

ПРОЕКТИРАНЕ НА ЧЕСТОТЕН МОДУЛАТОР С ВАРИКАП

DESIGN OF FREQUENCY MODULATOR WITH VARICAP

Боян Карапенев*

Технически университет - Габрово

Статията е постъпила на 11.02.2015 г.; приета за отпечатване на 18.06.2015 г.

Abstract

This paper presents the features of frequency modulation and methods for the construction of the frequency modulators used in the radio-communication appliances widely. Based on the designed high-frequency LC oscillator is proposed and presented sequence for dimensioning of variant of the governing circuit with varicap which provides its transformation into a frequency modulator.

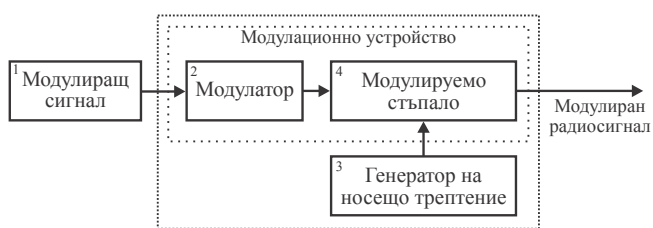
Keywords: варикап; модулатор; честотен модулатор; модулационно устройство; проектиране.

ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременните радиовръзки са много широко разпространени и не могат да бъдат реализирани без радиопредавателните и радиоприемните устройства.

С непрекъснатото развитие и усъвършенстване на комуникационната техника се увеличава необходимостта от използването на различните видове модулатори и демодулатори, които в зависимост от вида на модулиращия сигнал се разделят на аналогови и цифрови, а според параметъра на изменение на носещото трептене - на амплитудни, честотни и фазови.

Модулационните устройства имат важна и незаменима роля при изграждането на радиокомуникациите. На фиг. 1 е показана блоковата схема за формиране на модулирания радиосигнал.



Фиг. 1. Блокова схема за формиране на модулиран радиосигнал

ИЗЛОЖЕНИЕ

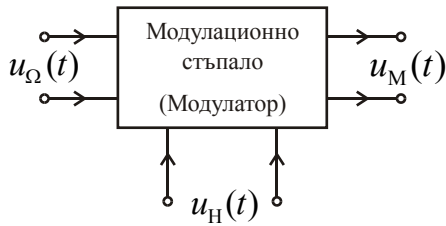
Модулацията е процес на пренасяне на спектъра на информационния (модулиращия) сигнал във високо-честотната област, което се постига чрез изменение на параметрите на високочестотно носещо трептене. В крайен резултат се получава изходният модулиран сигнал.

Честотната модулация се използва най-вече за висококачествено радиоразпръскване в обхвата на ултракъсите вълни УКВ (FM), при видеозапис на магнитна лента, музикални синтезатори, радиосвързочна апаратура и др. Радиоприемането с използване на честотната модулация и принципа на суперхетеродинния радиоприемник за високо качество на възпроизвеждане се е използвало до скоро в предавателите на аналоговите телевизионни програми за звуковия съпровод и предаването на сигналите за цветна телевизия. За да се осигури качествен прием на честотномодулираните сигнали и да не се допуснат изкривявания при възпроизвеждането, е необходимо честотната избирателност и пропусканата лента на приемника да не е по-тясна от тази, излъчвана от предавателя.

Голямото предимство на честотната модулация пред амплитудната се състои в това, че приемът е със значително по-слаб фонен шум и е по-устойчива на радиосмущения, тъй като те въздействат върху амплитудата на предавания сигнал, но не и на носителя на информацията – неговата честота. Честотната лента, заемана от честотномодулирания сигнал, е значително по-широка от тази на амплитудномодулирания и може да достигне до 200 MHz, като възпроизвеждането на който и да е звук е с много високо качество и най-близко до оригинала. Вместването на голям брой предаватели, работещи с честотна модулация, е наложило използването на високочестотния обхват на носещата честота в метровия обхват, приблизително около и над 100 MHz. Основният недостатък на разпръскването на радиовълни с метрова дължина $\lambda = (10 \div 1) \text{ m}$ и $f = (30 \div 300) \text{ MHz}$ се състои в тяхното разпространение, което е само в зоната на пряката видимост.

Устройството, реализиращо процеса на модулацията, представлява модулационното стъпало (модулатор).

Модуляционното стъпало в най-общ вид може да се представи като шестполюсник с два входа и един изход – както е показано на фиг. 2 [3]. На единия вход



Фиг. 2. Входно-изходни сигнали на модуляционното стъпало

се подава модулиращият (нисочестотният) сигнал $u_{\Omega}(t) = U_{\Omega} \cdot \cos(\omega_{\Omega}t + \varphi_{\Omega})$, а на другия – носещият (височестотният) сигнал $u_H(t) = U_H \cdot \cos(\omega_H t + \varphi_H)$ с постоянна амплитуда и честота, а на изхода се получава модулираният сигнал $u_M(t) = U_M(t) \cdot \cos[\omega_H t + \theta(t)] = U_M(t) \cdot \cos \varphi(t)$. В процеса на модуляцията е необходимо да бъде спазено условието $\omega_H \gg \omega_{\Omega}$.

Схемите на честотните модулятори се построяват въз основа на два основни метода:

- с непосредствено въздействие на честотата на честотномодулирания генератор;
- с косвено управление на изходната честота на честотномодулирания генератор.

Вторият метод позволява честотните модулятори с по-голяма стабилност, реализирани на базата на дискретни елементи, да бъдат по-лесно синхронизирани. В тези случаи модулаторите са по-сложни като устройства и имат по-голяма себестойност.

Честотните модулятори се разделят на синхронни и асинхронни като последните могат да бъдат изпълнени с прекъсване и без прекъсване на фазата.

При разработването на честотните модулятори трябва да бъдат удовлетворени следните параметри: честотна девиация Δf , скорост на модуляцията B , нестабилност на носещата $\frac{\delta \cdot f_{\omega 0}}{f_{\omega 0}}$, нестабилност на девиацията

$\frac{\delta \Delta f}{\Delta f}$, големина на краевите изкривявания, ниво на па-

разитната амплитудна модуляция, надеждност, сложност и себестойност.

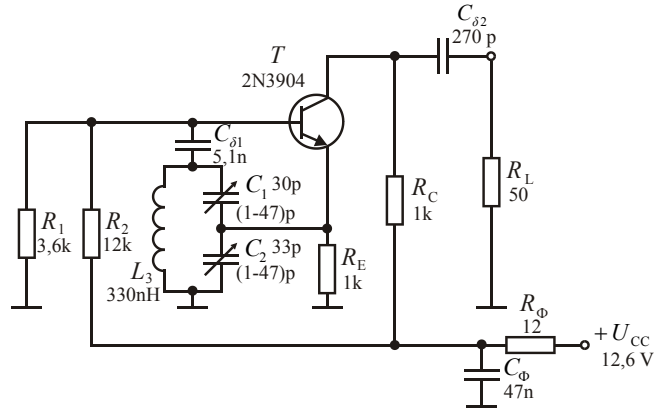
Като основен модулиращ елемент в съвременната схемотехника най-широко се използва варикапът. Широко разпространение са намерили и честотните модулятори с реактивен транзистор, с фазово донастройване на носещата честота на модулираните трептения както и тези, изградени на основата на честотните модулятори на Армстронг и Армстронг-Крозбиев [3].

Един от начините за получаване на честотен модулатор (честотно модулиран генератор) е проектирането на височестотен LC генератор и на управляваща го схема с варикап.

А. Проектирана схема на LC генератор

Въз основа на представената методика в [2] е проектиран височестотен LC генератор на фиксирана честота със следните изходни параметри: $f_0=40$ MHz, $R_L=600 \Omega$, $U_{Lm}=1,5$ V и $U_{CC}=12,6$ V като на фиг. 3 е показана неговата принципа схема и получените стойности

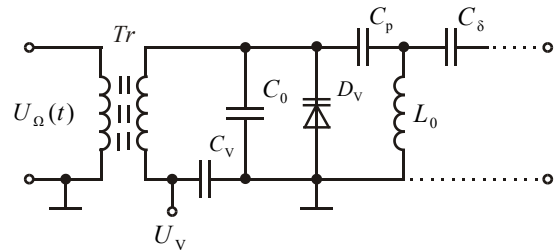
на съставните му елементи. За работната честота f_0 стойностите на C_1 и C_2 са съответно 30 pF и 33 pF.



Фиг. 3. Проектирана схема на LC генератор на фиксирана честота

В. Проектиране на управляващата схема с варикап на височестотния LC генератор

Един от възможните варианти на управляваща схема с варикап, който може да се използва при модулирането на височестотния LC генератор, е показан на фиг. 4.

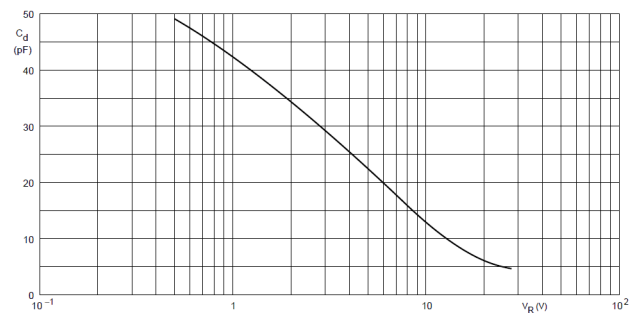


Фиг. 4. Управляваща схема с варикап на височестотен LC генератор

Проектирането на управляващата схема от фиг. 4 се извършва в следната последователност [4] като се приеме, че честотната девиация на честотния модулатор е $\Delta f = \pm 4$ kHz:

- Избор на полупроводников диод, използван в качеството на варикап, и определяне на стръмността на неговата волт-фарадна (VF) характеристика

Избира се варикап ВВУ40 с волт-фарадна характеристика, показана на фиг. 5 [5], която трябва да бъде линейна в границите на настройване на кондензаторите C_1 и C_2 (фиг. 3).



Фиг. 5. Волт-фарадна характеристика на варикап ВВУ40

- Изменение на работната честота на честотния модулатор спрямо зададената честотна девиация:

$$f_1 = 40 \cdot 10^6 + 4 \cdot 10^3 = 40004000 \text{ Hz}; \quad (1)$$

$$f_2 = 40 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^3 = 39996000 \text{ Hz}. \quad (2)$$

- Определяне стойностите на капацитетите на кондензаторите C_1 и C_2 за крайните стойности на работните честоти (честотната девиация):

$$C_{1(+)} = \frac{b_1}{\omega_1} = \frac{7,7 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 40004000} = 30,64 \text{ pF}; \quad (3)$$

$$C_{1(-)} = \frac{b_1}{\omega_2} = \frac{7,7 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 39996000} = 30,65 \text{ pF}; \quad (4)$$

$$C_{2(+)} = \frac{b_2}{\omega_1} = \frac{8,9 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 40004000} = 35,42 \text{ pF}; \quad (5)$$

$$C_{2(-)} = \frac{b_2}{\omega_2} = \frac{8,9 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 39996000} = 35,43 \text{ pF}, \quad (6)$$

където b_1 и b_2 са коефициенти, получени при проектирането на високочестотния LC генератор [2].

- Избор на работна точка на вариаката

Определяне на еквивалентните капацитети за границите на изменение на работните честоти:

$$C_{\text{екв}(+)} = \frac{C_{1(+)} \cdot C_{2(+)}}{C_{1(+)} + C_{2(+)}} = \frac{30,64 \cdot 10^{-12} \cdot 35,42 \cdot 10^{-12}}{30,64 \cdot 10^{-12} + 35,42 \cdot 10^{-12}} = 16,42 \text{ pF}; \quad (7)$$

$$C_{\text{екв}(-)} = \frac{C_{1(-)} \cdot C_{2(-)}}{C_{1(-)} + C_{2(-)}} = \frac{30,65 \cdot 10^{-12} \cdot 35,43 \cdot 10^{-12}}{30,65 \cdot 10^{-12} + 35,43 \cdot 10^{-12}} = 16,43 \text{ pF}. \quad (8)$$

От получените еквивалентни стойности на капацитивния клон $C_{\text{екв}}$, $C_{\text{екв}(+)}$ и $C_{\text{екв}(-)}$ се определя капацитетът на вариаката в работната точка - D_V и новите стойности на кондензаторите C_1 и C_2 .

$$C_{\text{екв}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{30 \cdot 10^{-12} \cdot 33 \cdot 10^{-12}}{30 \cdot 10^{-12} + 33 \cdot 10^{-12}} = 15,71 \text{ pF}. \quad (9)$$

С цел осигуряване на по-голяма честотна девиация от приетата (Δf) се избират $\Delta C_{(-)} = 16,7 \text{ pF}$, $\Delta C_{(+)} = 14,7 \text{ pF}$, и $|\Delta D_V| = 2 \text{ pF}$.

Капацитетът на вариаката в работна точка се избира 10 pF, а останалата част от стойността - 5,71 pF се разпределя между кондензаторите C_1 и C_2 от капацитивния клон на LC генератора - $D_{V,\text{п.т.}} = 10 \text{ pF}$ и $C_{\text{екв}} = 5,7 \text{ pF}$.

Стойността на еквивалентния капацитет $C_{\text{екв}} = 5,7 \text{ pF}$ се разпределя като за C_1 се избере 12 pF, а C_2 се изчисли от зависимостта за тяхното последователно свързване. За C_2 се получава стойността 10,85 (11) pF.

При осигуряване на стойността на вариаката ВВУ40 $D_V = 10 \text{ pF}$ от неговата волт-фарадна характеристика (фиг. 5) се отчита стойността на необходимото приложено преднапрежение $U_{V,\text{п.т.}} = 13 \text{ V}$. Необходимите подавани напрежения за границите на изменение на стойността на капацитета на вариаката са $U_{V(11\text{pF})} = 12 \text{ V}$ и $U_{V(9\text{pF})} = 13,5 \text{ V}$, а относителната разлика в изменението на приложеното напрежение е $|\Delta U_V| = 1,5 \text{ V}$.

Стръмността на волт-фарадната характеристика на вариаката ВВУ40 в работния участък е

$$S_V = \frac{|\Delta D_V|}{\Delta U} = \frac{2 \cdot 10^{-12}}{1,5} = 1,33 \cdot 10^{-12}, \frac{\text{F}}{\text{V}}. \quad (10)$$

- Определяне границите на допустимото изменение на напрежението на вариаката ΔU_V с цел осигуряване на минимални нелинейни изкривявания

Коефициентът на нелинейни изкривявания се определя като

$$k_u = 0,125 \cdot \frac{\Delta U}{U_{V,\text{п.т.}} + 0,86} = 0,125 \cdot \frac{0,75}{13 + 0,86} \approx 0,0068, \quad (11)$$

където

$$\Delta U = \frac{1}{2} \cdot \Delta U_V = \frac{1}{2} \cdot 1,5 = 0,75 \text{ V}. \quad (12)$$

- Определяне амплитудата на управляващото напрежение, осигуряващо максималната девиация на честота

$$U_\Omega = \frac{1}{3} \cdot \Delta U = \frac{1}{3} \cdot 0,75 = 0,25 \text{ V}. \quad (13)$$

- Определяне стойността на допустимия коефициент на свързване на вариаката към трептящия кръг

$$p_{\text{доп}} \leq \frac{\Delta U - U_\Omega}{U_{V,\text{п.т.}}} = \frac{0,75 - 0,25}{13} \leq 0,038. \quad (14)$$

$$\Delta U_V \geq U_\Omega + U_\omega = U_\Omega + p_{\text{доп}} \cdot U_{V,\text{п.т.}} = \quad (15)$$

$$= 0,25 + 0,038 \cdot 13 \geq 0,744.$$

- Определяне стойността на девиация на честота, при която във всяка точка от обхвата реалната девиация ще бъде не по-малка от зададената:

$$\Delta \omega = y \cdot \Delta \omega_{\text{зад}} = 1,0002 \cdot 50240 = 50250 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad (16)$$

където при $\Delta f_{\text{зад}} = \pm 4 \text{ kHz}$

$$y = \frac{\Delta f_{\text{max}}}{\Delta f_{\text{min}}} = \frac{40 \cdot 10^6 + 4 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^3} = 1,0002; \quad (17)$$

$$\Delta \omega_{\text{зад}} = 2\pi \cdot \Delta f_{\text{зад}} = 2\pi \cdot 8 \cdot 10^3 = 50240 \frac{\text{rad}}{\text{s}}; \quad (18)$$

$$\omega_1 = 2\pi \cdot f_1 = 2\pi \cdot 40004000 = 251,2 \cdot 10^6 \frac{\text{rad}}{\text{s}}; \quad (19)$$

$$\omega_2 = 2\pi \cdot f_2 = 2\pi \cdot 39996000 = 251,17 \cdot 10^6 \frac{\text{rad}}{\text{s}}; \quad (20)$$

$$k_f = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{251,17 \cdot 10^6}{251,2 \cdot 10^6} = 0,99. \quad (21)$$

- Определяне на необходимия коефициент на включване на вариаката за f_{min} и f_{max} , при което се осигурява необходимата девиация

$$p_1 = \sqrt{\frac{2\Delta\omega}{\omega_1^3 \cdot L_K \cdot S_V \cdot U_\Omega}} = \quad (22)$$

$$= \sqrt{\frac{2.50250}{(251,2 \cdot 10^6)^3 \cdot 330 \cdot 10^{-9} \cdot 1,33 \cdot 10^{-12} \cdot 0,25}} = 0,24,$$

където $L_K = L_3 = 330$ nH.

$$p_2 = \frac{p_1}{\sqrt{k_f^2}} = \frac{0,24}{\sqrt{0,99^2}} = 0,244. \quad (23)$$

$$\omega_0 = \omega_2 \cdot \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{k_f^2 \cdot p_1(1 - p_2) - p_2(1 - p_1)}} = \quad (24)$$

$$= 251,17 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{\frac{0,24 - 0,244}{0,99^2 \cdot 0,240(1 - 0,244) - 0,244(1 - 0,240)}} =$$

$$= 181,74 \cdot 10^6 \frac{\text{rad}}{\text{s}}.$$

- Определяне стойностите на елементите на честотно зависимия делител, използван за включване на вариака към трептящия кръг на задаващия LC генератор

$$C_0 = \frac{p_1 \cdot D_V}{1 - p_2} \cdot \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_1^2}\right) = \quad (25)$$

$$= \frac{0,24 \cdot 10 \cdot 10^{-12}}{1 - 0,244} \cdot \left(1 - \frac{(181,74 \cdot 10^6)^2}{(251,2 \cdot 10^6)^2}\right) = 1,5 \text{ pF}.$$

Избира се $C_0 = 1,5$ pF тип КрМО II С, 2 pF, ± 2 %, ОН 09 67 412-73, 63 V.

$$L_0 = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot D_V} = \frac{1}{(181,74 \cdot 10^6)^2 \cdot 10 \cdot 10^{-12}} = \quad (26)$$

$$= 3,028 \text{ } \mu\text{H} \approx 3 \text{ } \mu\text{H}.$$

- Изчисляване граничните стойности (min и max) на честотната девиация в честотната лента

$$\omega' = \omega_0 \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot D_V}{3 \cdot (C_1 + D_V)}} = \quad (27)$$

$$= 181,74 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10 \cdot 10^{-12}}{3 \cdot (12 \cdot 10^{-12} + 10 \cdot 10^{-12})}} = 187,2 \cdot 10^6 \frac{\text{rad}}{\text{s}}.$$

$$\omega'' = \omega_0 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot D_V}{C_1 + D_V}} = \quad (28)$$

$$= 181,74 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 10 \cdot 10^{-12}}{12 \cdot 10^{-12} + 10 \cdot 10^{-12}}} = 273,98 \cdot 10^6 \frac{\text{rad}}{\text{s}}.$$

Определяне стойността на разделителния кондензатор между веригата на вариака и LC генератора [1]

$$C_p = \frac{0,32}{f_{\Omega_{\min}} \cdot h_{11E}} = \frac{0,32}{300,3 \cdot 1 \cdot 10^3} = 344 \text{ nF}, \quad (29)$$

където $f_{\Omega_{\min}}$ е минималната честота от спектъра на модулиращия сигнал, приета за 300 Hz, а h_{11E} – входното съпротивление на транзистора 2N3904.

Избира се стандартна стойност за $C_p = 370$ nF тип КрМО II С, 370 nF, ± 5 %, ОН 09 67 412-73, 63 V.

Изчисляване на блокиращия кондензатор C_δ

$$C_\delta = \frac{p_{\text{дон}} \cdot C_0}{1 - p_{\text{дон}}} \cdot \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_1^2}\right) = \quad (30)$$

$$= \frac{0,038 \cdot 1,5 \cdot 10^{-12}}{1 - 0,038} \cdot \left(1 - \frac{(181,74 \cdot 10^6)^2}{(251,2 \cdot 10^6)^2}\right) = 0,028 \text{ pF}.$$

Избира се стойност за $C_\delta = 1$ pF, тип КрМО II С, ± 5 %, ОН 09 67 412-73, 63 V.

Определяне стойността на кондензатора C_V [2]

$$C_V = \frac{50 \div 200}{2 \cdot \pi \cdot f_{\Omega_{\max}} \cdot R_i} = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot 3400 \cdot 50} = 93,6 \text{ } \mu\text{F}, \quad (31)$$

където $f_{\Omega_{\max}}$ е максималната честота от спектъра на модулиращия сигнал, приета за 3,4 kHz, а R_i – входното съпротивление на модулятора, със своята стандартна стойност 50 Ω .

Избира се стандартна стойност за $C_V = 100$ μF тип КЕА-II, 25 V.

Симуляционни изследвания

С помощта на продукта Multisim са извършени симуляционни изследвания на проектираните високо-честотен LC генератор и честотен модулатор с вариак.

От получената осцилограма на генерируения сигнал от проектирания LC генератор са определени неговата амплитуда $U_{\text{Hm}} = 4,157$ V, период $T_{\text{H}} = 24,94$ ns и честота $f_{\text{H}} = 40,077$ MHz. Коефициентът на паразитната амплитудна модулация е 5 %.

С помощта на Frequency Counter за проектирания честотен модулатор с вариак са измерени най-малката честота на девиацията 39,83 MHz и съответно - най-голямата 39,91 MHz като реализираната честотна девиация Δf е 80 kHz. Тя е по-широка от зададената поради избора на по-голямо изменение на капацитета на вариака $|\Delta D_V| = 2$ pF.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящата публикация представя особеностите на честотната модулация и методите за изграждане на честотните модулатори, широко използвани в радио-комуникационната апаратура.

Въз основа на проектиран високо-честотен LC генератор е предложен и е представена последователността за оразмеряване на схемния вариант на управляваща схема с вариак, която осигурява преобразуването му в честотен модулатор.

По аналогичен начин биха могли да бъдат проектирани и реализирани и други схеми на честотни модулатори, а също така и на други схеми, широко използвани в практиката.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Златаров В., Куцаров Ст. и др. Наръчник по електронни схеми, том 3, Усилватели. Издателство „Техника“, София, 1981.
- [2] Манолов Ст., Тихчев Хр. Наръчник по електронни схеми, том 4, Генератори. Издателство „Техника“, София, 1982.
- [3] Немигенчев И., Карапнев Б. Комуникационни преобразователни устройства. Университетско издателство „Васил Априлов“, Габрово, 2007.
- [4] Багачов В. Транзисторни усилватели на мощност. Издателство „Техника“, София, 1982.
- [5] www.farnell.com/datasheets/956045.pdf