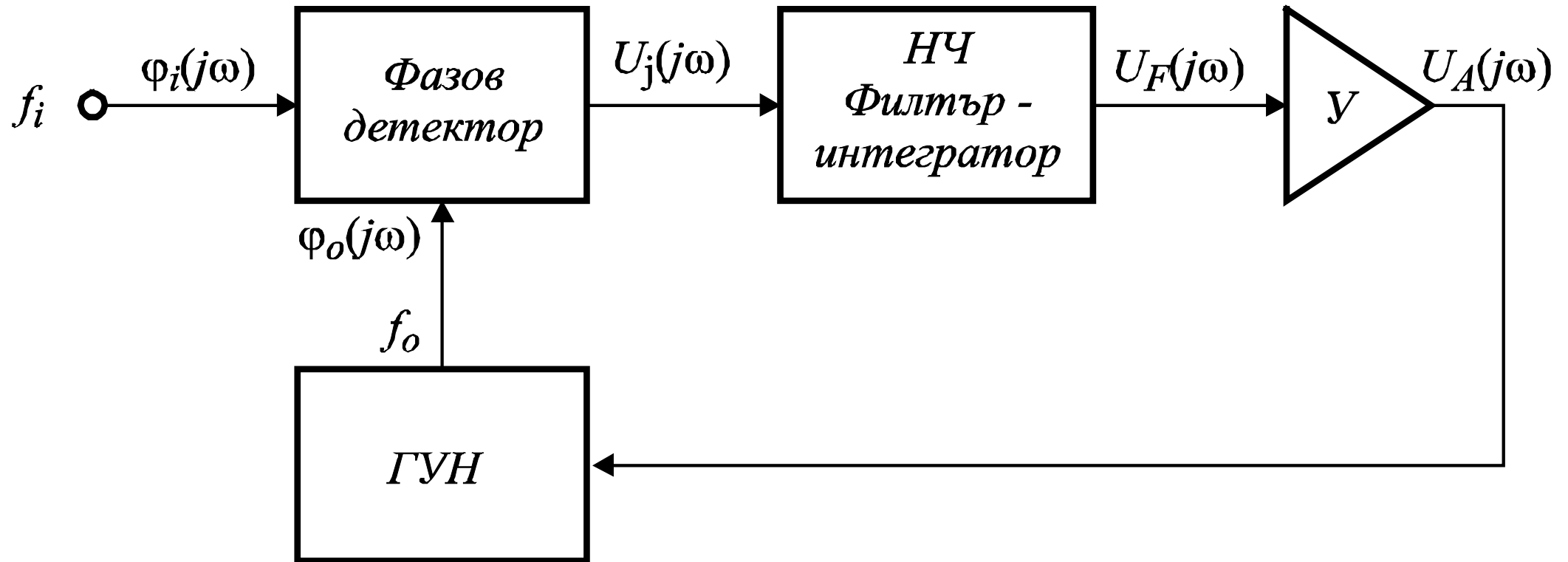


Фазово затворени вериги - PLL

Системите за фазова и честотна синхронизация намират голямо приложение в съвременните електронни устройства. Основен метод за постигането на синхронизация е методът за Фазово Автоматично Поддържане на Честота – ФАПЧ, основаващ се на фазова затворена верига (Phase Locked Loop – PLL).

Класическата схема на фазов синхронизатор PLL се състои от фазов детектор – ФД, нискочестотен филтър-интегратор – НЧФ, усилвател – У и генератор, управляван от напрежение – ГУН (Voltage Controlled Oscillator – VCO).

Фазово затворени вериги - PLL



Блокова схема на фазово затворена верига – PLL

Фазово затворени вериги - PLL

Фазовият детектор представлява устройство, което сравнява две честоти и формира изходен сигнал, пропорционален на тяхната фазова разлика. Едната честота е означена като входна с f_i , а другата – като изходна – с f_o . Фазите на двете сравнявани честоти могат да бъдат означени в комплексна форма съответно с $\varphi_i(j\omega)$ и $\varphi_o(j\omega)$. Изходното напрежение на фазовия детектор има вида

$$U_\varphi(j\omega) = K_\varphi [\varphi_i(j\omega) - \varphi_o(j\omega)],$$

където K_φ е коефициентът на предаване на фазовия детектор.

Фазово затворени вериги - PLL

Освен компонентата, пропорционална на фазовата разлика, напрежението в изхода на фазовия детектор съдържа и високочестотни компоненти, равни и кратни на сравняваните честоти. Предназначението на нискочестотния филтър е да подтисне тези високочестотни компоненти и да остави само съставната, пропорционална на фазовата разлика. Напрежението в изхода на филтъра се описва с уравнението

$$U_F(j\omega) = K_F(j\omega) \cdot U_\varphi(j\omega) = K_F(j\omega) \cdot K_\varphi [\varphi_i(j\omega) - \varphi_o(j\omega)],$$

където $K_F(j\omega)$ е комплексният коефициент на предаване на нискочестотния филтър (този коефициент е честотно зависим).

Фазово затворени вериги - PLL

Усилвателят усилва изходния сигнал от изхода на нискочестотния филтър и го подава към генератора, управляван от напрежение. Изходният сигнал от усилвателя се описва с уравнението

$$U_A(j\omega) = K_A \cdot U_F(j\omega) = K_A K_F(j\omega) \cdot K_\varphi [\varphi_i(j\omega) - \varphi_o(j\omega)],$$

където K_A е коефициентът на предаване на усилвателя. В много случаи при фазовите синхронизатори липсва усилвател и тогава $K_A = 1$.

Фазово затворени вериги - PLL

Генераторът, управляван от напрежение изработва на изхода си честотата $f_o(j\omega)$, която е пропорционална с някакъв коефициент на пропорционалност K_G на входящото в него напрежение, т.е. $f_o(j\omega) = K_G U_A(j\omega)$. Фазата и честотата в изхода на генератора са в интегрална зависимост, т.е. $\varphi_o(j\omega) = f_o(j\omega) / j\omega$. В комплексна форма тя има вида $\varphi_o = \int f_o dt$. Тогава изходното уравнение на генератора, управляван от напрежение, добива вида

$$\varphi_o(j\omega) = K_G \frac{U_A(j\omega)}{j\omega} = \frac{K_G K_A K_F(j\omega) \cdot K_\varphi [\varphi_i(j\omega) - \varphi_o(j\omega)]}{j\omega}.$$

Фазово затворени вериги - PLL

След преработка на уравнението се получава предавателната функция на затворената верига $H(j\omega)$:

$$\frac{\varphi_o(j\omega)}{\varphi_i(j\omega)} = H(j\omega) = \frac{K_G K_A K_\varphi K_F(j\omega)}{j\omega + K_G K_A K_\varphi K_F(j\omega)} = \frac{K_P(j\omega)}{1 + K_P(j\omega)}.$$

Пълният коефициент на предаване на фазово затворената верига е:

$$K_P(j\omega) = \frac{K_G}{j\omega} K_A K_\varphi K_F(j\omega).$$

Фазово затворени вериги - PLL

PLL се проектира по такъв начин, че затворената верига да е с отрицателна обратна връзка, което означава, че действието ѝ трябва да върви в посока на достигане и поддържане на определена фазова разлика (в частност нулева). Равенство на честотите е възможно само при постоянна фазова разлика между тях.

Съществува едно основно различие между обикновените системи за регулиране и фазово затворените вериги. В обикновените системи регулираната с помощта на обратна връзка величина съвпада с измерваната величина, от която се формира сигнал за корекция.

Фазово затворени вериги - PLL

При фазово затворените вериги се регулира честота, а се измерва фаза, поради което неизменно присъства едно постоянно интегриране, тъй като фазата представлява интеграл от честотата. Затова във фазово затворената верига съществува постоянно фазово изместване от 90° .

Присъстващият в затворената верига интегратор съществено влияе върху нейната работа. Той въвежда постоянен наклон от 20dB/dec в характеристиката на пълния коефициент на предаване. Ако вследствие на допълнителни фазови измествания наклонът на характеристиката в зоната на единичното усилване стане 40dB/dec , може да настъпи самовъзбуждане.

Фазово затворени вериги - PLL

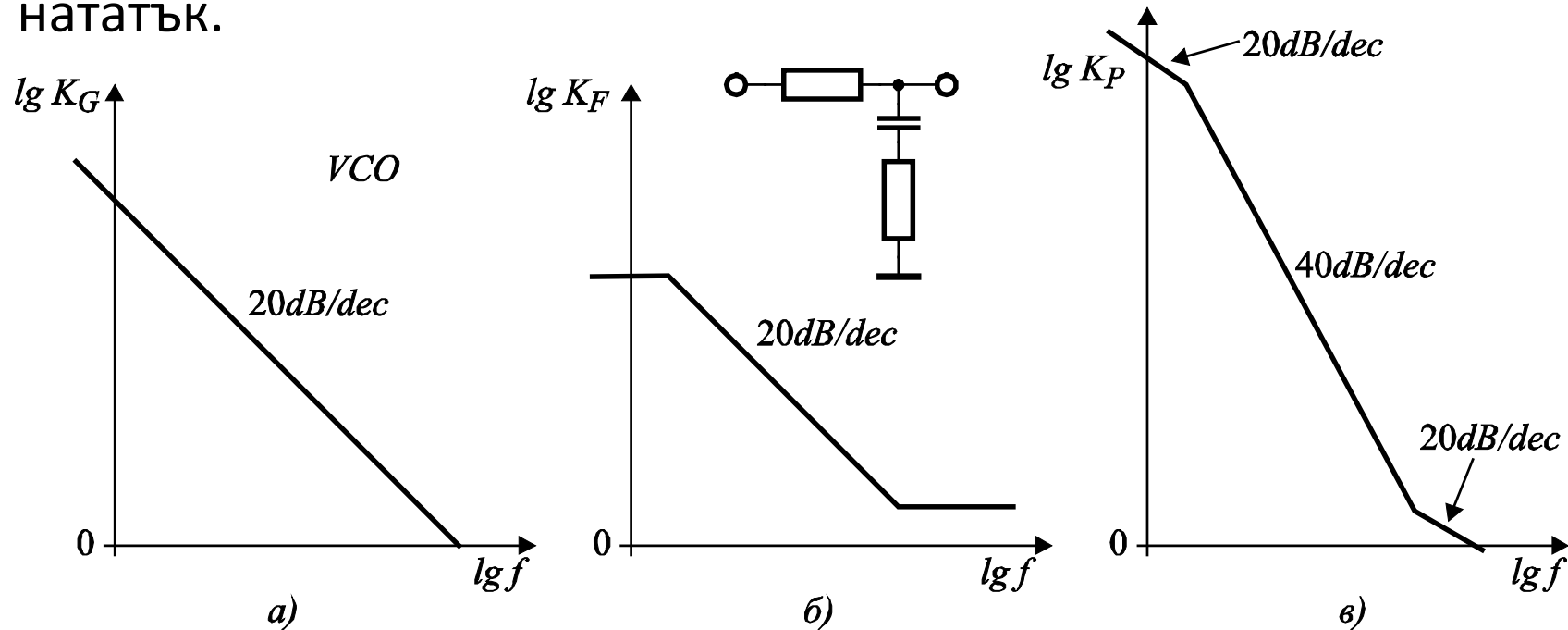
Най-простото решение за избягване на самовъзбуждането е в затворената верига да не се включват други компоненти, даващи допълнително фазово закъснение. Такива затворени вериги не съдържат нискочестотен филтър и се наричат „затворени вериги от първи ред“. В много случаи те са удобни, но не притежават свойството да изглаждат шумовете и флуктуациите на входния сигнал. Освен това те не могат да съхранят постоянно фазово съотношение между сравняваните честоти, тъй като изходът на фазовия детектор непосредствено управлява ГУН.

Фазово затворени вериги - PLL

Поставянето на допълнително интегриращо звено (нискочестотен филтър от първи ред) във фазово затворената верига изглажда пулсациите в изхода на фазовия детектор, а оттам и флуктуациите в изходната честота. Такива фазово затворени вериги се наричат „затворени вериги от втори ред“. Нискочестотният филтър от първи ред също въвежда постоянно фазово закъснение от 90° след честотата на среза. Това означава, че в характеристиката на общия коефициент на предаване на затворената верига се появява допълнителен наклон от 20 dB/dec.

Фазово затворени вериги - PLL

За да се осигури достатъчен запас от устойчивост, последователно на кондензатора в нискочестотния филтър от първи ред се включва резистор, чрез който спадът на характеристиката се преустановява от определена честота нататък.



Фазово затворени вериги - PLL

Така в пълната характеристика на коефициента на предаване на фазово затворената верига в областта на единичното усилване (пресичането на честотната ос) се осигурява наклон от 20 dB/dec.

На практика повечето от съществуващите фазово затворени вериги се изграждат от втори ред. Може да се изгради и верига от по-висок ред, съдържаща по-висок от първи ред нискочестотен филтър, но тогава трябва да се решават сериозни проблеми по осигуряването на устойчивостта.

Фазово затворени вериги - PLL

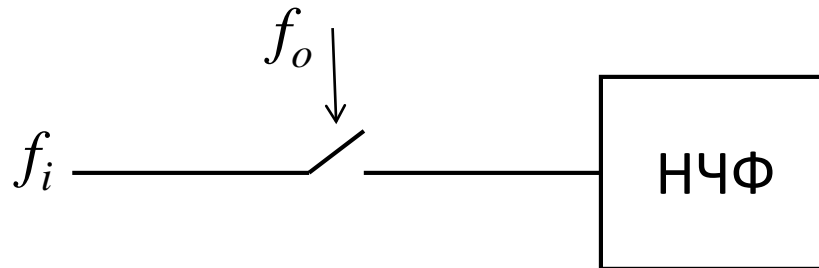
Съществуват множество видове фазови детектори. При избора на фазов детектор за практическо приложение трябва да се отчитат редица фактори:

- същността на входния сигнал. Фазови детектори с вход за синусоидално напрежение могат да бъдат неприложими за цифрови сигнали. Фазови детектори за цифрови регулярни сигнали могат да са неприложими за случайни входни величини и т.н.;

- линейността на предавателната характеристика на фазовия детектор;

Фазово затворени вериги - PLL

– диапазонът на фазовата и честотната разлика, за който предавателната характеристика е линейна. Колкото по-широк е този диапазон, толкова по-полезен е фазовият детектор и толкова по-защитен е той от смущения в сигнала.



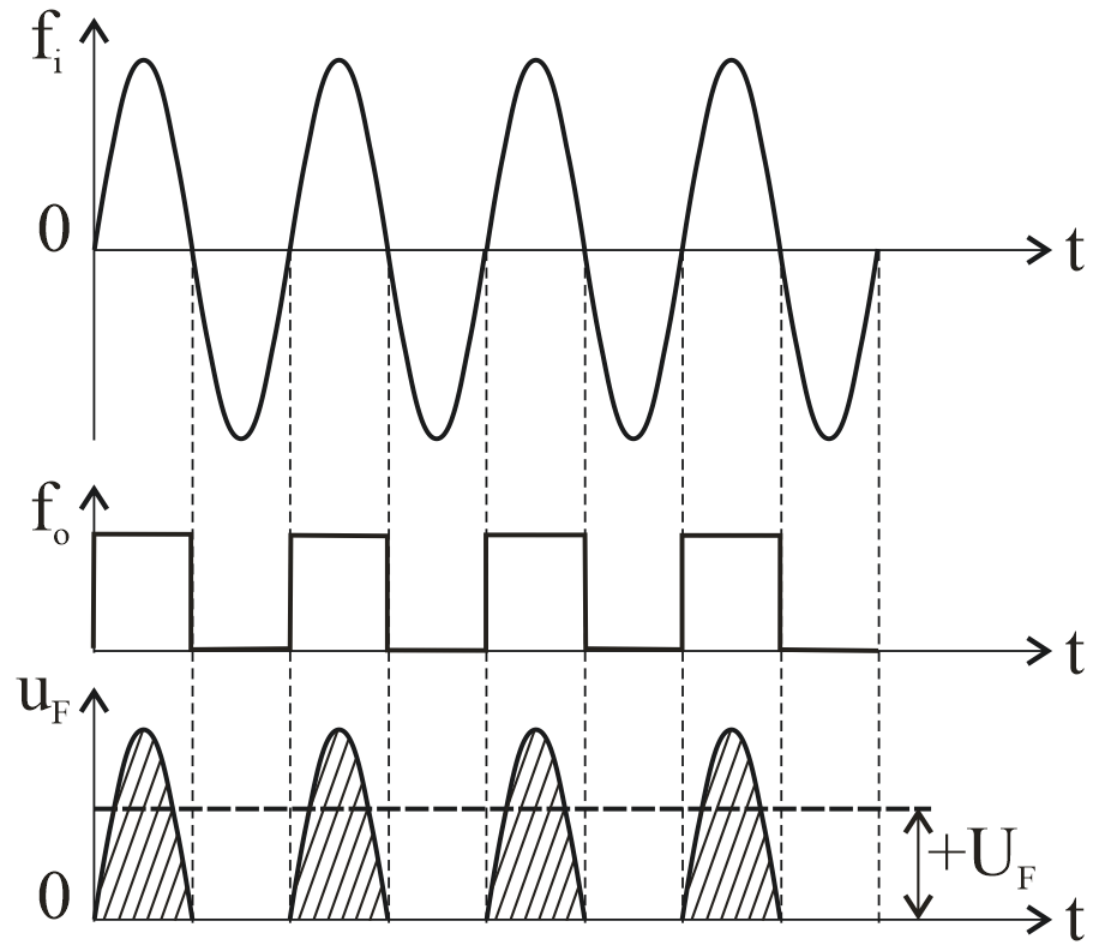
Аналогов фазов детектор

Фазово затворени вериги - PLL

В схемата на аналогов фазов детектор най-често се използва аналогов ключ, управляван с импулси с изходната честота f_o , които са формирани от изходното напрежение. На входа се подава напрежението с входната честота f_i . В зависимост от фазовата разлика между двата сигнала се изработва изходното напрежение на фазовия детектор. Коефициентът K_φ показва зависимостта *фазов ъгъл – напрежение*.

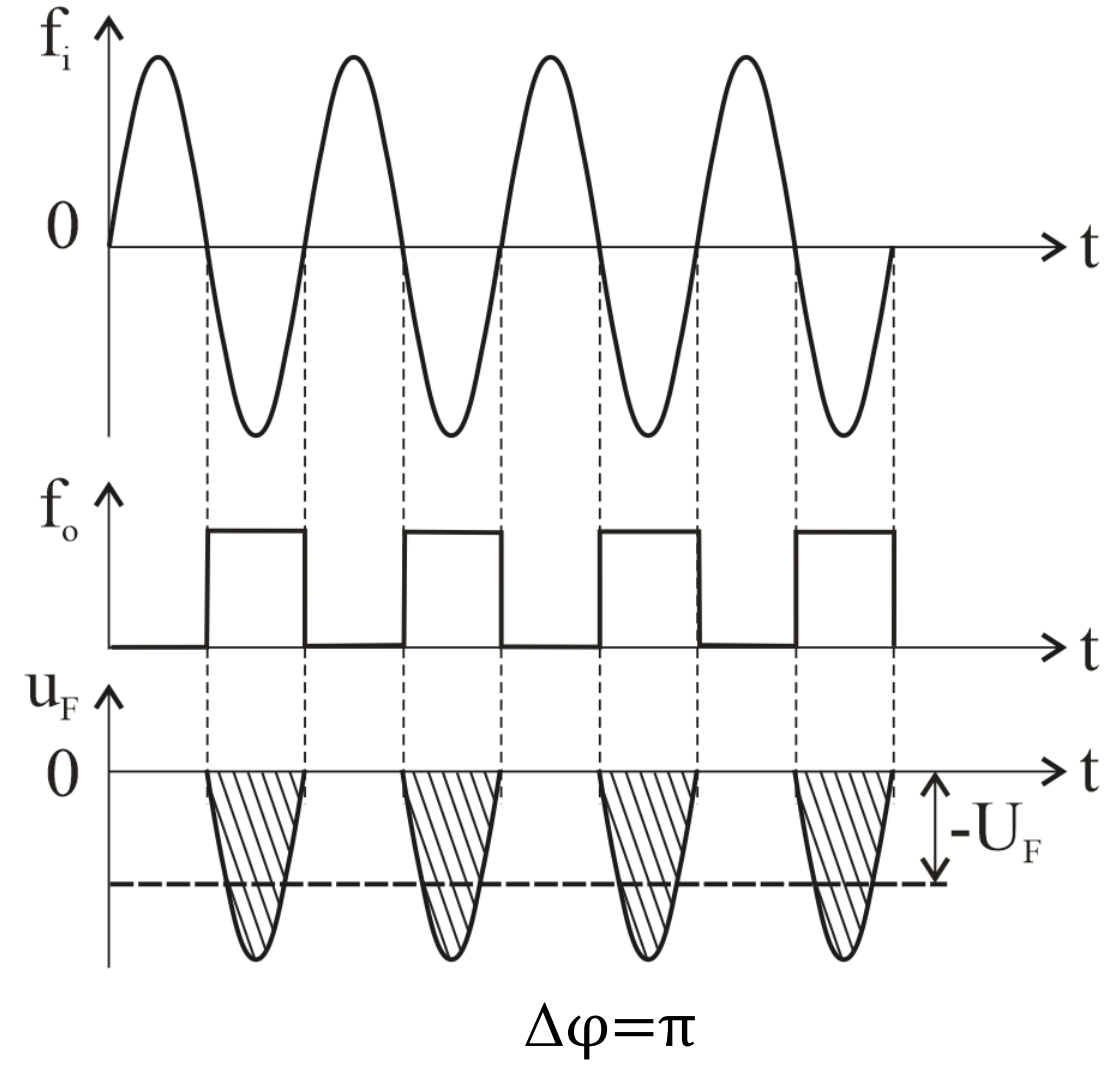
Тогава може да се запише $U_\varphi = K_\varphi(\varphi - \pi/2)$. Следователно управляващото напрежение за ГУН е $U_A = K_A K_F K_\varphi(\varphi - \pi/2)$.

Фазово затворени вериги - PLL

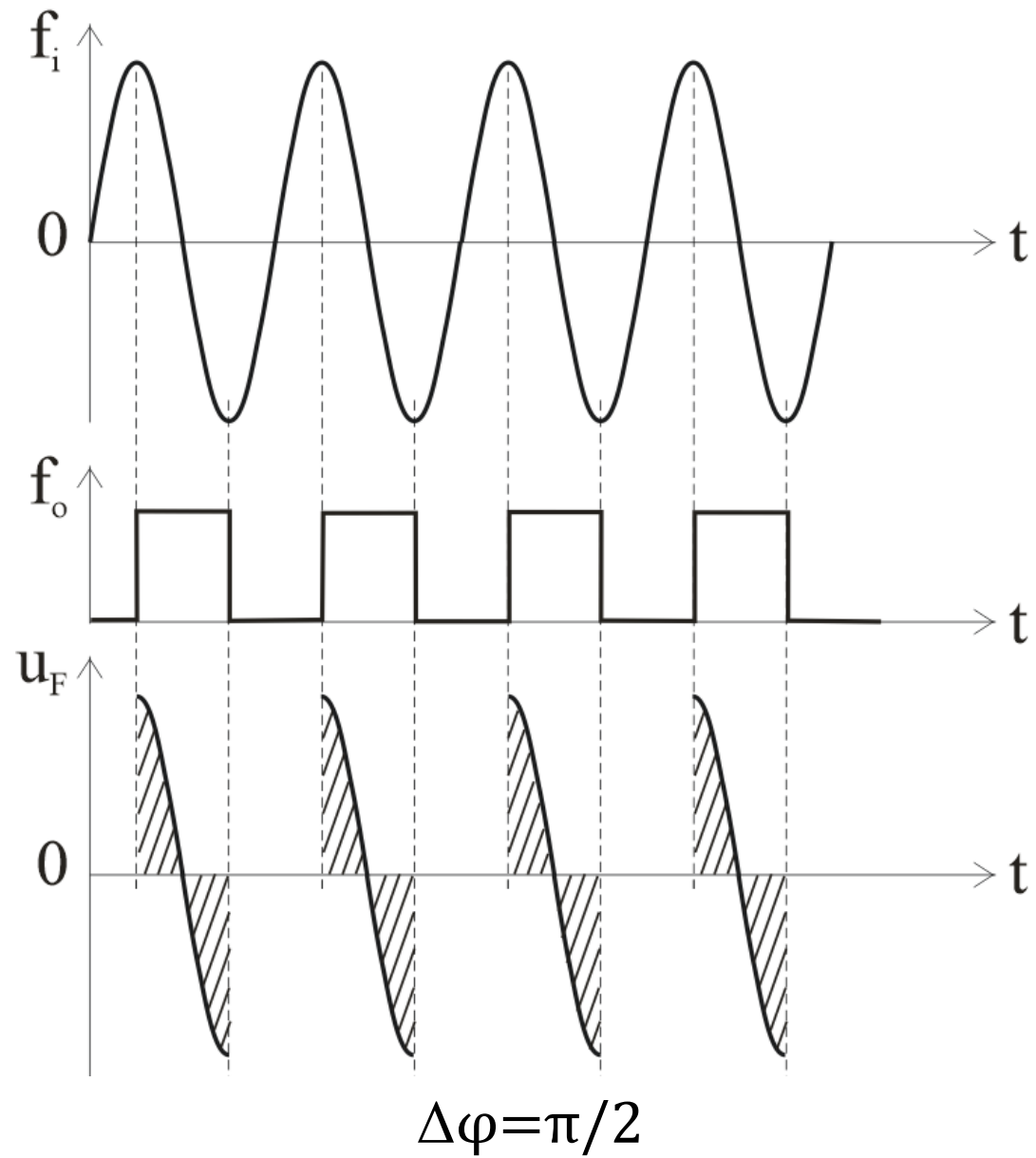


$$\Delta\varphi=0$$

Фазово затворени вериги - PLL



Фазово затворени вериги - PLL



Фазово затворени вериги - PLL

Максималната стойност на напрежението на фазовия детектор се получава при $\varphi=0$ и при $\varphi=\pi$. Следователно $U_{\varphi\max}=\pm K_{\varphi}(\pi/2)$. Тогава $U_{A\max}=\pm(\pi/2)K_A K_{\varphi}$. Изходната честота на ГУН е $f_o=f_0+K_G U_A$, където f_0 е честотата на свободно трептене на ГУН. При синхронизация с входната честота f_i може да се запише:

$$f_o=f_i=f_0+K_G U_A.$$

Фазовата разлика между напреженията на входа и изхода на фазовия детектор е $\varphi = (\pi/2)+(f_i - f_o)/K_G K_A K_{\varphi}$. Максималната стойност на изменението на честотата е $\Delta f=f_o-f_0 = \pm(\pi/2)K_G K_A K_{\varphi}$.

Фазово затворени вериги - PLL

Следователно максималният обхват на изменение на честотата, в който схемата за ФАПЧ може да остане синхронизирана е:

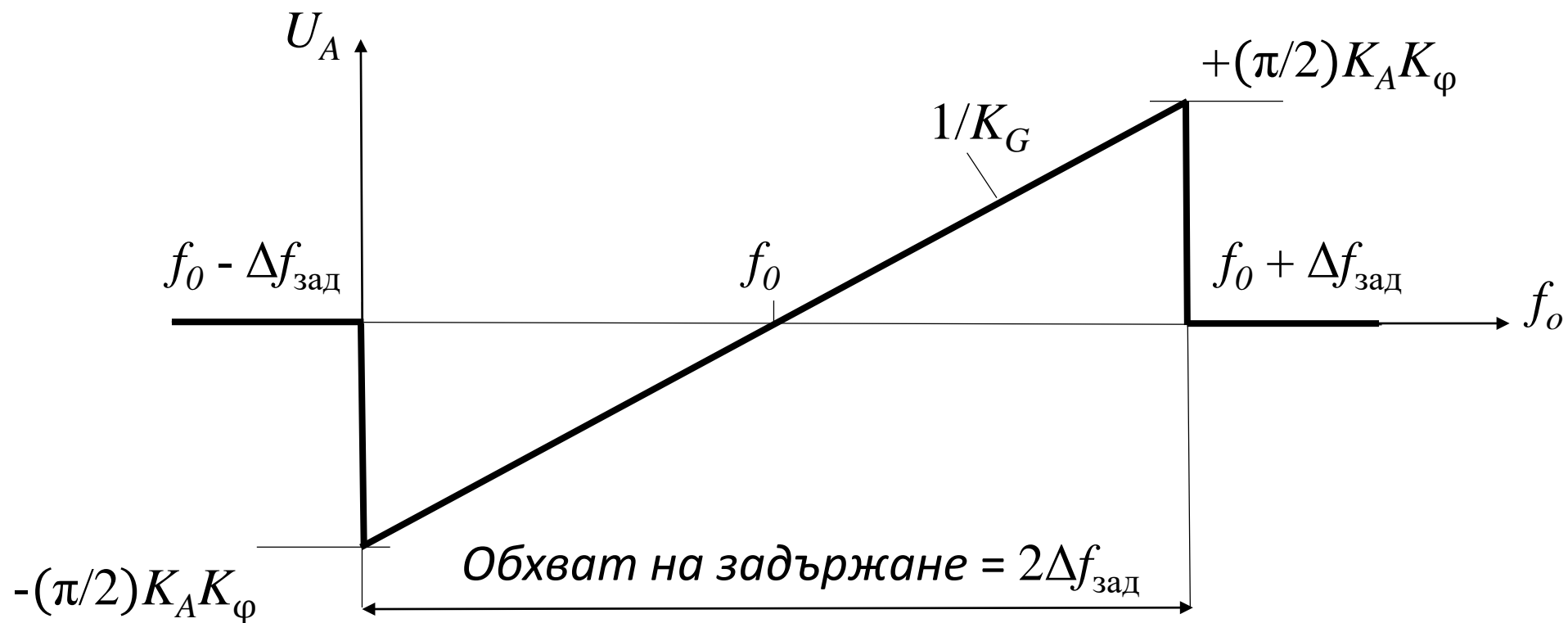
$$f_o = f_0 \pm (\pi/2)K_G K_A K_\varphi = f_0 \pm \Delta f_{\text{зад}}.$$

$\Delta f_{\text{зад}}$ се нарича обхват на задържане (обхват на следене), който може да се представи с израза:

$$\text{Обхват на задържане} = 2\Delta f_{\text{зад}} = K_G K_A K_\varphi \pi.$$

Този обхват е разположен симетрично спрямо честотата на свободно трептене на ГУН f_0 . Когато честотата f_i нарастне над f_0 , фазовият ъгъл нараства от 90° до 180° в горния край на обхвата на задържане, а в обратния случай – намалява.

Фазово затворени вериги - PLL



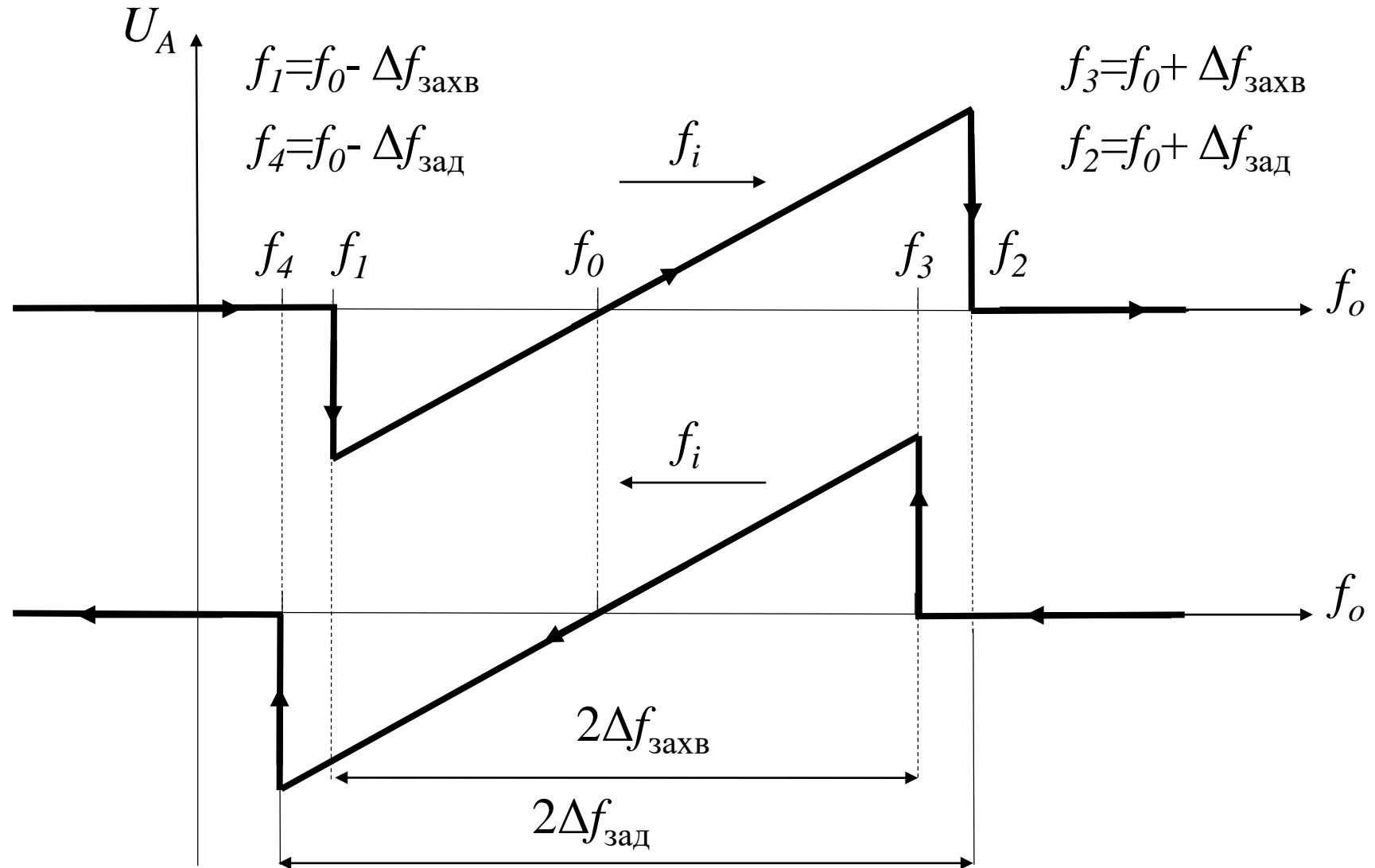
Фазово затворени вериги - PLL

Извън обхвата на задържане честотата на ГУН не може да бъде синхронизирана с входната честота. Скоростта на изменение на фазовия ъгъл е $d\varphi/dt \approx \Delta(2\pi f_i t - 2\pi f_o t)/\Delta t = \omega_i - \omega_o$. Следователно изходното напрежение на фазовия детектор ще се изменя много бързо и ще затихва много силно в НЧФ. В резултат на това ще се получи много малко управляващо напрежение за ГУН и неговата честота ще бъде практически равна на честотата на свободно трептене f_o . Така извън обхвата на задържане управляващото напрежение за ГУН практически ще бъде равно на нула.

Фазово затворени вериги - PLL

При нарастване на честотата до стойност f_1 схемата навлиза в *обхвата на захващане* и се синхронизира с входната честота f_i . Следователно с f_1 се означава долната граница на обхвата на захващане. При тази честота се наблюдава внезапен отрицателен скок на управляващото напрежение, с което се измества изходната честота f_o на ГУН. Ако честотата на сигнала все още се увеличава, схемата остава в обхвата на задържане до стойност f_2 , когато синхронизацията се губи. Така че честотата f_2 се нарича горна граница на обхвата на задържане. След f_2 схемата излиза от обхвата на задържане, управляващото напрежение пада до нула и честотата на ГУН става равна на свободната честота f_0 .

Фазово затворени вериги - PLL



Фазово затворени вериги - PLL

Ако честотата на сигнала постепенно намалява, схемата се синхронизира при честота f_3 и излиза от синхронизация при честота f_4 . Така f_3 се нарича горна граница на обхвата на захващане, а f_4 се нарича долна граница на обхвата на задържане. По този начин честотният диапазон между f_3 и f_1 се нарича обхват на захващане, а честотният диапазон между f_4 и f_2 се нарича обхват на задържане. Схемата за ФАПЧ не може да се синхронизира със сигнал извън обхвата на захващане, но след като веднъж е синхронизирана със сигнала, тя ще остане в това състояние докато честотата на сигнала е в обхвата на задържане.

Фазово затворени вериги - PLL

Полюсната честота на НЧФ е f_p . Ако е изпълнено условието $(f/f_p)^2 \gg 1$, тогава коефициентът на предаване на НЧФ може да се представи във функция на честотата $K_F(f) \approx 1/j(f/f_p) = f_p/jf$.

Основната честота на сигнала, която се подава от фазовия детектор към нискочестотния филтър е разликвата честота $\Delta f = f_i - f_o$. Ако е изпълнено условието $\Delta f > 3f_p$, предавателната функция на НЧФ може да се апроксимира с израза $K_F(\Delta f) \approx f_p/\Delta f = f_p/(f_i - f_o)$. Управляващото напрежение на ГУН е $U_A = U_\varphi K_F(f) K_A$, като максималната му стойност е:

$$U_{Amax} = K_\varphi(\pi/2)(f_p/\Delta f)K_A.$$

Фазово затворени вериги - PLL

В този случай максималната стойност на изменението на честотата на ГУН е:

$$(f - f_0)_{max} = K_G U_{Amax} \approx \pm K_G K_\varphi \frac{\pi}{2} K_A \frac{f_p}{\Delta f}.$$

Ако честотата на сигнала, за която трябва да се осъществи захващане се означава с f_i , и тази стойност се замести в горния израз, то максималният честотен обхват, в който може да се осъществи захващане е:

$$(f_i - f_0)_{max} \approx \pm K_G K_\varphi \frac{\pi}{2} K_A \frac{f_p}{\Delta f_{захв}} \approx \Delta f_{захв},$$

където $\Delta f_{захв} = (f_i - f_0)_{max}$.

Фазово затворени вериги - PLL

След преработване се получава:

$$(\Delta f_{\text{захв}})^2 \approx \pm K_G K_\varphi \frac{\pi}{2} K_A f_p.$$

Но тъй като $\Delta f_{\text{зад}} = K_G K_\varphi (\pi/2) K_A$, тогава $\Delta f_{\text{захв}}$ може да се изрази като

$$(\Delta f_{\text{захв}})^2 \approx f_p \Delta f_{\text{зад}}. \text{ Следователно } \Delta f_{\text{захв}} \approx \pm \sqrt{f_p \Delta f_{\text{зад}}}.$$

Пълният обхват на захващане се дава с израза:

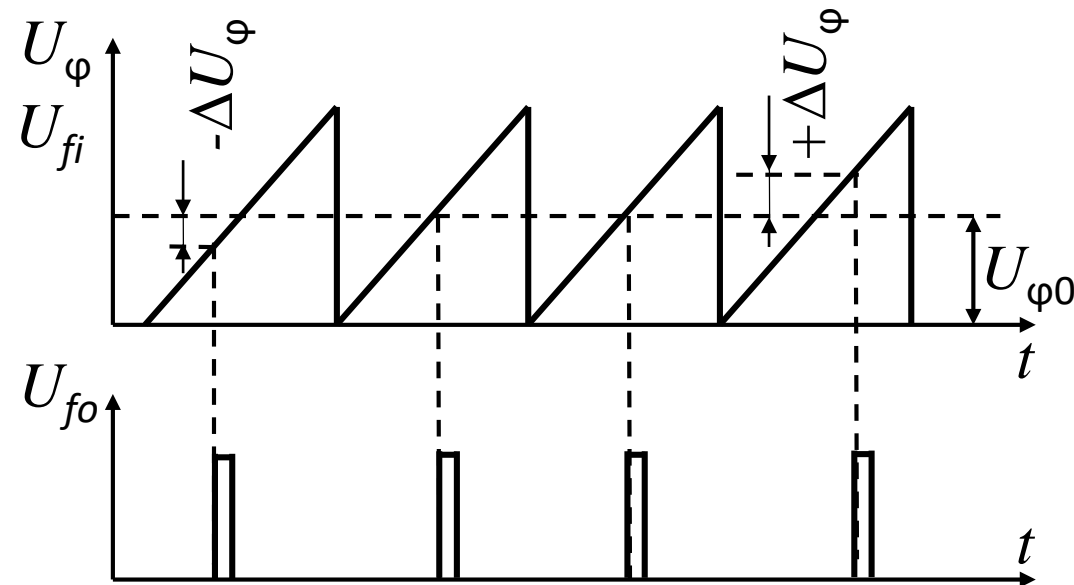
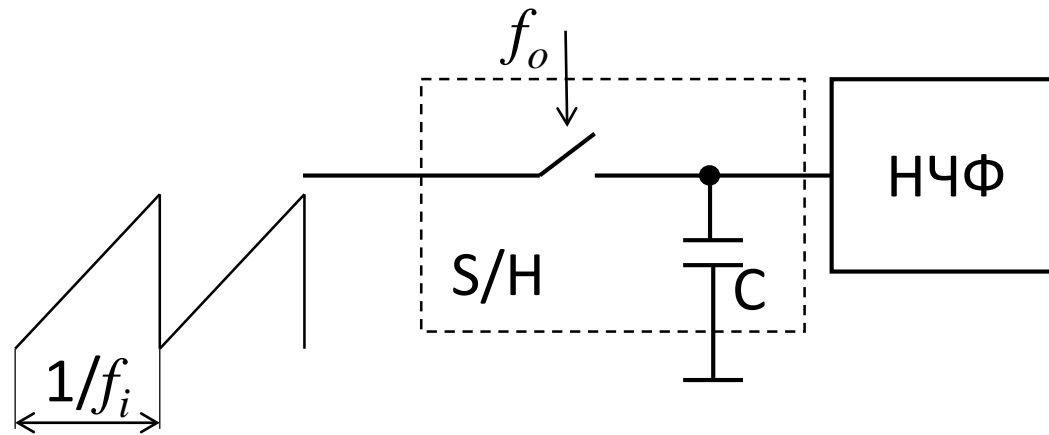
$$\text{Обхват на захващане} = 2\Delta f_{\text{захв}} \approx 2\sqrt{f_p \Delta f_{\text{зад}}}$$

Това е валидно когато $\Delta f_{\text{зад}} \gg f_p$.

Фазово затворени вериги - PLL

Много разпространена схема на аналогов фазов детектор е с използване на устройство следене-запомняне (S/H). На входа се подава линейно изменящо се напрежение с честота, равна на входната честота f_i . Генераторът на линейното напрежение трябва да има „нулев“ обратен ход. Амплитудата му трябва да отговаря на стойността, която е необходима при максималната фазова разлика. Аналоговият ключ на устройството следене-запомняне (S/H) се управлява от импулси с честота, равна на изходната честота f_o . Така запомнящият кондензатор C ще се зарежда винаги до напрежение, пропорционално на фазовата разлика между двете честоти.

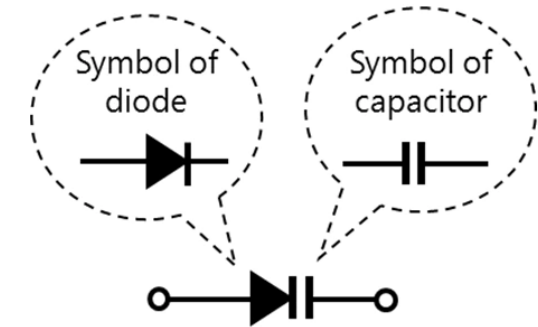
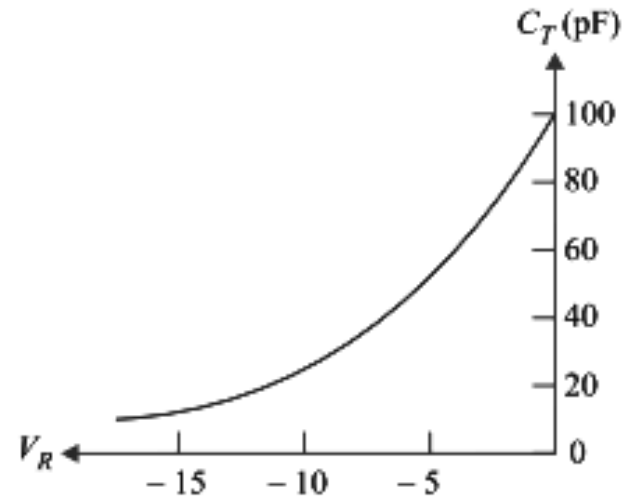
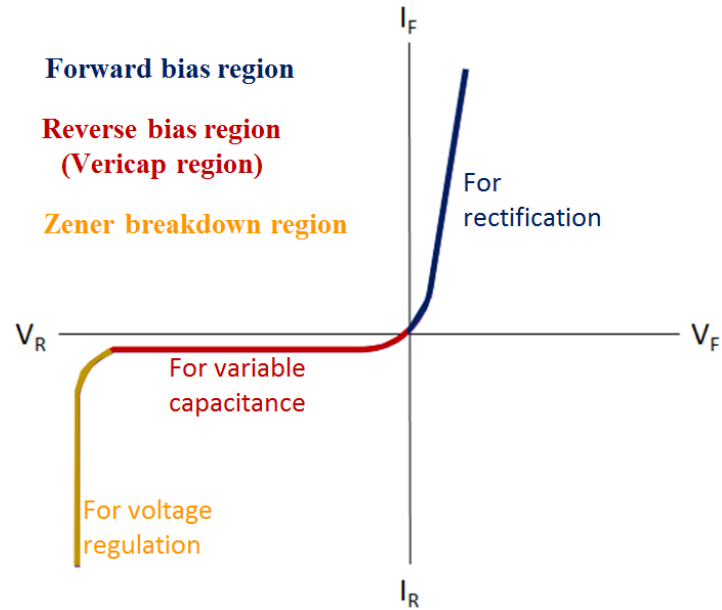
Фазово затворени вериги - PLL



Фазово затворени вериги - PLL

Генератор, управляван от напрежение може да се изгради с използването на различни методи. В класическите схеми на LC- и RC-генератори е необходимо да се въведе елемент, който променя своите свойства в следствие на приложеното външно напрежение. Най-често един кондензатор в схемата се заменя с варикап (варактор). Това е полупроводников диод, при който се използва зависимостта на бариерния капацитет на PN прехода от обратното напрежение. Практически варикапите се използват като кондензатори, чиято стойност се променя посредством изменение на подаваното напрежение.

Фазово затворени вериги - PLL



Characteristics	Symbol	Test Condition	Min	Typ.	Max	Unit
Reverse voltage	V_R	$I_R = 1 \mu\text{A}$	10	—	—	V
Reverse current	I_R	$V_R = 10 \text{ V}$	—	—	3	nA
Capacitance	C_{1V}	$V_R = 1 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$	44	—	49.5	pF
Capacitance	C_{6V}	$V_R = 6 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$	5.4	—	7.3	pF
Capacitance ratio	C_{1V} / C_{6V}	—	6.3	7.5	—	—
Series resistance	r_s	$V_R = 4 \text{ V}, f = 100 \text{ MHz}$	—	0.4	0.8	Ω

Параметри на варицап

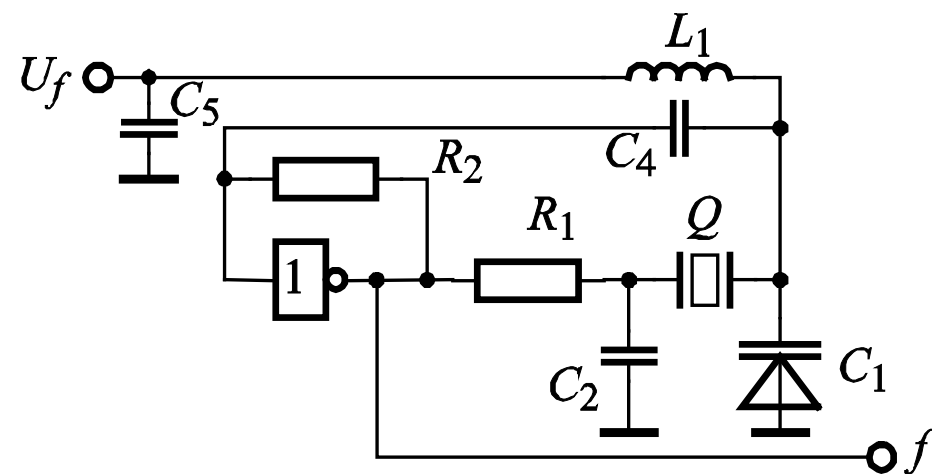
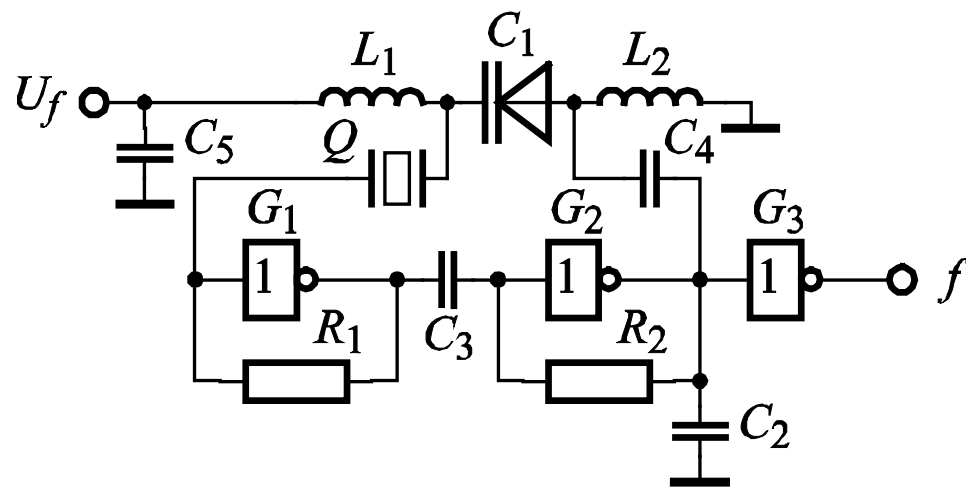
Фазово затворени вериги - PLL

Кварцовите генератори имат най-висока стабилност на честотата. Нейният диапазон на управление обаче е най-малък – около 0,1 %. Съществуват много различни схеми на кварцови генератори. При повечето от тях вместо донастройващ капацитет за кварцовия резонатор се използва варикап.

При замяната на донастройващия капацитет с варикапа са включени допълнителни елементи, осигуряващи разделяне на постояннотоковата верига за напрежението върху варикапа и високочестотната верига на осцилациите.

Фазово затворени вериги - PLL

Това се осигурява от индуктивностите L_1 , L_2 и капацитетите C_4 , C_5 . Индуктивностите трябва да имат високо съпротивление за честотата на осцилациите, а капацитетите – ниско. По тези схеми може да се достигне кратковременна нестабилност от порядъка на 10^{-3} .



Кварцовостабилизирани VCO с варикапно регулиране на честотата

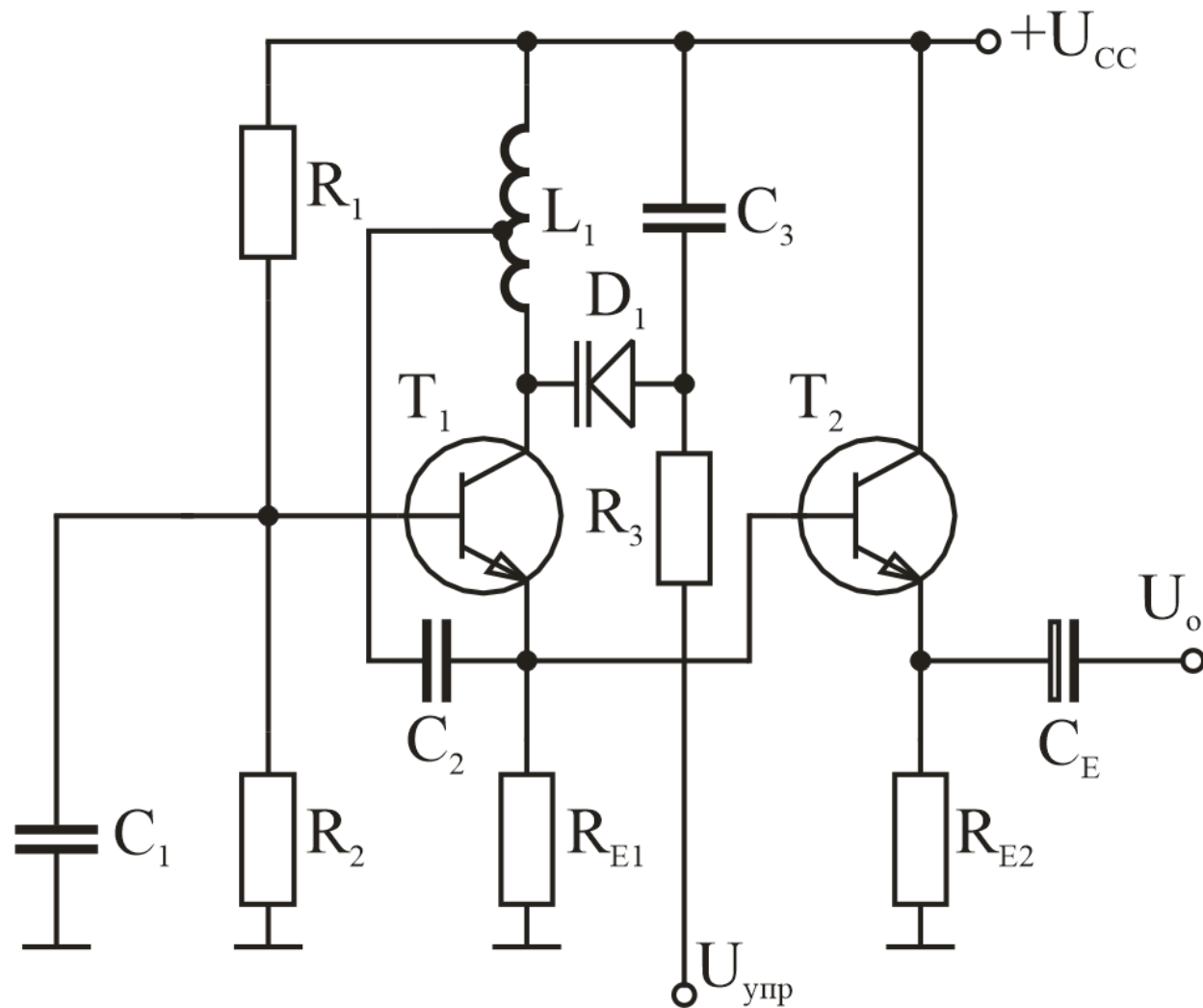
Фазово затворени вериги - PLL

За постигане на висока стабилност се изграждат генератори със сложна конструкция, при които кварцовият резонатор е термостатиран и с регулиране на температурата (постигнатата нестабилност за генерираната честота е от порядъка на 10^{-9}).

Съществуват готови интегрални кварцовостабилизирани генератори, управлявани от напрежение, като интегралната схема '624.

За широк диапазон на работа, се използват LC- и RC-генератори. LC-генераторите се прилагат при сравнително високи честоти на работа – над 30 MHz. За да се получи управление на честотата с напрежение, кондензаторът С се заменя с варикап, върху който се прилага управляващото напрежение.

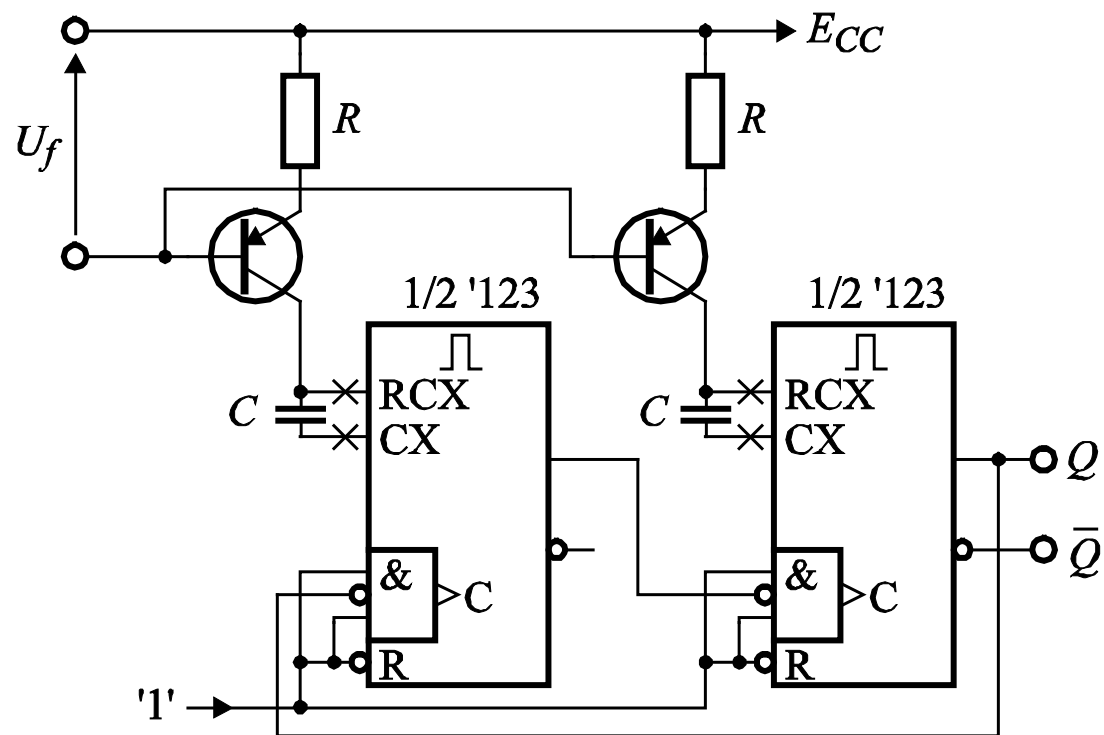
Фазово затворени вериги - PLL



LC-генератор, управляван с напрежение

Фазово затворени вериги - PLL

За работа при сравнително ниски честоти (до около 30 MHz) при изключително широк диапазон се използват RC-мултивибратори.



VCO, изграден на базата на два чакъла мултивибратори

Управляван от напрежение RC-генератор лесно може да се получи от последователното свързване на два чакъла мултивибратора. Това е стандартната схема, като резисторите във времезадаващите вериги са заменени с генератори на ток, управлявани от напрежение.

Фазово затворени вериги - PLL

Така продължителността на генерираните импулси се управлява от напрежение. В случая управляващото напрежение се подава между базите на транзисторите и захранващия проводник.

Съществува широк избор от интегрални схеми, представляващи управлявани от напрежение RC-мултивибратори, като например 566 на Signetics и National Semiconductors, XR2209 на Exar, 1658 на Motorola и др. Стабилните мултивибратори обикновено се изграждат чрез схеми с емитерна връзка. АЦП от типа преобразуватели напрежение в честота или напрежение в период също могат да се разглеждат и използват като генератори, управлявани от напрежение.

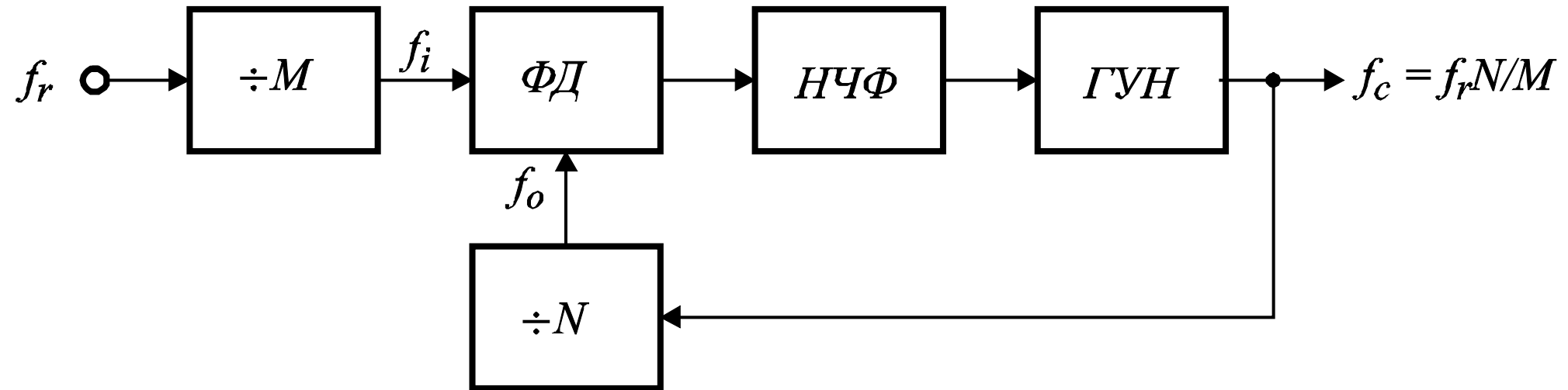
Фазово затворени вериги - PLL

Едно от основните приложения на системите за фазово автоматично поддържане на честота е за синтезиране на набор от стабилни честоти, различаващи се помежду си със строго определен коефициент. Синтезирането се извършва от една основна честота, като производните запазват нейната стабилност.

В основната блокова схема на честотен синтезатор с PLL двата предварителни програмируеми делителя с коефициенти съответно M и N са включени на пътя на сравняваните сигнали преди фазовия детектор. Тъй като системата се стреми да поддържа $f_i = f_o$, а $f_i = f_r/M$ и $f_o = f_c/N$, за честотата в изхода на генератора се получава $f_c = (N/M)f_r$.

Фазово затворени вериги - PLL

Променяйки N и M , от опорната честота f_r се получават различни честоти, при това със стабилността на f_r .



Обобщена блокова схема на честотен синтезатор