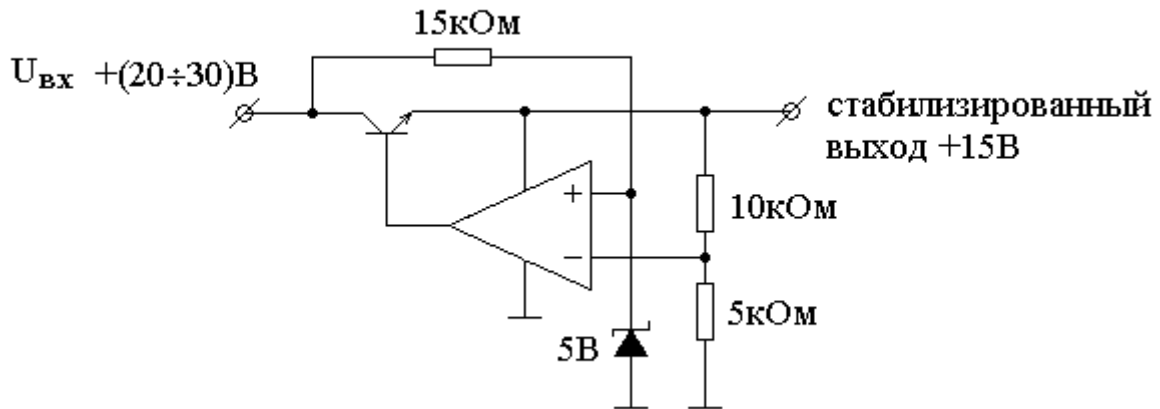
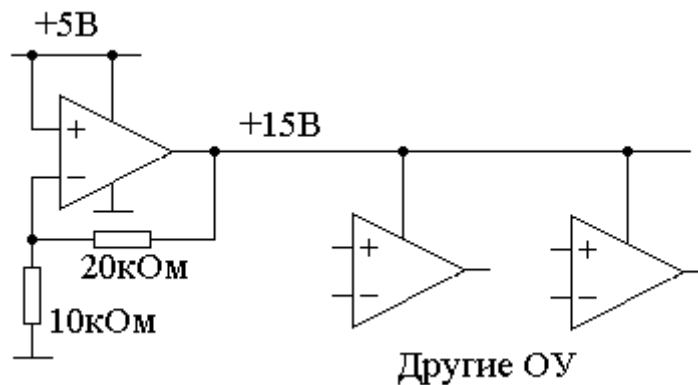


Негодные схемы (проверка).

Стабилизатор на 15В:



Операционный усилитель в качестве стабилизатора +15В:



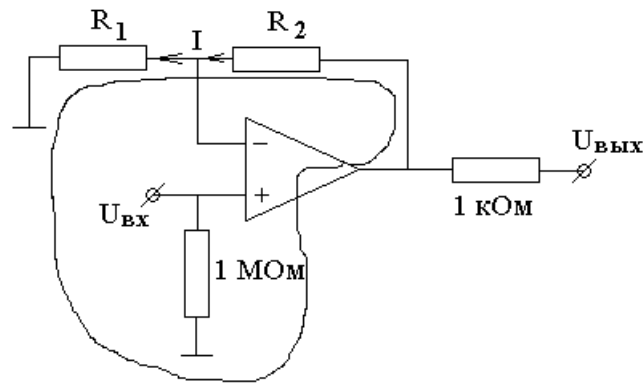
Электрические шумы (продолжение).

Малозумящие схемы. МДМ схемы усилителя низких частот, 140УД13.

Системы активной стабилизации.

Основные параметры системы стабилизации на примере стабилизации напряжения U_- на уровне напряжения U_+ в схеме усилителя напряжения на ОУ (операционном усилителе).

Проанализируем работу неинвертирующего усилителя напряжения на ОУ:



Плюс-вход ОУ соединен с общим проводом схемы через большое сопротивление 1 МОм, чтобы входные токи плюс-входа гарантированно могли достигнуть общего провода схемы.

Напряжение на входе схемы равно напряжению на плюс-входе ОУ $U_+ = U_{вх}$. С учетом равенства $U_- = U_+$ получаем $U_- = U_{вх}$.

Напряжение минус-входа ОУ приложено к резистору сопротивлением R_1 . Тогда сила тока через этот резистор

$$I = \frac{U_-}{R_1} = \frac{U_{вх}}{R_1}.$$

Ток минус входа ОУ пренебрежимо мал. Тогда весь ток $I = \frac{U_{вх}}{R_1}$

протекает через резистор сопротивлением R_2 . При этом падение напряжения на обоих резисторах равно напряжению на выходе ОУ:

$$U_{вых} = (R_1 + R_2)I = (R_1 + R_2) \frac{U_{вх}}{R_1} \quad \Rightarrow$$

$$U_{вых} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{вх}.$$

Отношение напряжений на выходе и на входе схемы по определению равно коэффициенту передачи схемы по напряжению:

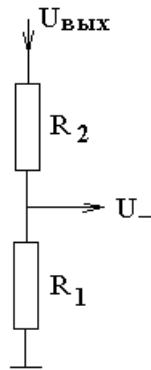
$$K_U \equiv \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

Теперь проанализируем работу того же усилителя, как системы стабилизации.

ОУ многократно усиливает разность напряжений на плюс и минус входах:

$U_{вых} = \alpha(U_+ - U_-)$, где $\alpha \approx 10^6$ — коэффициент передачи ОУ со входа на ВЫХОД.

Часть напряжения с выхода ОУ с делителя напряжения, собранного на сопротивлениях R_2 и R_1 , поступает на минус-вход ОУ в качестве сигнала отрицательной обратной связи:



С выхода на минус-вход поступает часть напряжения $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$. Тогда

$U_- = \beta U_{\text{вых}}$. Величину β называют коэффициентом передачи с выхода на минус-вход.

Произведение коэффициентов передачи со входа на выход и с выхода на минус-вход называют коэффициентом передачи петли обратной связи:

$$K_0 \equiv \alpha\beta,$$

где индекс 0 — это намек на петлю.

Подставим в формулу $U_- = \beta U_{\text{вых}}$ выражение $U_{\text{вых}} = \alpha(U_+ - U_-)$ и получим:

$$U_- = \alpha\beta(U_+ - U_-) = K_0(U_+ - U_-) \quad \Rightarrow \quad U_- = K_0(U_+ - U_-) \quad \Rightarrow$$

$$U_- = \frac{K_0}{1 + K_0} U_+ \quad \Rightarrow \quad U_+ - U_- = \frac{1}{1 + K_0} U_+ \quad \Rightarrow$$

$$U_+ - U_- = \frac{1}{1 + K_0} U_{\text{ex}}.$$

Здесь $U_+ - U_-$ — неотслеженная часть входного возмущения U_{ex} системы. Эту неотслеженную часть называют сигналом ошибки системы стабилизации.

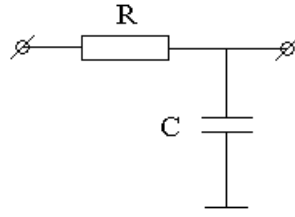
Относительная неотслеженная часть входного возмущения:

$$\varepsilon \equiv \frac{U_+ - U_-}{U_{\text{ex}}} = \frac{1}{1 + K_0}.$$

Тогда

$1 + K_0$ — коэффициент стабилизации системы с обратной связью.

Коэффициент передачи \tilde{K}_0 может быть комплексной величиной. Так, например, коэффициент передачи RC-цепочки:



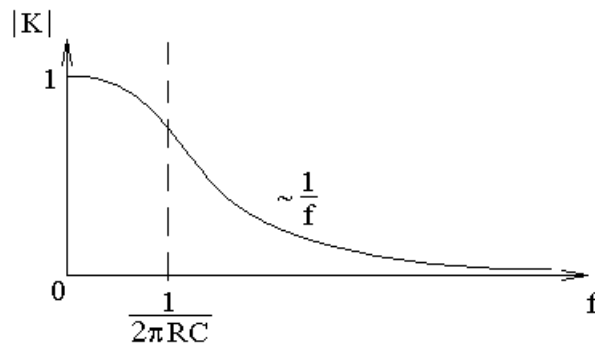
$$\tilde{K} = \frac{1}{R + \frac{1}{i\omega C}} = \frac{1}{1 + i\omega RC}.$$

Здесь $\omega = 2\pi f$, где f — частота изменения напряжения.

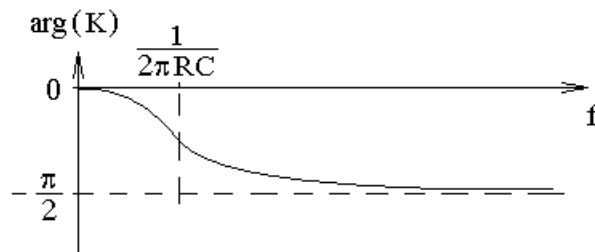
Комплексный коэффициент передачи можно записать, как комплексное число в экспоненциальной форме:

$$\tilde{K} = |\tilde{K}| \cdot e^{i \cdot \arg(\tilde{K})}.$$

Зависимость комплексного коэффициента передачи от частоты обычно представляют двумя соответствующими зависимостями: амплитудно-частотной характеристикой или зависимостью $|\tilde{K}|$ от f и фазо-частотной характеристикой или зависимостью $\arg(\tilde{K})$ от f . Для RC -цепочки эти зависимости имеют следующий вид:



и



Здесь $|\arg(\tilde{K})|$ — это запаздывание по фазе напряжения на выходе схемы относительно напряжения на входе. Запаздывание, так как $\arg(\tilde{K}) < 0$.

Напряжение на выходе любой схемы не может появиться раньше, чем появится напряжение на ее входе. Это условие накладывает некоторое интегральное соотношение между амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристиками любой системы.

Прямое и обратное преобразование Фурье входного сигнала:

$$\begin{cases} U_{\text{вх}}(t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{U}_{0\text{вх}}(\omega) e^{+i\omega t} d\omega \\ \tilde{U}_{0\text{вх}}(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U_{\text{вх}}(t) e^{-i\omega t} dt \end{cases} .$$

Если на входе системы дельта-функция Дирака $U_{\text{вх}}(t) = \delta(t)$, то фурье-образ входного сигнала — константа $\tilde{U}_{0\text{вх}}(\omega) = \frac{1}{\pi}$, фурье-образ выходного сигнала пропорционален комплексному коэффициенту передачи $\tilde{U}_{0\text{вых}}(\omega) = \tilde{K}_0(\omega) \tilde{U}_{0\text{вх}}(\omega) = \frac{\tilde{K}_0(\omega)}{\pi}$. Тогда сам выходной сигнал, как функция времени не может появиться раньше, чем сигнал на входе:

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{K}_0(\omega) e^{i\omega t} d\omega = 0 \text{ при любом } t < 0.$$

Интегральное соотношение приводит к тому, что любой спад амплитудно-частотной характеристики вида $\sim \frac{1}{f}$ неизбежно приводит к отставанию по фазе на $\frac{\pi}{2}$. Каждый спад вида $\sim \frac{1}{f}$ приводит к дополнительному отставанию по фазе $\frac{\pi}{2}$.

Возбуждение или генерация системы с обратной связью.

В любой системе с отрицательной обратной связью на высоких частотах образуется неконтролируемый спад амплитудно-частотной характеристики. На каких-то частотах начинается спад вида $\sim \frac{1}{f}$, на более высоких частотах спад $\sim \frac{1}{f^2}$, затем $\sim \frac{1}{f^3}$ и так далее. Соответственно за этими частотами происходит отставание по фазе на $\frac{\pi}{2}$, $2\frac{\pi}{2}$, $3\frac{\pi}{2}$ и так далее.

Фазовый сдвиг равный π означает, что отрицательная обратная связь на этой частоте оказывается положительной.

Если в выражении для относительной неотслеженной части напряжения

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + K_0}$$

положительный коэффициент передачи петли обратной связи K_0 заменить на отрицательный, что и соответствует фазовому сдвигу на π , то окажется, что относительная неотслеженная часть больше единицы $\varepsilon > 1$ при условии, что $|K_0| < 1$. Если же на этой частоте модуль коэффициента передачи петли обратной связи $|K_0|$ меньше единицы и стремиться к единице, то $\varepsilon \rightarrow \infty$. Бесконечная неотслеженная часть означает возбуждение или генерацию в петле обратной связи.

Возбуждение в петле обратной связи происходит в том и только в том случае, если на частоте фазового сдвига петли равного π модуль коэффициента передачи петли больше или равен единице.

Частоту, на которой фазовый сдвиг равен π , будем называть частотой генерации f_2 . Если $|K_0| > 1$ на так называемой частоте генерации $f = f_2$, то амплитуда синусоиды на частоте генерации f_2 возрастает во времени от случайного шумового значения до тех пор, пока синусоида не начнет ограничиваться напряжениями питания схемы. Ограничение приведет к уменьшению модуля коэффициента передачи, и амплитуда стабилизируется по величине при условии $|K_0| = 1$ на частоте генерации f_2 .

Чтобы избежать возбуждения системы стабилизации нужно обеспечить неравенство $|K_0| < 1$ на частоте $f = f_2$, на которой фазовый сдвиг в петле обратной связи равен π .

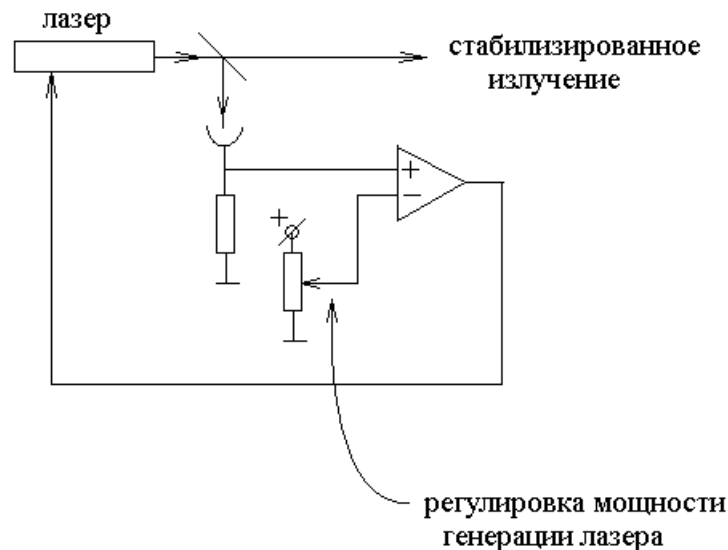
С этой целью внутри микросхемы ОУ организуют принудительный спад амплитудно-частотной характеристики, начиная с очень низких частот. Создают спад вида $\sim \frac{1}{f}$, которому соответствует фазовый сдвиг $\frac{\pi}{2}$. На

частотах, на которых появляется неконтролируемый фазовый сдвиг еще $\frac{\pi}{2}$, коэффициент передачи петли обратной связи оказывается уже достаточно мал, чтобы система обратной связи не возбуждалась.

Так если неконтролируемые повороты фазы появляются на частоте 1 МГц, и на нулевой частоте модуль коэффициента передачи петли обратной связи равен 10^6 , то спад амплитудно-частотной характеристики вида $\sim \frac{1}{f}$ должен начинаться с частоты примерно 1 Гц.

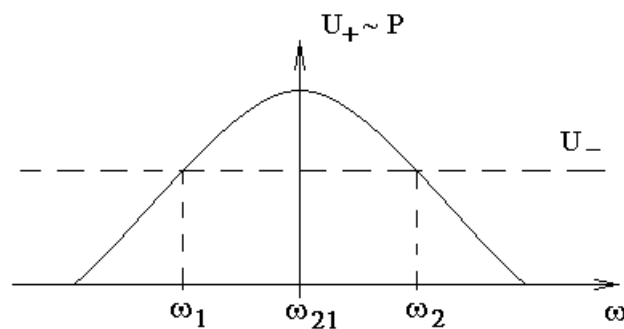
Стабилизация частоты генерации лазера по его мощности.

Рассмотрим следующую принципиальную схему стабилизации частоты генерации лазера:



Здесь напряжение с выхода дифференциального усилителя подается на пьезокерамику, на которой укреплено одно из зеркал лазера, для управления частотой генерации лазера. Разность напряжений $U_+ - U_-$ на двух входах дифференциального усилителя является сигналом ошибки системы стабилизации. То есть система стабилизации удерживает мощность генерации лазера на таком уровне, чтобы $U_+ - U_- = 0$.

Напряжение на плюс-входе усилителя U_+ пропорционально мощности генерации лазера P . Пусть лазер работает в одночастотном режиме генерации, тогда зависимость мощности генерации от частоты примерно повторяет зависимость коэффициента усиления лазерной среды от частоты. Только ось абсцисс этой зависимости приподнята до уровня потерь резонатора лазера. Мощность генерации, как функция частоты, имеет следующий вид:



Здесь ω_{21} — частота центра линии усиления лазерной среды, горизонтальная пунктирная линия на уровне U_- соответствует величине напряжения, которое с потенциометра подается на минус-вход дифференциального усилителя.

Нулевой сигнал ошибки системы стабилизации $U_+ - U_- = 0$ соответствует двум частотам генерации лазера, обозначенным на рисунке, как

ω_1 и ω_2 . Одна из этих частот является частотой устойчивого равновесия системы стабилизации, а другая — частотой неустойчивого равновесия.

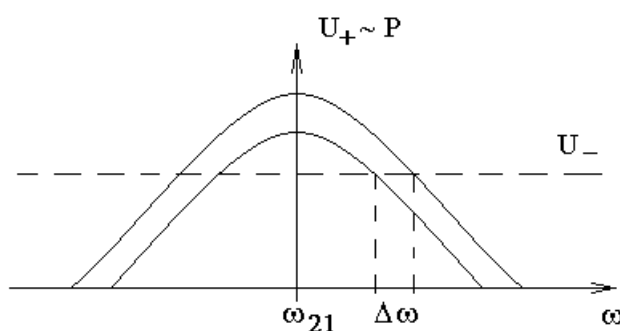
Будем для определенности считать, что крепление зеркала на пьезокерамике устроено таким образом, что при увеличении напряжения на пьезокерамике частота генерации лазера возрастает.

Тогда ω_2 — частота устойчивого равновесия системы стабилизации. И действительно. Пусть в начальный момент времени система стабилизации находится в состоянии равновесия $U_+ - U_- = 0$. И пусть частота генерации лазера по случайным причинам испытала небольшое шумовое изменение в сторону увеличения частоты вправо по оси частот. Тогда в соответствии с зависимостью мощности от частоты мощность генерации лазера уменьшилась. Уменьшение мощности привело к уменьшению напряжения с приемника излучения и уменьшению напряжения U_+ на плюс-входе дифференциального усилителя. Уменьшение значения U_+ привело к уменьшению напряжения на выходе усилителя и к уменьшению напряжения на пьезокерамике. В соответствии с нашим предположением уменьшение напряжения на пьезокерамике приводит к уменьшению частоты генерации лазера.

Итак, шумовое увеличение частоты генерации приводит к тому, что система стабилизации вырабатывает сигнал, который уменьшает частоту генерации. Это и означает, что ω_2 — частота устойчивого равновесия системы стабилизации.

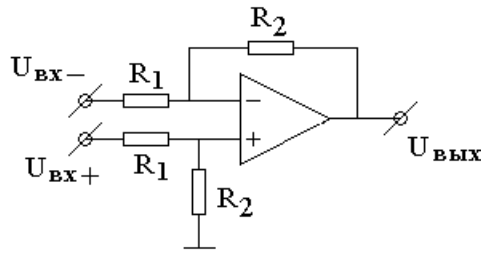
Преимущество предложенного метода стабилизации состоит в том, что стабилизированную частоту генерации можно перестраивать, изменяя величину напряжения U_- , подаваемого на минус вход дифференциального усилителя.

Недостаток такого метода — изменение частоты генерации при изменении усиления лазерной среды, что видно из нижеследующего рисунка:



Здесь $\Delta\omega$ — изменение стабилизированной частоты генерации лазера при изменении усиления среды.

Дифференциальный усилитель на основе операционного усилителя:

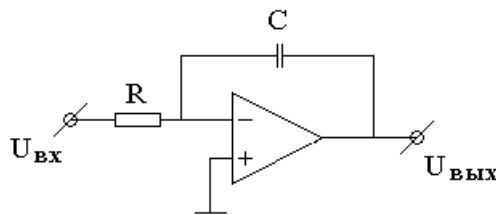


$$U_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{вх+} = U_-$$

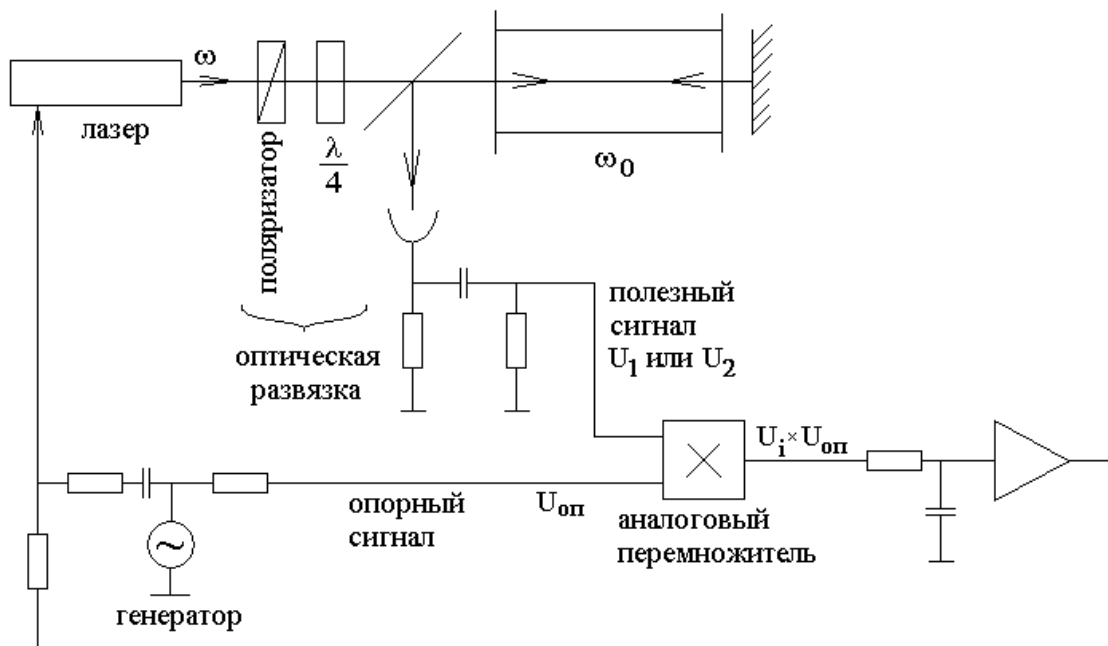
$$I = \frac{U_{вх-} - U_-}{R_1}$$

$$U_{вых} = U_- - IR_2 = \frac{R_2}{R_1} (U_{вх+} - U_{вх-})$$

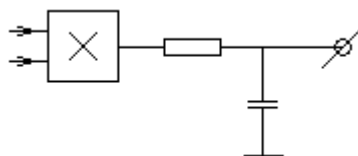
Спад $\frac{1}{f}$ коэффициента передачи петли обратной связи реализуется с помощью интегрирующего усилителя:



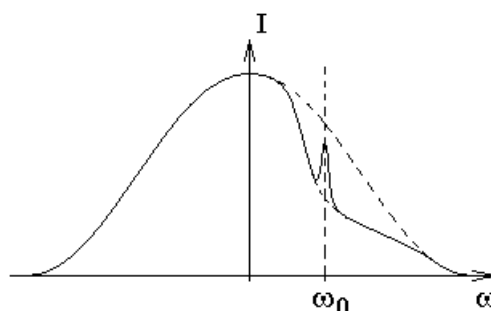
Стабилизация лазера по резонансу насыщения поглощения.



Аналоговый перемножитель К525ПС2.



В этой схеме зависимость мощности сигнала на приемнике от частоты генерации лазера имеет следующий вид:



Здесь ω_0 — центр линии поглощения газа в кювете, пунктирная часть зависимости — мощность генерации лазера. Вокруг частоты ω_0 в мощности света на приемнике появляется широкий доплеровский провал линии поглощения газа, находящегося в кювете. В центре линии поглощения на частоте ω_0 наблюдается узкий пик резонанса насыщения поглощения.

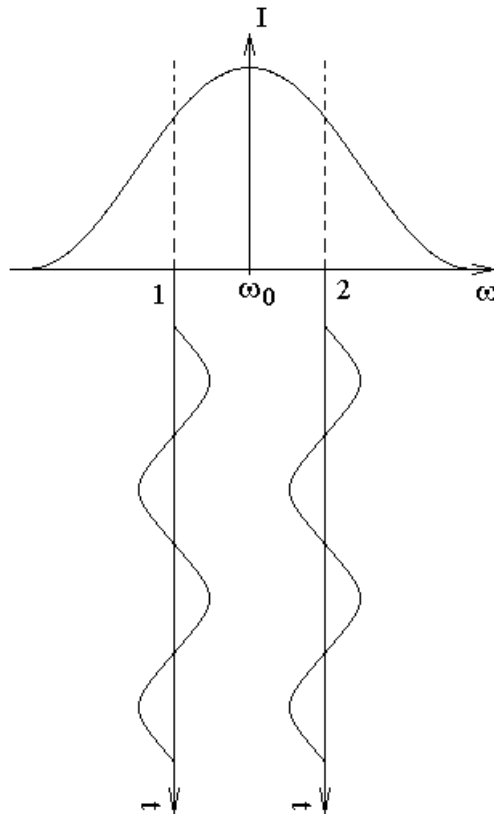
Как стабилизировать частоту генерации лазера по центру узкого резонанса просветления среды? При случайном (шумовом) смещении частоты генерации лазера в любую сторону от центра резонанса мощность на приемнике излучения уменьшается. Как система стабилизации узнает, в какую сторону нужно возвращать частоту генерации лазера к центру резонанса.

Для формирования сигнала ошибки в данном случае используется синхронное детектирование сигнала на частоте генератора, которое производится на аналоговом перемножителе сигналов.

Опорное напряжение U_{on} синхронного детектирования подается на нижний вход аналогового перемножителя. На верхний вход перемножителя поступает переменная часть напряжения с приемника лазерного излучения.

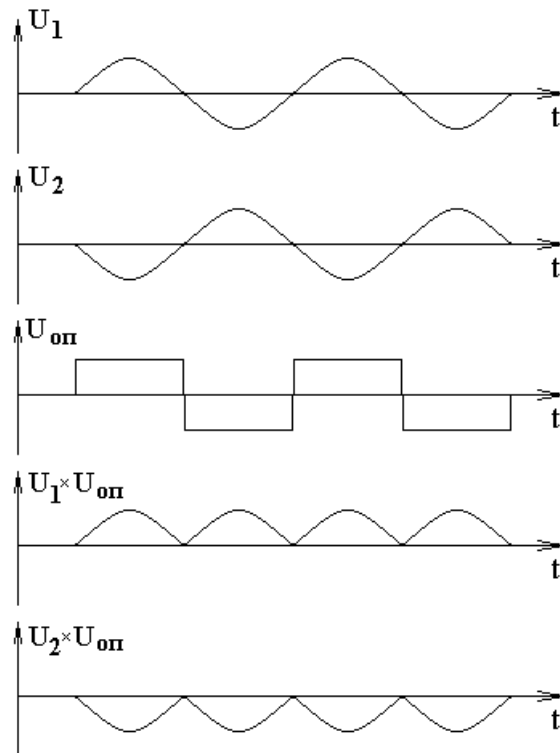
Синусоидальное напряжение с генератора подается на пьезокерамику лазера и покачивает частоту лазера с частотой генератора. Этой же синусоидой оказывается промодулирована мощность излучения на приемнике света. Фаза синусоиды модуляции зависит от того, на каком склоне резонанса насыщения поглощения находится среднее значение частоты лазера.

Для большей наглядности на нижеследующем рисунке узкий резонанс насыщения поглощения растянут по оси частот.



Из рисунка видно следующее. Если средняя частота генерации находится на левом склоне резонанса и качнулась чуть вправо, то мощность на приемнике возросла. Если же средняя частота находится на правом склоне и качнулась чуть вправо, то мощность уменьшилась. То есть на двух склонах резонанса фаза колебаний напряжения с приемника будет противоположной.

На нижеследующем рисунке приведены напряжения на входах и выходах аналогового перемножителя для средней частоты генерации на левом склоне резонанса и на правом склоне. Для простоты рассуждений будем считать, что опорное напряжение на нижнем входе перемножителя имеет форму прямоугольников, а не синусоиды.



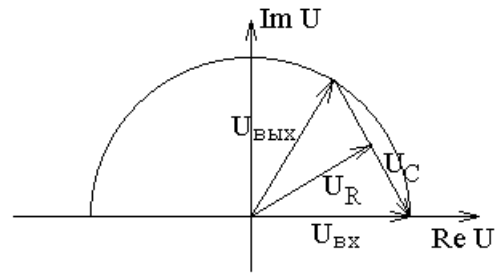
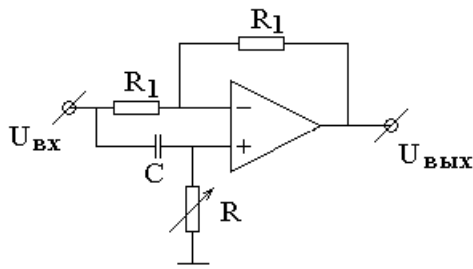
Здесь U_1 и U_2 — напряжения на верхнем входе перемножителя в двух случаях: когда частота генерации лазера находится на левом склоне резонанса насыщения поглощения и когда частота находится на правом склоне; $U_{оп}$ — опорное напряжение синхронного детектора, подаваемое на нижний вход перемножителя; $U_1 \cdot U_{оп}$ — напряжение на выходе перемножителя, если частота генерации лазера находится на левом склоне резонанса насыщения поглощения; $U_2 \cdot U_{оп}$ — напряжение на выходе, если частота на правом склоне.

Сглаженное RC -цепочкой напряжение с выхода перемножителя является сигналом ошибки системы стабилизации. После усиления это напряжение подается на пьезокерамику лазера для управления частотой его генерации. Усилитель может быть инвертирующим или не инвертирующим в зависимости от того, в какую сторону изменяется частота генерации лазера при увеличении напряжения на пьезокерамике. Если частота возрастает, то для получения отрицательной обратной связи усилитель должен быть не инвертирующим.

Система стабилизации стремится удерживать нулевое значение сигнала ошибки, что соответствует стабилизации частоты генерации по нулю первой производной зависимости мощности на приемнике от частоты. Ноль первой производной с хорошей точностью соответствует центру резонанса.

Фазовращатель на операционном усилителе.

В синхронном детекторе хотелось бы подобрать фазу опорного сигнала так, чтобы отдетектированное напряжение было максимальным. Для этого удобен фазовращатель.



Из левого рисунка следует:

$$\begin{cases} U_{вх} - U_- = U_- - U_{вых} \\ U_R = U_+ = U_- \end{cases} .$$

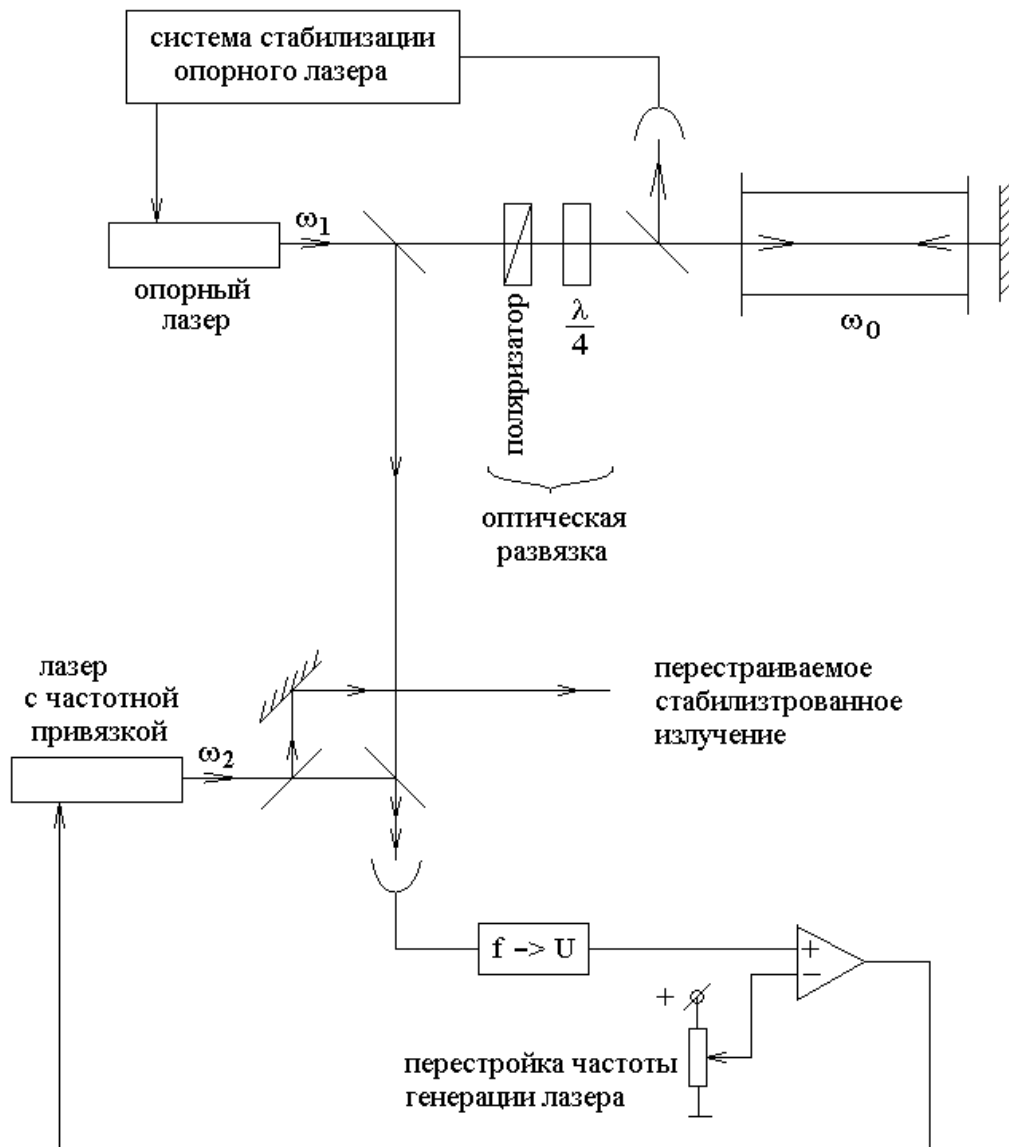
Отсюда следует:

$$U_{вх} - U_R = U_R - U_{вых} \quad \Rightarrow \quad \tilde{U}_{вх} - \tilde{U}_R = \tilde{U}_R - \tilde{U}_{вых} .$$

И с учетом того, что напряжение на конденсаторе отстает по фазе на $\frac{\pi}{2}$ от напряжения на переменном резисторе, получаем правый рисунок.

Система частотной привязки одного лазера к другому.

Ниже приведена принципиальная схема экспериментальной установки, позволяющая получить частотно стабилизированное излучение лазера с возможностью медленной перестройки стабилизированного излучения по частоте (сканирования по частоте).



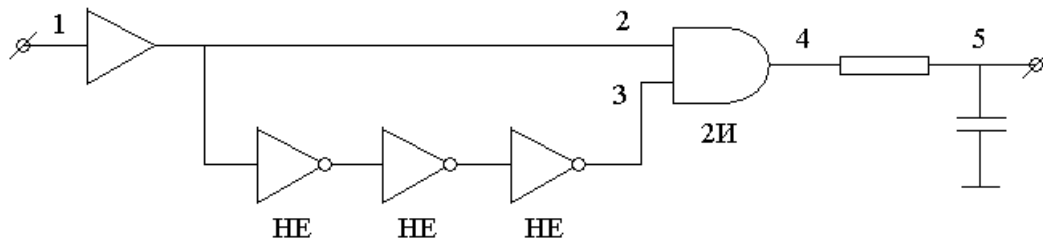
Здесь верхний так называемый опорный лазер стабилизирован по резонансу насыщения поглощения. Вся электронная часть системы стабилизации опорного лазера изображена одним прямоугольником.

Излучение опорного лазера служит частотным репером для стабилизации частоты генерации (частотной привязки) нижнего перестраиваемого по частоте лазера.

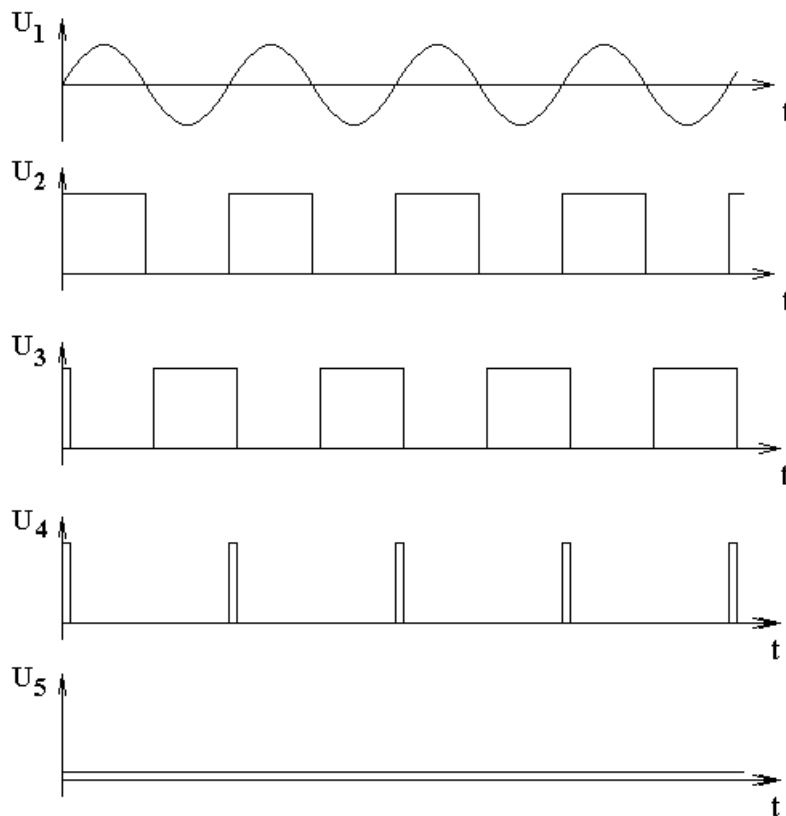
Излучение двух лазеров интерферирует на приемнике, электрическое напряжение с которого представляет собой синусоиду на частоте равной разности частот двух лазеров.

С приемника электрический сигнал поступает на преобразователь частота-напряжение $f \rightarrow U$. Напряжение с выхода преобразователя сравнивается с постоянным напряжением, которое с потенциометра подается на минус-вход дифференциального усилителя. Разность этих напряжений на двух входах дифференциального усилителя является сигналом ошибки системы частотной привязки перестраиваемого лазера. Усиленное напряжение с выхода дифференциального усилителя поступает на пьезокерамику для управления частотой генерации лазера.

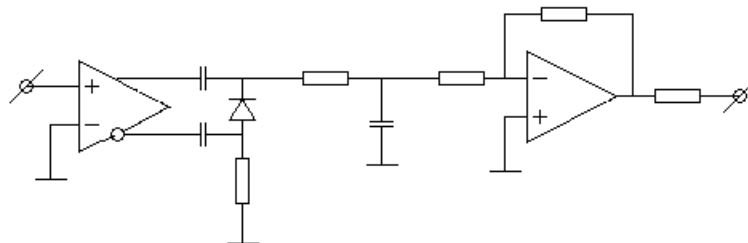
Возможная схема преобразователя частота-напряжение изображена на нижеследующем рисунке.



На следующем рисунке приведены напряжения в контрольных точках 1, 2, 3, 4, 5.



В моей установке была другая схема преобразователя частота — напряжение.



Слева — компаратор с двумя выходами, справа — операционный усилитель.

Фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ)
генератора управляемого напряжением (ГУН).

В современных схемах частотной привязки используется фазовая подстройка частоты биения двух лазеров под частоту некоторого опорного генератора (ОГ). Такая система привязки требует большего быстродействия логических схем, но обеспечивает более высокую степень стабилизации частоты перестраиваемого лазера.

Принципиальная схема фазовой автоподстройки частоты приведена на следующем рисунке, где роль сигнала с приемника биений двух лазеров выполняет сигнал с генератора управляемого напряжением (ГУН):

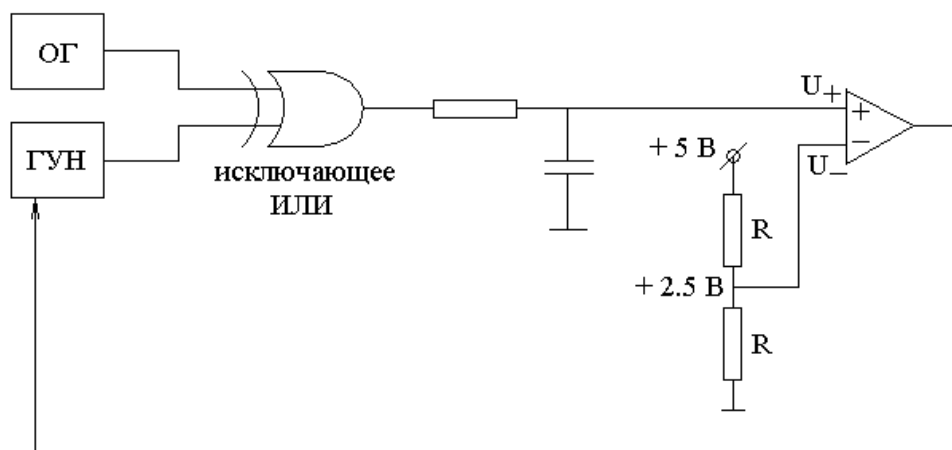


Таблица истинности для логических уровней микросхемы исключающее ИЛИ:

0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Пусть разность фаз генераторов ОГ и ГУН равна $\delta\varphi$.

Если $\delta\varphi = 0$, то $U_+ = 0V$.

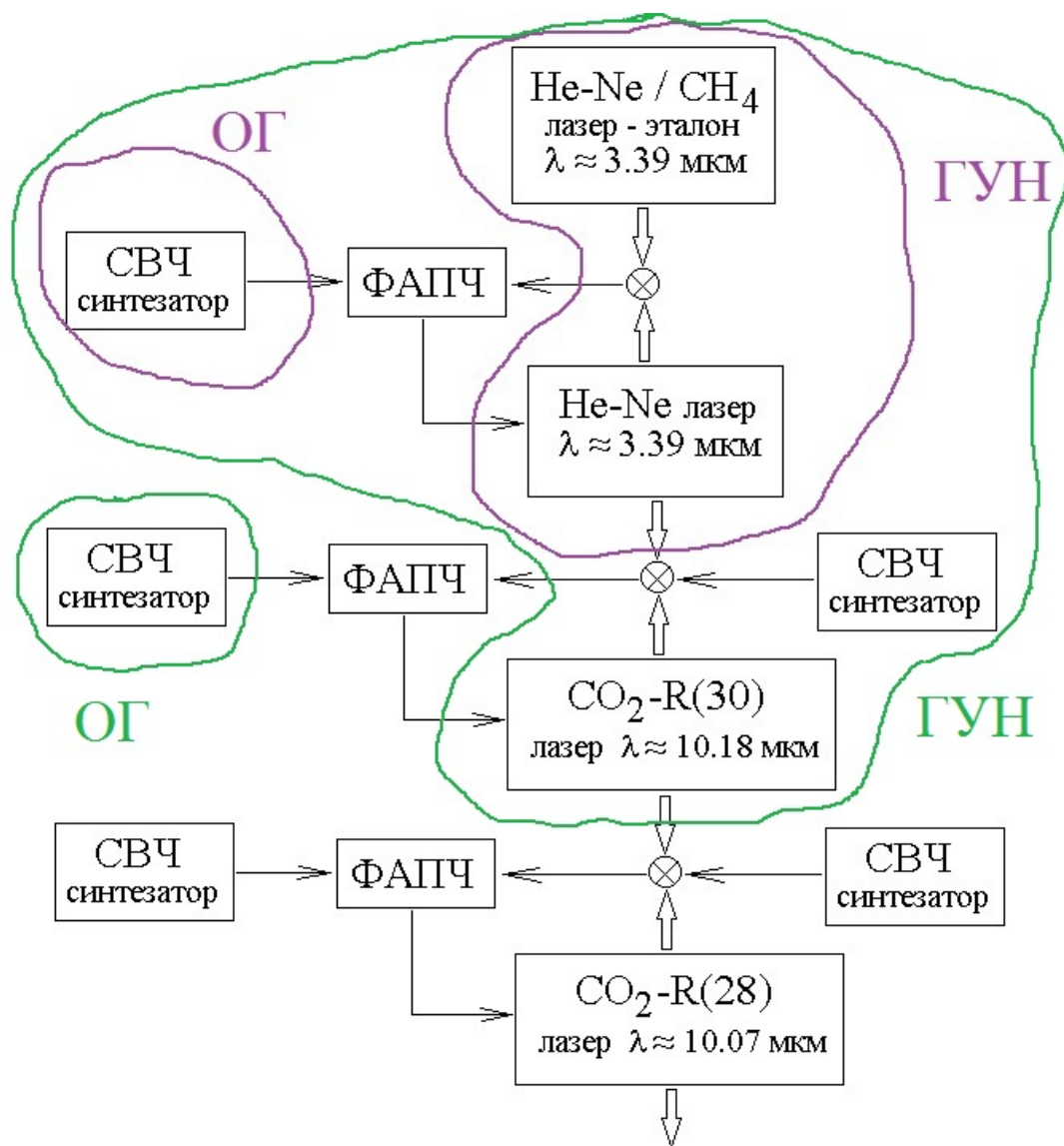
Если $\delta\varphi = \pi$, то $U_+ = 5V$.

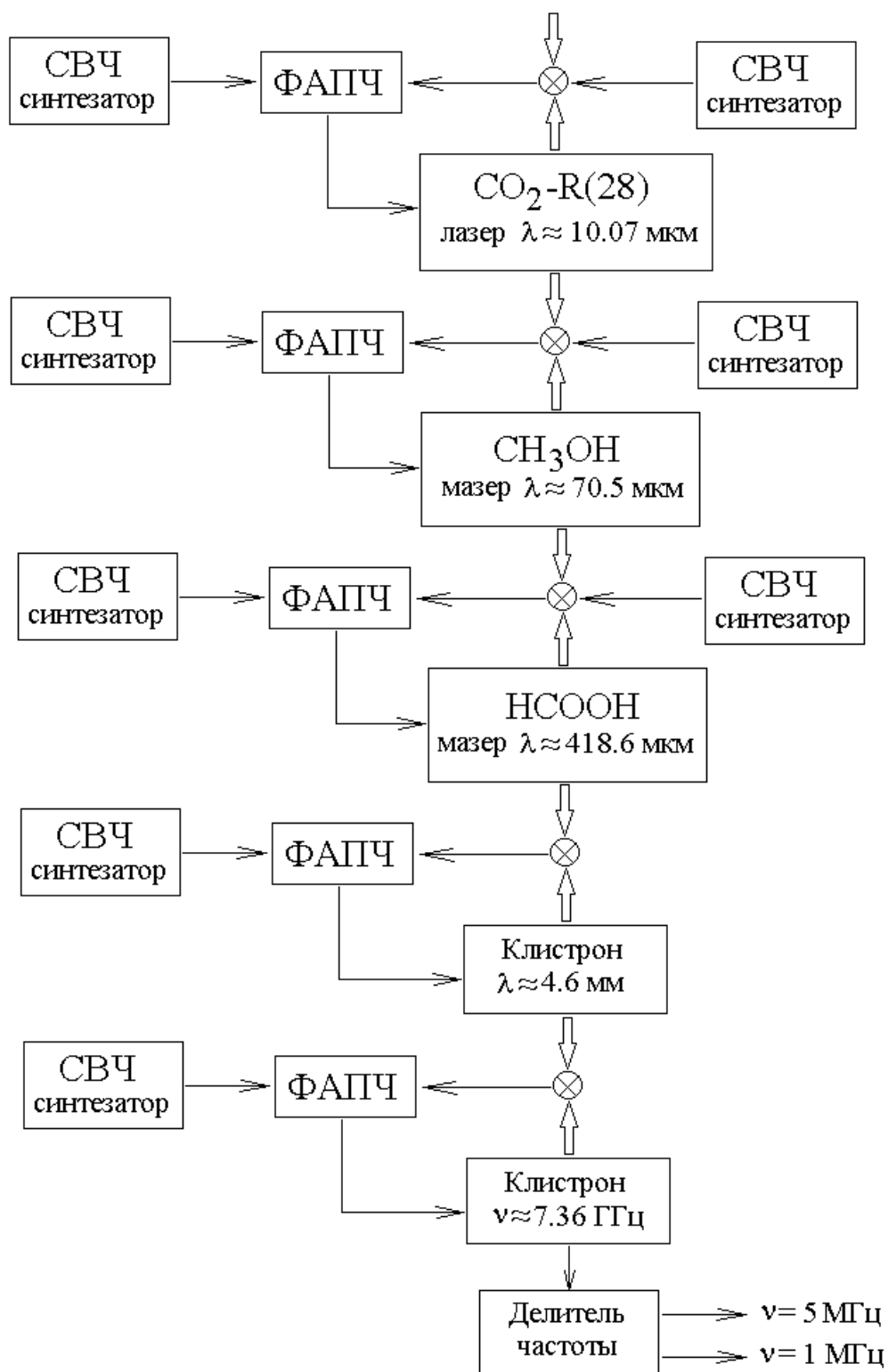
Если $\delta\varphi = \frac{\pi}{2}$ или $\delta\varphi = \frac{3\pi}{2}$, то $U_+ = 2.5V$.

Одно из этих двух значений — положение устойчивого равновесия системы стабилизации частоты ГУН по частоте ОГ.

Радиооптический мост.

Для сравнения оптической частоты и частоты в радиочастотном диапазоне служит так называемый радиооптический мост. Принципиальная схема радиооптического моста приведена на нижеследующем рисунке.



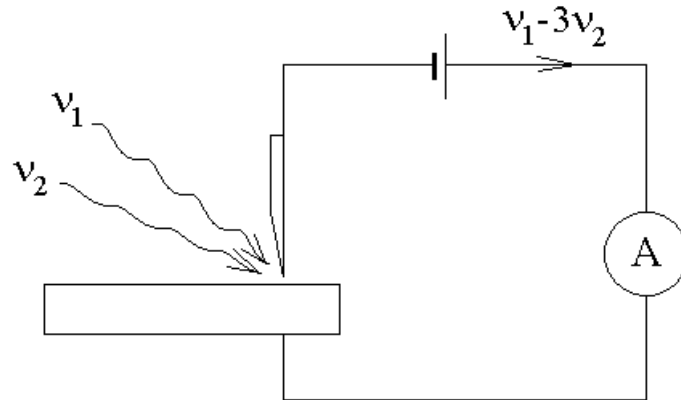


88,376,182,599,985 (8) Гц \approx 88 ТГц

P. V. POKASOV, R. HOLZWARTH, TH. UDEM, M. ZIMMERMANN, J. REICHERT, M. NIERING, T. W. HDNSCH, A. K. DMITRIYEV, S. N. BAGAYEV, P. LEMONDE, G. SANTARELLI, P. LAURENT, M. ABGRALL, A. CLAIRON, and C. SALOMON (2002) ABSOLUTE FREQUENCY

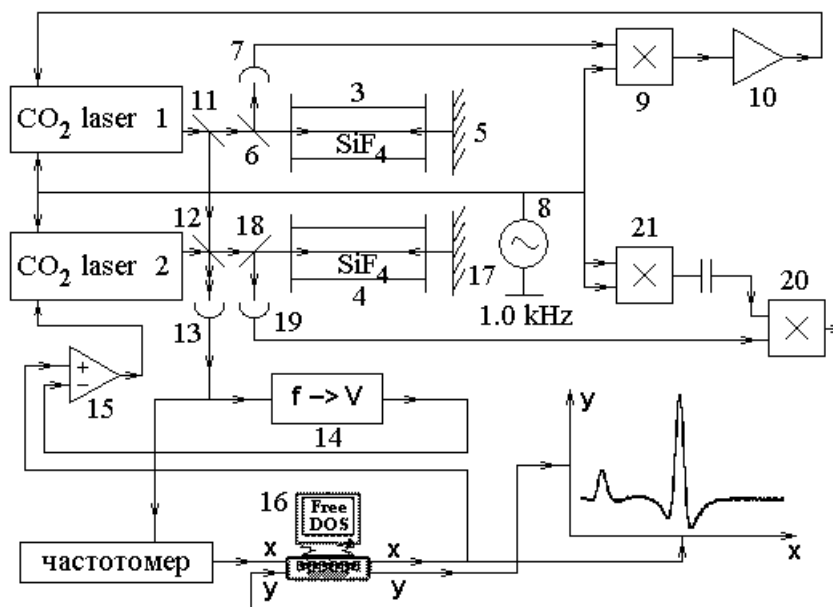
MEASUREMENTS OF A METHANE-STABILIZED TRANSPORTABLE HE-NE LASER AT 3.39 μm . Frequency Standards and Metrology: pp. 510-512.

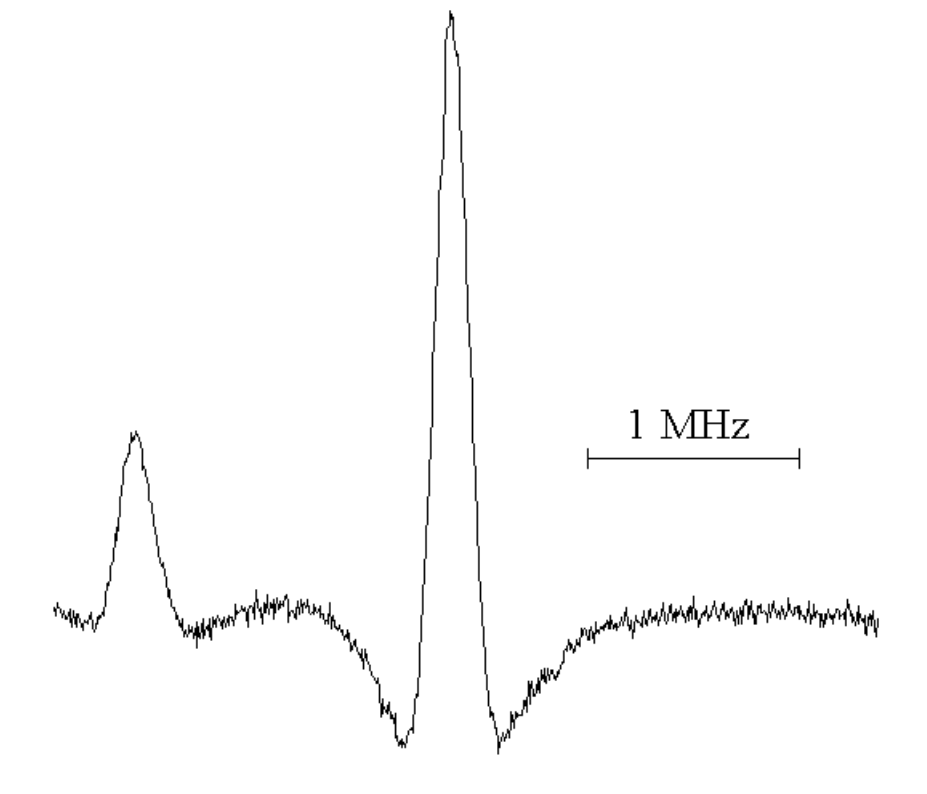
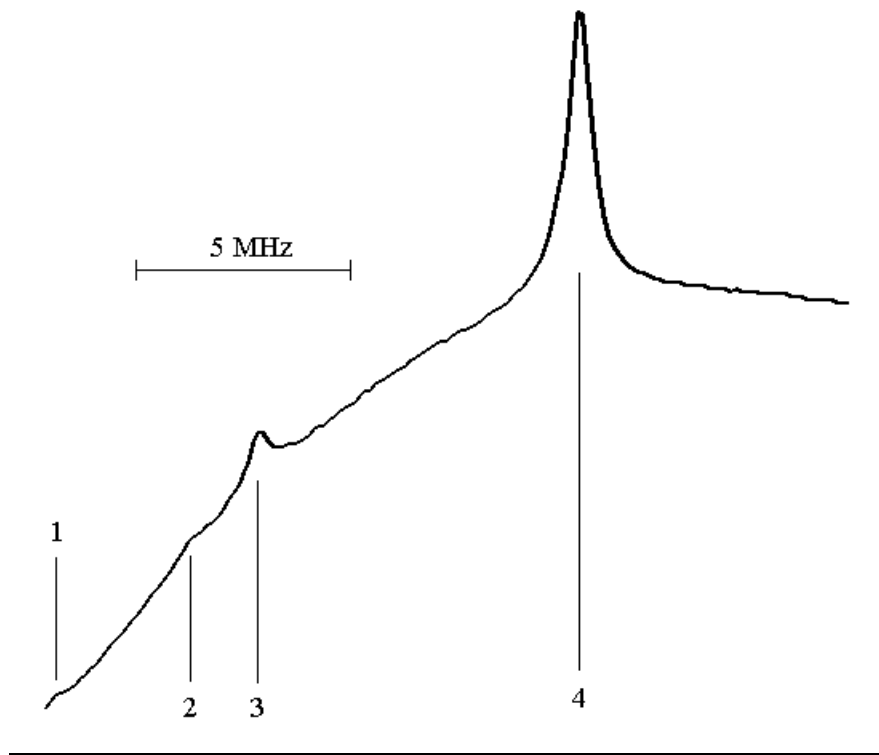
Для сравнения почти кратных частот лазеров используется приемник излучения типа "кошачий ус".

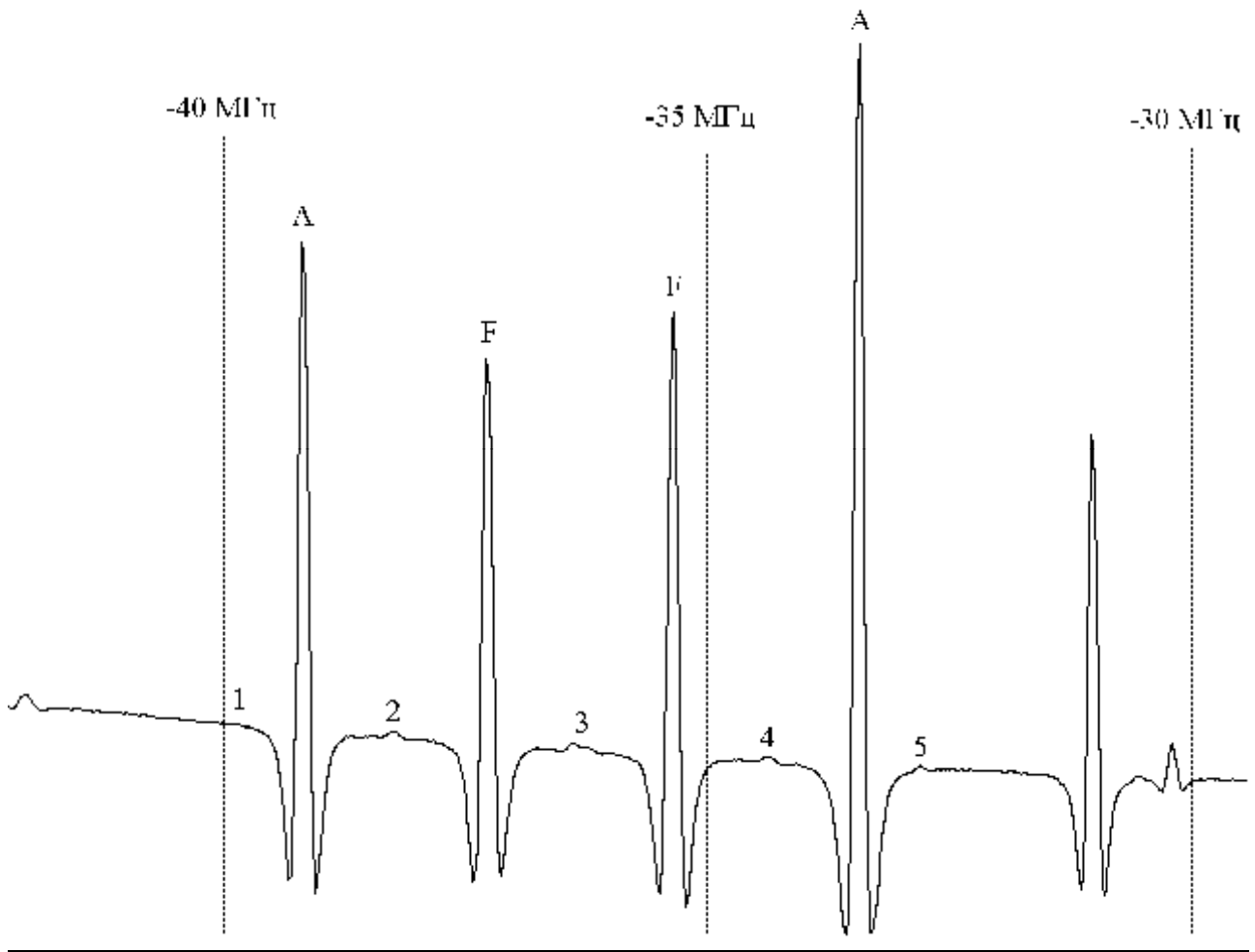


Это приемник, который реагирует на напряженность электрического поля световой волны, а не на интенсивность, как остальные приемники оптического диапазона. Например, в фототоке приемника можно получить сигнал на частоте $\nu_1 - 3\nu_2$, если эта частота достаточно низкая.

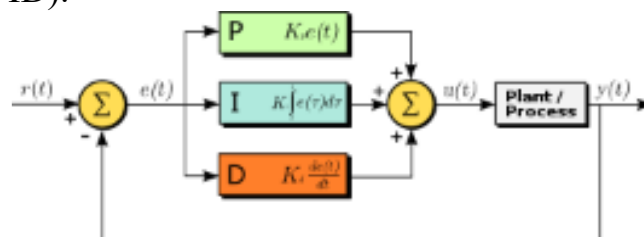
Система накопления сигнала.



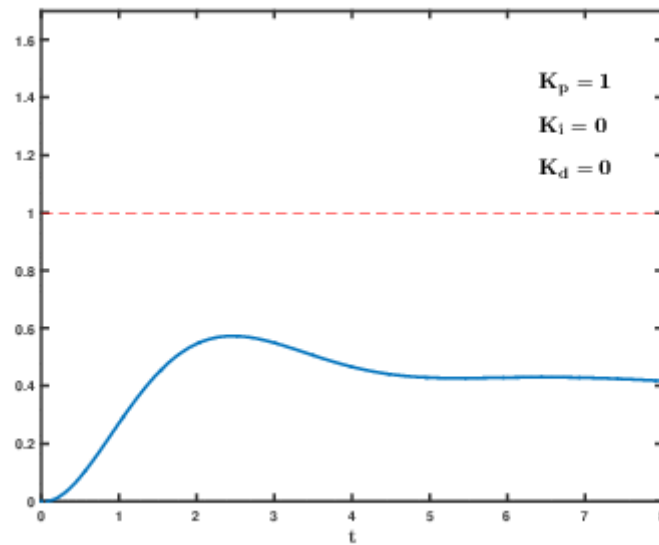




ПИД-регуляторы (PID).



Arturo Urquiza, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons



LabView.

Arduino.

OrCAD. P-CAD.

Симуляторы.

Мультисим, Multisim 12.0, EveryCircuit (программа моделирования электронных схем).