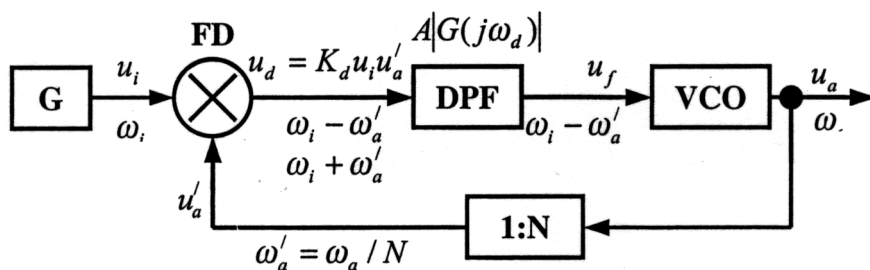


FÁZOVÝ ZÁVES PLL (Phase Locked Loop)



Obr.1 Bloková schéma PLL

Aplikácie PLL

- frekvenčná syntéza,
modemy,
- frekvenčné dekodéry a prijímače FSK (Frequency Shift Keying),
- demodulátory M-PSK,
- atď.

Štruktúra PLL

Zodpovedá známej štruktúre regulačného obvodu s tým, že v porovnávacom bode (zmiešavacie miesto) sa porovnávajú fázy (argumenty dvoch signálov).

PLL vyrovnáva malý rozdiel medzi frekvenciami vstupného a výstupného signálu, to znamená, že sa vyrovnáva frekvencia porovnávaného signálu ω'_a na hodnotu vstupného (referenčného) signálu ω_i . Frekvencia porovnávaného signálu je priamo frekvencia výstupného signálu, alebo je definovaná podielom $\omega'_a = \omega_o / N$, ak medzi VCO a FD je zaradený delič frekvencie.

Chybový signál u_f , potrebný pre činnosť regulačného obvodu sa získa pomocou fázového detektora a rozdielu fáz $\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi'_a$ medzi referenčným a porovnávaným signálom. Fázový detektor pracuje ako násobička (analogová násobička pri APLL, hradlo AND, preklápací obvod a pod. pri DPLL). Na výstupe FD vzniká chybový signál, ktorý ovplyvňuje frekvenciu oscilátora (VCO, CCO) tak, aby sa rozdiel frekvencií medzi referenčným a porovnávaným signálom vyrovnal.

Činnosť PLL

Predpokladajme, že referenčný aj porovnávaný signál sú harmonické signály a obmedzíme sa na PLL s anológovou násobičkou. Činnosť zapojenia na obr. 1 bude nasledovná:

- 1) Bez vstupného signálu chybový signál sa rovná nule, pretože výstupný signál FD je súčin $u_d = K_d u_i u_a'$. VCO generuje signál s voľnobežnou kruhovou frekvenciou ω_o .
- 2) Po pripojení vstupného (referenčného) signálu FD porovnáva jeho frekvenciu ω_i a fázu φ_i s porovnávaným signálom. Pri nesúlase vznikne na výstupe FD napätie u_d . Pretože výstupné napätie je súčinom u_i a u_a' , obsahuje zložky s frekvenciami $(\omega_i - \omega_a')$ a $(\omega_i + \omega_a')$. Súčtová zložka sa potlačí pomocou DPF, rozdielová zložka sa zosilní a slúži ako regulačný signál na riadenie frekvencie VCO. Frekvencia VCO sa mení tak, aby $(\omega_i - \omega_a') \rightarrow 0$.

Ak sú frekvencie vstupného a porovnávaného signálu veľmi rozdielne, potom súčtová aj rozdielová zložka sú mimo pásma prepúšťania DPF a preto na VCO pôsobí veľmi malé regulačné napätie $u_f \rightarrow 0$. VCO generuje signál s voľnobežnou kruhovou frekvenciou ω_o . Keď sa však obidve kruhové frekvencie vzájomne približujú, rozdielová frekvencia vstúpi do pásma prepúšťania DPF a PLL sa dostáva do synchronizovaného stavu (tzv. „zachytenie“ alebo „zavesenie“ PLL). Na výstupe DPF vzniká chybové napätie u_f , ktoré zmení frekvenciu VCO natoľko, aby rozdiel $(\omega_i - \omega_a') = 0$. Oblasť „zachytenia“ PLL (tzv. oblasť aktívnej synchronizácie) sa zväčší, ak rozšírime pásmo prepúšťania DPF.

Oblasť „udržania“ (tzv. oblasť pasívnej synchronizácie) PLL nezávisí od šírky pásma DPF, ale závisí od amplitúdy chybového napätia u_f , ako aj realizovateľnej zmeny frekvencie (regulačného rozsahu) VCO.

Vlastnosti kvázilineárneho systému PLL

V ustálenom stave sa na PLL možno pozerat' ako na lineárnu spätnoväzbovú sústavu (regulačnú slučku). Keď sú vstupné aj výstupné napätia harmonické, napätie na výstupe lineárneho fázového detektora pre $u_a = u_a'$ (platí pre deliaci pomer $N=1$)

$$\begin{aligned} u_d &= K_d U_{im} U_{am}' \sin(\omega_i t) \sin(\omega_a' t + \varphi_a) = \\ &= \frac{K_d U_{im} U_{am}}{2} \{ \cos[(\omega_i - \omega_a')t - \varphi_a] - \cos[(\omega_i + \omega_a')t + \varphi_a] \} \end{aligned} \quad (1)$$

Ak hraničná frekvencia DPF je podstatne menšia ako súčtová frekvencia, druhý člen vo výraze (1) možno zanedbať.

Chybové napätie bude:

$$\begin{aligned} u_f &\cong A \cdot K_d \frac{U_{im} U_{am}}{2} \left| G[j(\omega_i - \omega'_a)] \right| \cos[(\omega_i - \omega'_a)t - \varphi_a] = \\ &= A \cdot K_d \frac{U_{im} U_{am}}{2} \left| G[j(\omega_i - \omega'_a)] \right| \cos \varphi(t) \end{aligned} \quad (2)$$

kde $\varphi(t)$ predstavuje fázový posun medzi u_i a u_a (u'_a)

Frekvencia VCO v okolí pracovného bodu lineárne závisí od chybového napätia u_f , presnejšie od strednej hodnoty napätia u_f počas jednej periódy $T_a = 2\pi / \omega_a$

Platí: $\omega_a = \omega_o + K_o \cdot U_{fs}$, kde ω_o je voľnobežná kruhová frekvencia VCO pri $U_{fs} = 0$

Oblasť „udržania“ (pasívnej synchronizácie) PLL

Táto oblasť vyjadruje v akom rozsahu zmien frekvencie vstupného signálu sa PLL udrží v synchronizme. V ustálenom stave pri konštantnej frekvencii vstupného signálu je fázový posun medzi napätiami u_i a u'_a konštantný (φ_a), pretože $u_i = u'_a$. Zo vzťahu (2) vyplýva:

$$u_f \cong \frac{A \cdot K_d}{2} U_{im} U_{am} \cos \varphi_a \quad (3)$$

Chybové napätie je teda jednosmerné a spôsobí odchýlku frekvencie VCO od voľnobežnej frekvencie o hodnotu: $\Delta f = f_a - f_o = f_i - f_o$. Ak použijeme riadiacu charakteristiku VCO: $\Delta \omega = \omega_a - \omega_o = K_o \cdot U_{fs}$, potom zo vzťahu (3) vypočítame pre $\cos \varphi_a = 1$ maximálnu odchýlku frekvencie:

$$\Delta \omega_U = \Delta \omega_P = \frac{A \cdot K_d \cdot K_o}{2} U_{im} U_{am} \quad (4)$$

Frekvencia VCO dokáže sledovať frekvenciu vstupného signálu v rozpätí $\omega_o \pm \Delta \omega_P$ iba za predpokladu, že obvod PLL bol predtým ustálený. Preto sa $2\Delta \omega_P$ (resp. $2\Delta f_P$) nazýva oblasť „udržania“ (pasívnej synchronizácie) systému PLL. Rozkladá sa symetricky okolo voľnobežnej frekvencie VCO a nezávisí od šírky pásma DPF.

Oblasť „zachytenia“ (aktívnej synchronizácie) PLL

Je to najväčší rozdiel frekvencií $|\omega_i - \omega_o|$, ktorý sa nesmie dosiahnuť, ak sa má PLL ešte dostať do synchronizmu. Veľmi závisí od šírky pásma DPF, nezávisí od oblasti „udržania“ a je vždy menší (nanajvýš rovnako veľký) ako oblasť „udržania“. Veľkosť oblasti aktívnej synchronizácie možno približne vypočítať na základe nasledujúcich úvah:

Ak odpojíme vstup VCO, jeho generovaný signál má frekvenciu $f_a = f_o$. Chybové napätie, ktoré pri uzavretej slučke riadi VCO, má podľa (2) maximálnu hodnotu:

$$U_{fm} = A \cdot K_d \frac{U_{im} U_{am}}{2} |G[j(\omega_i - \omega'_a)]|$$

Toto napätie by zmenilo frekvenciu VCO o hodnotu:

$$\Delta\omega^* = K_o \cdot U_{fm} = K_o \cdot A \cdot K_d \frac{U_{im} U_{am}}{2} |G[j(\omega_i - \omega'_a)]|$$

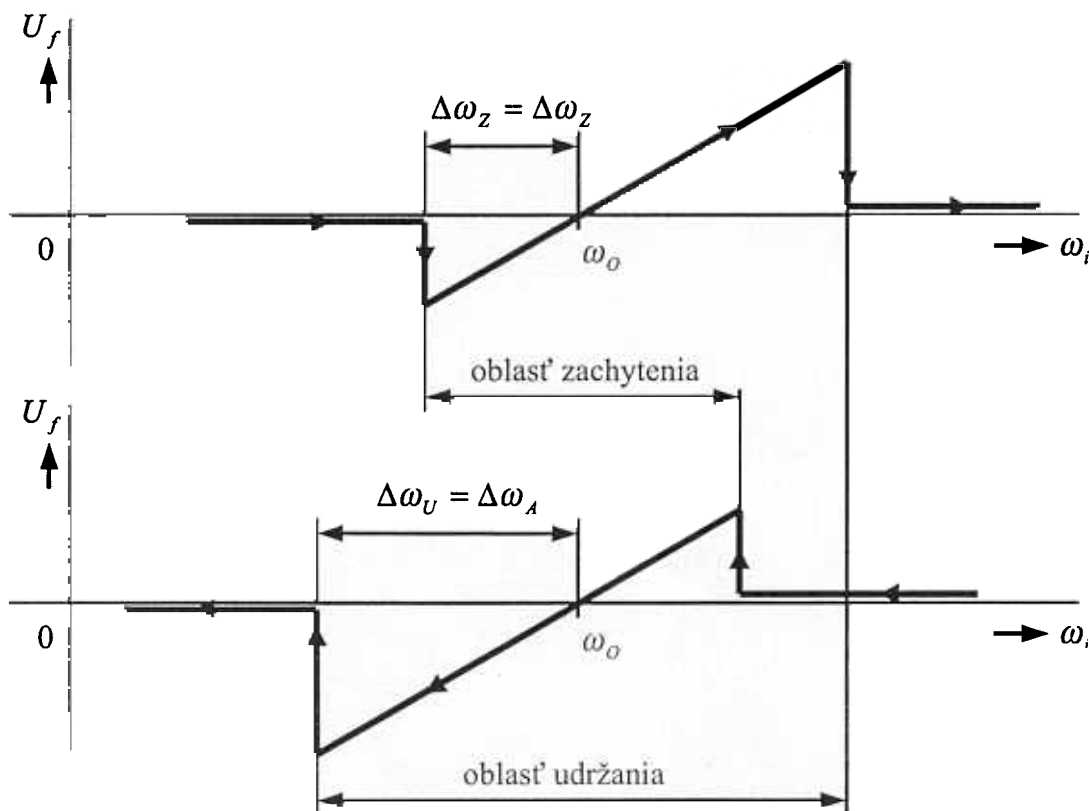
Na výstupe fázového detektora by potom bola kruhová frekvencia:

$$\omega_i - \omega'_a = \omega_i - \omega_o \pm \Delta\omega^*.$$

Z toho dostaneme maximálnu oblasť „zachytenia“ systému PLL v lineárnom režime:

$$2\Delta\omega_z = 2\Delta\omega_A \cong 2\Delta\omega^* \cong K_o \cdot K_d \cdot A \cdot U_{im} U_{am} |G(j\Delta\omega_z)|$$

Správanie sa PLL vzhľadom na oblasť „udržania“ a „zachytenia“ je znázornené na obr. 2.



Obr. 2 Synchronizačné oblasti PLL

Použitie PLL

Monolitické obvody PLL pracujú vo veľmi širokom frekvenčnom rozsahu (od 0,01 Hz až do niekoľko GHz).

Demodulátor FM

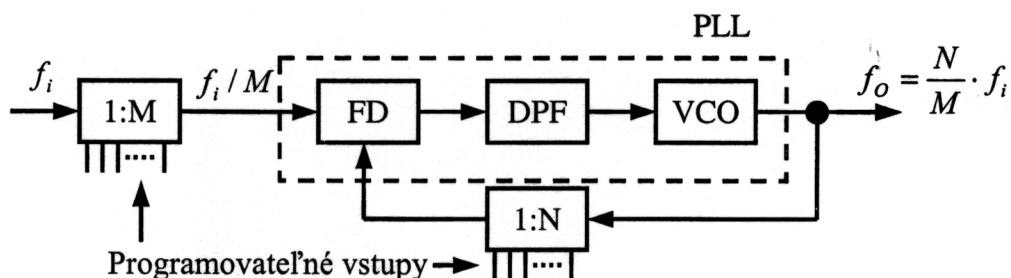
Obvod PLL sa môže použiť na demoduláciu signálu FM, ak voľnobežná frekvencia VCO je blízka nosnej frekvencii. Frekvencia VCO potom sleduje frekvenciu vstupného signálu a chybové napätie u_f predstavuje demodulovaný signál. Linearita demodulátora je určená linearitou VCO.

Kľúčovaná frekvenčná modulácia FSK

Používa sa napr. pri prenose binárnych číslicových signálov po vedení (v modemoch), alebo pri zázname na magnetické média. Logické signály „0“ a „1“ sa často kódujú ako signály s dvoma rôznymi frekvenciami. Táto metóda sa nazýva FSK (Frequency Shift Keying – kľúčovanie frekvencie). PLL sa navrhne tak, aby voľnobežná frekvencia VCO ležala v strede medzi obidvoma používanými frekvenciami a aby sa systém mohol zasynchronizovať pri obidvoch týchto frekvenciách. Demodulované výstupné napätie u_f je úmerné jednej z týchto frekvencií. Napr. pri „1“ môže byť napätie u_f veľké a pri „0“ prakticky nulové. Chybové napätie u_f predstavuje potom demodulovaný binárny signál.

Frekvenčná syntéza

Pomocou PLL možno z veľmi presnej a vysoko stabilnej frekvencie referenčného signálu získať signály s diskretné odstupňovanými frekvenciami, ktoré majú rovnakú presnosť a stabilitu frekvencie ako referenčný signál. Princíp je znázornený na obr. 3.



Obr. 3 Bloková schéma frekvenčného syntetizátora s PLL

Výstup VCO je pripojený na vstup fázového detektora cez číslicovo programovateľný delič frekvencie s deliacim pomerom N . Pri správne pracujúcom obvode PLL je frekvencia výstupného signálu N -krát väčšia ako frekvencia vstupného signálu $f_a = N \cdot f_i$ (to platí ak $M=1$). Ďalším programovateľným deličom frekvencie s deliacim pomerom M možno získať zlomkový racionálny násobiteľ. Frekvencia výstupného signálu potom bude: $f_o = \frac{N}{M} f_i$

Frekvenčná synchronizácia

Stabilitu frekvencie VCO (alebo CCO) je možno udržať konštantnú pri veľmi vysokých frekvenciách iba s ťažkosťami. Systémom PLL ich možno stabilizovať pomocou referenčných signálov s podstatne nižšou a vysoko stabilnou frekvenciou.

Príkladmi takéhoto použitia PLL sú: bitová synchronizácia, generovanie farbonosného signálu alebo synchronizácia rozkladových obvodov vo FTVP.

Ďalšou oblasťou použitia PLL je napr.: „vzdvihnutie“ slabého signálu v šume („vyhľadanie signálu“), demodulácia AM signálov, fázová demodulácia a pod.

Synchronizácia v prírode a blofyzike

Za hranicami elektroniky je teória fázovej synchronizácie zaujímavá pre psychológov a biofyzikov, zvlášť pre tých, ktorí sa zaoberajú biologickými rytmami. Od istého času, neurológov a neurofyziológov zaujímajú elektrické mozgové rytmy, zvlášť tzv. α a β rytmy. Pri skúmaní týchto oscilácií pomocou elektroencefalografu sa ich pôsobenie prejavuje iba v štatistickej forme, v tvare kmitov (oscilácií) pri povrchu hlavy. Tento tvar závisí od synchronizácie radiálne orientovaných elektrických dipólov. Keď sa synchronizácia narušuje, napríklad pri excitácii mozgovej kôry, rytmické kmity na povrchu často miznú alebo sa stávajú nesynchronné. Analogické javy sa vyskytujú v systéme fázovej synchronizácie PLL. Počas epileptického záchvatu sa môžu normálne elektrické procesy v mozgu náhle prerušovať a vznikajú tak silné regulárne oscilácie impulzného tvaru, ktoré sú rytmicky synchronizované, akoby sa „spúšťali“ spoločným „synchronizátorom“ umiestneným hlboko v mozgu. Experimentálne skúmania mechanizmu fázovej synchronizácie tohto typu epileptických záchvatov viedli k dôležitým objavom ako mechanizmy mozgu riadia vedomie zdravých jedincov.

Ďalším orgánom biologických organizmov, v ktorom je neobyčajne dôležitá synchronná činnosť, je srdce. Najrozšírenejšou poruchou srdcového rytmu je *extrasystolický režim*, keď sa jednotlivé kmity zdajú vynechané alebo vypadnuté z normálneho rytmu srdca. Inokedy môžu série predčasných úderov vznikáť postupne s veľkou frekvenciou. Tento jav sa nazýva *paroxyzmálna tachykardia* a je analogický strate fázovej synchronizácie PLL, keď niekoľko cyklov „prekĺza“ jeden za druhým, skôr ako sa znova dosiahne synchronný stav.

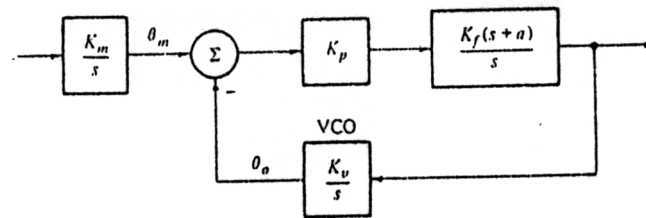


Figure 11.25 PLL used to demodulate an FM carrier. v_e is proportional to x_m from dc to a rad/s.

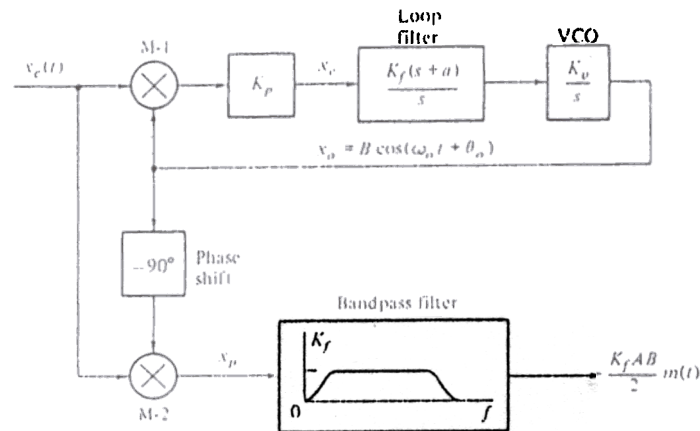


Figure 11.26 PLL used to demodulate an AM carrier. Two mixers (analog multipliers) are used. A 90° phase shift is required to recover $m(t)$.

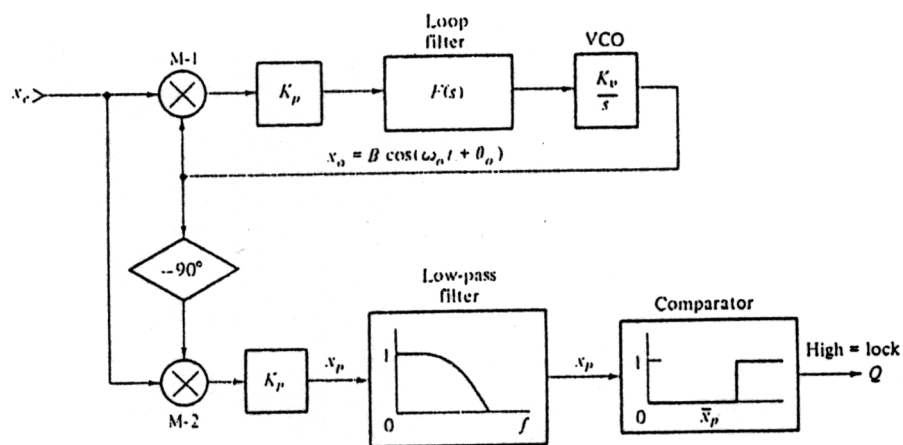


Figure 11.27 Lock detector. The average value of mixer M-2 output remains near zero until $\omega_o = \omega_c$ and $\theta_o \rightarrow \theta_c$. Then x_p rises, and the threshold detector output goes high, indicating lock.

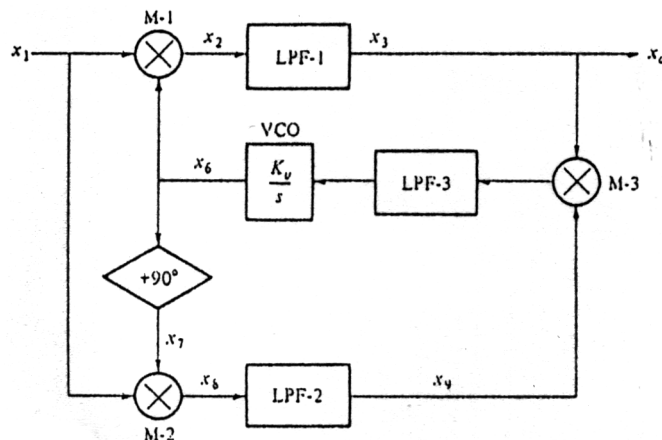


Figure 11.28 Costas PLL used to demodulate DSBSC-modulated carriers.

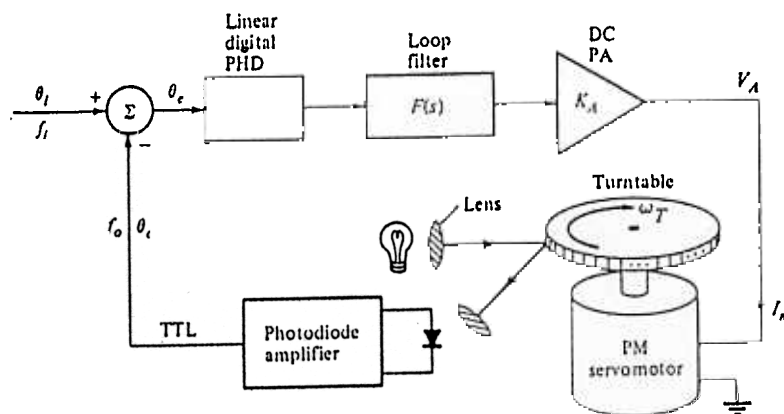


Figure 11.18 PLL phonograph motor speed control. The turntable edge has alternating black white markings which generate an output frequency, f_o , as the turntable rotates at its desired speed $\dot{\theta}_m$. A light and a photodiode are used to sense the moving edge markings.

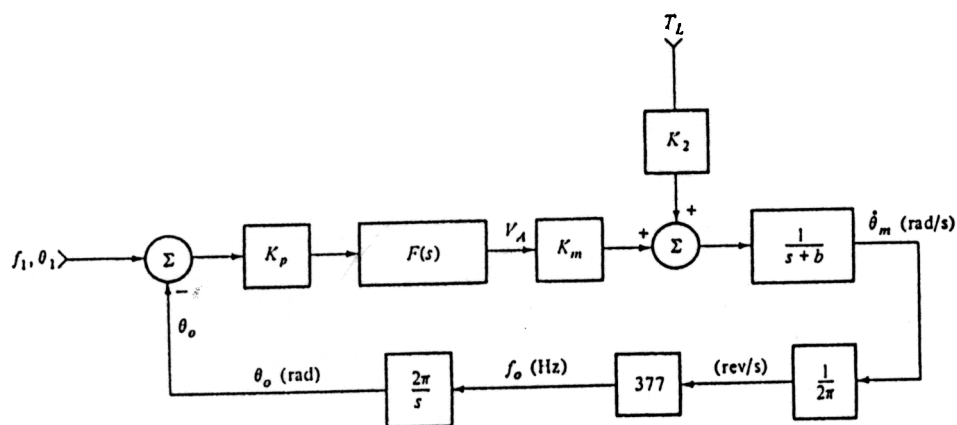


Figure 11.20 PLL motor speed control showing load torque. Turntable speed in revolutions per second must be multiplied by the number of black-white cycles on the turntable edge to give the phototransistor output frequency, f_o , in pulses per second. Integration of f_o and multiplication by 2π gives the phase of the tachometer output in radians.

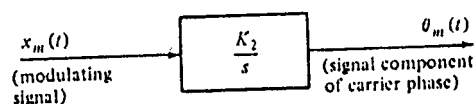


Figure 11.22 Relation of the FM carrier phase to the modulating signal.

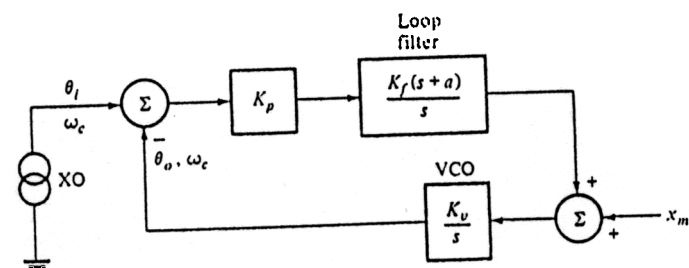


Figure 11.23 PLL, narrowband FM generation system. The low-frequency modulating signal, $x_m(t)$, is added to the output of the loop filter. At lock, the PLL tries to maintain zero phase error to the perturbations caused by x_m . Narrowband FM is widely used in police, military, and fire voice radio systems. XO = crystal oscillator.