمكننا من حساب مطال التوافقيات وزاوية ورسم هذه التوافقيات حسب مطالها سواء بصفحة واحدة أو بأكثر من صفحة . كما يمكننا من حساب العامل THD% وبعدئذ يمكننا من إعادة رسم التوافقيات المدروسة وعرضها على الشاشة أو نقلها إلى الطابعة ، كما نستطيع جمع هذه التوافقيات من جديد لإعطاء الشكل النهائي للموجة بعد حساب التوافقيات وذلك كي نتأكد من أن مجموع التوافقيات التي قمنا بحسابها يعطي شكل الموجة الأساسي الذي حاولنا حساب التوافقيات فيه .

- زمن المعالجة والإظهار صغير جداً، وتكمن الدقة هنا في قياس موجة التوتر أو التيار الأساسية ووضعها بصدق في الملف عن طريق بطاقة التحصيل ، وذلك لأن أي نقل للإشارة غالباً ما يضيف إليها بعض التشوهات أو يعدل من شكلها وخاصة عملية استخدام المحولات لدى الحاجة لخفض التوتر .
- استخدام بطاقات التحصيل يساعد في سهولة إجراء القياسات الميدانية ثم العودة للمخبر لإجراء التحاليل اللازمة وتصنيف النتائج .
- إذا ما قورنت هذه الطريقة مع الطرق العلمية الأخرى مثلاً – P.T. Krien) (January 1997 والتي تعتمد لقياس التوافقيات برنامج (Mathcad) والذي يحتاج لتقسيم الموجة إلى قطع وإعطاء معلومات عن كل قطعة – زاوية البدء – زاوية الانتهاء – المطال – التردد – زاوية الطور ، ووضع هذه المعلومات في متريس . والدقة الحقيقية محدودة وذلك بسبب الألغوريثم الداخلي الذي يستخدمه نظام (Mathcad) في التكامل أو في دقة قياس الزوايا والمطالات عند كل قوس من أقواس موجة التوتر أو التيار المعتمدة .

من هنا نجد أن الطريقة التي اعتمدناها سهلة الاستخدام والبرنامج المستخدم في بطاقة التحصيل هو الذي يوفر كل المعلومات عن الموجة المطلوب تحليلها ، ولا نحتاج لتأمين متريس المعلومات عند كل تغير في موجة التوتر أو التيار .

النتائج :

- يستطيع هذا البرنامج معالجة سبعة أشكال مختلفة من الأمواج الناتجة عن جسور التقويم أو التعريج ، وإعطاء المركبات الأساسية للموجة وتوافقياتها .

- يمكن بهذه الطريقة تخزين المعلومات عن الأمواج المراد تحليلها من الموقع والعودة للمخبر لدراسة التوافقيات وأثرها .
- يعطي البرنامج مطال كل توافقية والعامل THD% ، كما يمكن إعادة رسم وجمع التوافقيات للحصول على الموجة الأساسية .
- استخدام بطاقات التحصيل يحقق الدقة في القياس والمعالجة الصحيحة للموجة المدروسة .
- سهولة استخدام البرنامج وتسجيل القياسات في ذاكرة الحاسب .

المراجع

1- IEEE ,1998 Transaction on Power Delivery.

2- R. T.Krien – January ," Elements of power electronics " , Book , Oxford Newyork,1998.

3- Muhammad Rashid , " Power Electronics derives and circuits applications"Book,prents-HALL international INC 1993

Book, 1996.

4- Al- jazi Ali , "Cpmportement et etude du stabilite d' une micro Alternateur connecte' aux reseaux electriques " , These , 1998.

5- Goke, T and W. H. Wellssow – 1996 , IEEE, Transaction on Power Systems "Astaitical approach to the calculation of harmonics in Mv. Systems caused by dispersed Lv. Custemers".

6- Shoer, N, L, K, adamson – P. Bard Burton – Kpoor, Sadek ," DC. Side filers for multiterminal HVDC " , Systems ",1996, IEEE, Transaction on Power delivery.

7- Riso ,S.R – Castanda and D. Veas "Lamps Harmonic distortion and Power factor assessment in city gas distribution " , 1996, IEEE, Transaction on Power Delivery

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: