

Модуль 5. Автогенераторы периодических колебаний.

Лабораторная работа № 5.1

Автогенераторы синусоидальных колебаний на операционных усилителях

1. Цель работы

Овладение методикой исследования схем автогенераторов на ОУ, генерирующих гармонические и прямоугольные колебания.

2. Задачи исследования

- подготовка к лабораторной работе, т.е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемой схеме;
- проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?;
- приобретение навыков исследования схемы автогенератора гармонических колебаний на ОУ с использованием функционального генератора (FGEN), осциллографа (Scope), анализатора амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик – АЧХ/ФЧХ (Bode Analyzer) и анализатора спектра (Dynamic Signal Analyzer – DSA).
- обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

3. Краткие сведения из теории

Исследуемые в этой лабораторной работе схемы принципиально отличаются от всех ранее анализируемых схем лабораторного цикла по аналоговой электронике. Отличительной особенностью изучаемых ранее схем, какие бы они не были пассивные или активные и какие бы преобразования они не выполняли, было то, что они требовали наличия на их входах сигналов. Другими словами, все схемы осуществляли определенные линейные или нелинейные преобразования над входным или входными сигналами, причем пассивные схемы осуществляли их без привлечения источников питания.

В этой лабораторной работе Вы исследуете другой класс схем – генераторов электрических сигналов, которые сами служат источниками измерительных, синхронизирующих и управляющих сигналов для схем аналоговых, импульсных и цифровых устройств. В отличие от различ-

ных усилительных и преобразовательных схем, если исключить у генераторных схем задачи их управления, синхронизации, модуляции и т. п., в генераторах отсутствует входы, куда ранее в предыдущих схемах извне подавался сигнал.

Существует следующее определение: генератором электрических сигналов называется устройство, посредством которого энергия источника питания преобразуется в электрические колебания определенной формы с заданной амплитудой и частотой. Однако такое определение подойдет и для усилительных устройств. На наш взгляд, необходимо добавить, что такое преобразование осуществляется исключительно за счет внутренних ресурсов схемы и при отсутствии традиционного входа и входного сигнала на нем. Говоря по существу, процессы в любой схеме усилителя или преобразователя входных сигналов описывается дифференциальным уравнением с правой частью. Процессы же в автогенераторах при указанных выше ограничениях будут описываться однородными дифференциальными уравнениями, т.е. с правой нулевой частью. Из этого четко подтверждается предыдущий вывод: параметры сигналов в генераторе определяются параметрами элементов его схемы.

В общем случае автогенератор генерирует сигналы произвольной формы. Но наиболее часто возникает потребность в сигналах гармонической и прямоугольной форм. Автогенераторы синусоидальных колебаний будут исследоваться в данной лабораторной работе.

3.1. Задачи исследования

При исследовании любой схемы автогенератора возникает следующий состав вопросов:

- При каких условиях возникают колебания в исследуемой схеме автогенератора?
- По какому закону нарастают колебания от их возникновения до стационарной амплитуды?
- Как определить стационарное (установившееся) значение выходного напряжения автогенератора?
- Насколько устойчивы параметры установившегося выходного напряжения автогенератора и, прежде всего, его частоты и амплитуды? Другими словами, речь идет о стабилизации частоты и амплитуды напряжения автогенератора.

Указанные задачи являются классическими. Они могут быть дополнены вопросами, специфическими для конкретной исследуемой схемы.

3.2. *RC*-автогенератор синусоидальных колебаний с цепью Вина

3.2.1. О составе автогенератора

Прежде всего, Вас должен заинтересовать ответ на вопрос: «А что должно обязательно входить в состав схемы любого автогенератора гармонических колебаний?» Рассуждения на этот счет могут быть следующими.

Раз в идеальном случае автогенератор должен генерировать синусоидальные колебания на одной избранной пользователем частоте, то в составе схемы мы должны обнаружить линейную избирательную цепь и избирательный усилитель на ней построенный.

Чтобы обеспечить условия неустойчивости такого усилителя, последний должен быть охвачен цепью положительной обратной связи на частоте «квазирезонанса» и, к тому же, иметь на этой частоте петлевое усиление, превышающее единицу. Если эти условия имеют место, то будут нарастать колебания в автогенераторе по тому или иному закону.

Однако в линейной схеме нарастание колебаний будет происходить до бесконечности, так как линейные элементы не изменяют своих параметров от значений тока или напряжения. Значит, в составе схемы любого автогенератора должна присутствовать нелинейность, которая и возьмет на себя ответственность за получение требуемой стационарной амплитуды гармонического колебания.

Но и это еще не все. Если заинтересоваться стабилизацией значения (действующего, амплитудного, средне выпрямленного) выходного напряжения автогенератора, то в схеме можно различить дополнительную цепь отрицательной обратной связи по выбранному интегральному или амплитудному значению сигнала, реализующую формирование отрицательной производной коэффициента передачи усилителя генератора от значения выходного напряжения.

Если отвлечься от оговоренного выше типа автогенератора гармонических колебаний, то при генерации таких колебаний актуальным становится вопрос о стабилизации их частоты. В автогенераторах, в которых избирательные цепи реализованы в виде элементов *LC*- или *RC*-базиса, стабильность частоты стационарных колебаний в основном обусловлены температурной и временной стабильностью этих элементов. Когда их стабильность не удовлетворяет пользователя, то обращают внимание на кварцевые генераторы, а затем на молекулярные.

В лабораторной работе будет исследоваться автогенератор, использующий в качестве избирательной *RC*-цепи Γ -образный четырехполюсник, известный как цепь Вина.

Схема автогенератора синусоидальных колебаний с цепью Вина изображена на рис. 3.97.

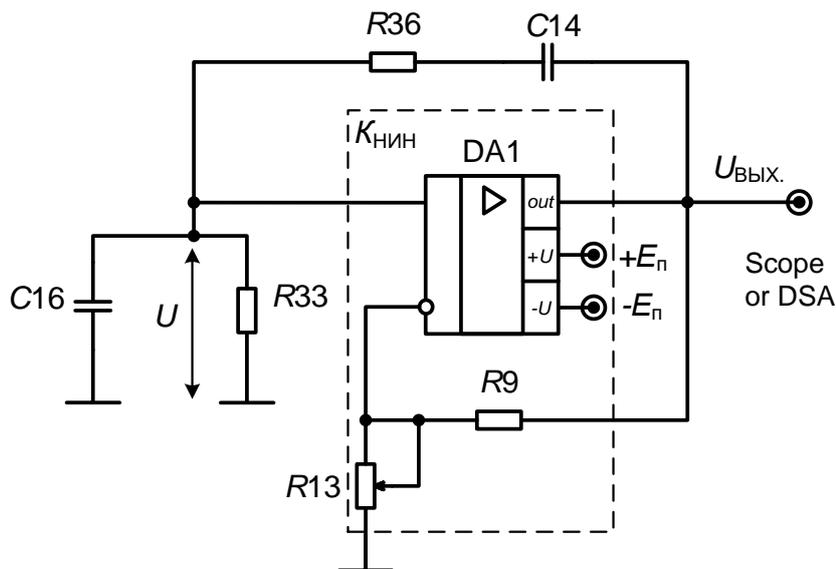


Рис. 3.97. Автогенератор синусоидальных колебаний с цепью Вина

В составе автогенератора находим избирательную цепь, которую можно исследовать на ее частотные свойства, рис. 3.98.

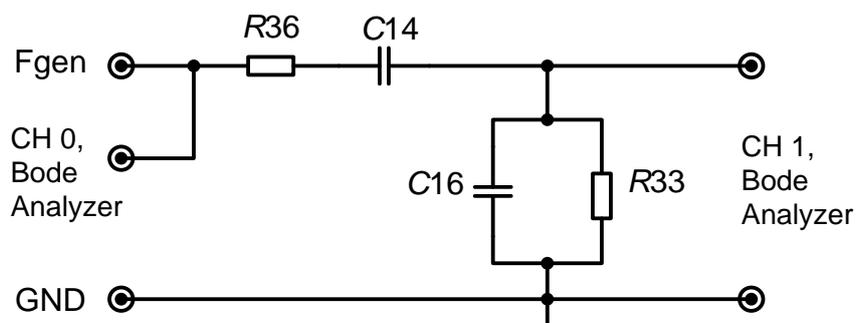


Рис. 3.98. Цепь Вина и схема исследования ее АЧХ и ФЧХ

Как видно из рисунка 3.97, кроме цепи Вина в составе автогенератора находится неинвертирующий усилитель на ОУ (обозначен на схеме пунктиром). Цепь и неинвертирующий усилитель образуют петлю положительной обратной связи на частоте «квазирезонанса», когда передача цепи вещественна, а фазовый сдвиг равен нулю. С другой стороны, неинвертирующий усилитель образуется, когда ОУ охватывается цепью последовательной отрицательной обратной связи по напряжению, в нашем случае, через сопротивления R_9 и R_{13} . Г-образный четырехполюсник, как цепь положительной обратной связи, и четырехполюсник из сопротивлений R_9 и R_{13} , как цепь отрицательной обратной связи, об-

разуют мостовую схему, баланс которой на частоте «квазирезонанса» зависит от значения сопротивления R_{13} , рис. 3.99. При разбалансировке моста в ту или иную сторону изменяется фаза входного дифференциального напряжения ОУ на противоположную по знаку.

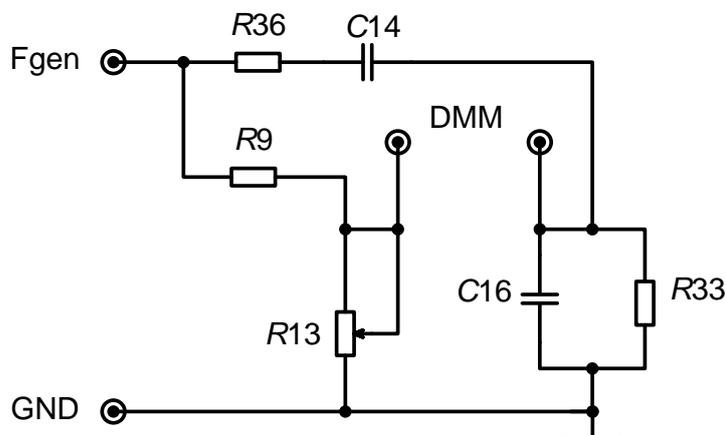


Рис. 3.99. Мостовая схема в RC-автогенераторе

Избирательный усилитель в схеме автогенератора просматривается в следующем виде на рис. 3.100.

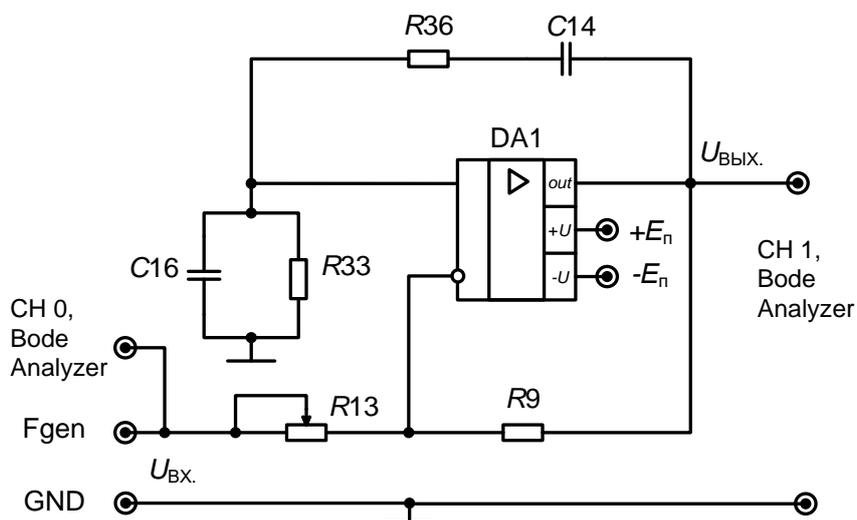


Рис. 3.100. Избирательный усилитель с Г-образной RC цепью Вина и схема его исследования

В схеме приведенного избирательного усилителя условие баланса фаз выполняется. Действительно, фазовый набег определяется как сумма фазовых сдвигов, вносимых цепью Вина и схемой на ОУ при его неинвертирующем включении. Но, как известно, при обозначенных огра-

ничениях (без учета инерционности операционного усилителя на частоте «квазирезонанса») оба фазовых сдвига равны нулю.

Для того чтобы схема превратилась в автогенератор, выполнение условия баланса фаз является необходимым, но не достаточным. Для этого петлевое усиление вдоль цепи положительной обратной связи автогенератора должно превышать единицу. Это произойдет, когда $R9 > 2 \cdot R13$.

Действительно, петлевое усиление будет больше единицы, т.е. $T = K_{\text{НИН}} \cdot A_0 > 1$ при коэффициенте передачи цепи Вина на частоте «квазирезонанса» $A_0 = 1/3$, когда коэффициент передачи по напряжению неинвертирующего усилителя $K_{\text{НИН}} = 1 + R29/R13$ будет больше трех.

И, наконец, попытаемся разобраться, где в автогенераторе находится нелинейность. В приведенной схеме цепи обратных связей собраны из линейных элементов. Значит, ограничение амплитуды выходных колебаний будет происходить из-за нелинейности амплитудной характеристики неинвертирующего усилителя.

3.2.2. Условия возникновения колебаний

Классическим способом решения этой задачи является составление дифференциального уравнения. Из-за малости амплитуд сигналов при их возникновении дифференциальное уравнение будет линейным (точнее, линеаризованным), несмотря на наличии нелинейности в составе автогенератора. Для данной схемы уравнение удобно составлять для напряжения U , действующего на неинвертирующем входе ОУ (рис. 3.97).

Ток, протекающий через $C14$ и $R36$ цепи Вина, если $R33 = R36 = R$ и $C16 = C14 = C$, равен $I = \frac{U}{R} + C \cdot \frac{dU}{dt}$. Тогда:

$$U_{\text{ВЫХ.}} = U + U_C + U_R = 2 \cdot U + R \cdot C \cdot \frac{dU}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int \left(\frac{U}{R} + C \cdot \frac{dU}{dt} \right) \cdot dt.$$

С другой стороны: $U_{\text{ВЫХ.}} = U \cdot K_{\text{НИН}}$.

Учитывая полученные выражения, имеем дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2U}{dt^2} + \frac{3 - K_{\text{НИН}}}{\tau} \cdot \frac{dU}{dt} + \omega_0^2 \cdot U = 0,$$

где: $\tau = R \cdot C$ – постоянная времени; ω_0 – частота «квазирезонанса».

Характеристическое уравнение принимает вид:

$$a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 = 0,$$

где: $a_2 = 1$; $a_1 = (3 - K_{\text{НИН}})/\tau$; $a_0 = \omega_0^2$, а его решение (корни):

$$p_{1,2} = -\frac{a_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_1}{2}\right)^2 - a_0}.$$

Согласно полученным корням автогенератор будет неустойчивым при $a_2 > 0$, если a_0 – отрицательно. Последнее происходит, когда $K_{\text{НИН}} = 1 + \frac{R9}{R13} > 3$, т.е. когда $R9 > 2 \cdot R13$, что и было использовано ранее.

Другими словами, любая система, а в нашем случае автогенератор, будет неустойчивой «в малом» (по Ляпунову), если хотя бы один корень ее характеристического уравнения находится в правой части комплексной плоскости, т.е. имеет положительную вещественную часть. Именно в этом случае с течением времени амплитуда колебаний в линейной системе будет неограниченно нарастать.

Действительно, условие $K_{\text{НИН}} > 3$ легко переводится в условие, когда петлевое усиление $T = K_{\text{НИН}} \cdot A_0 > 1$, учитывая что передача цепи Вина на частоте «квазирезонанса» $A_0 = 1/3$.

Во временной области, когда колебания только начали нарастать, и их амплитуда мала, система – линейна. Коль скоро, за период колебаний энергия, вносимая в колебательную систему, больше теряемой энергии, то амплитуда колебаний нарастает и нас начинает интересовать закон такого нарастания.

3.2.3. По какому закону могут нарастать колебания в автогенераторе?

К сожалению, для решения этой задачи приходится составлять нелинейное дифференциальное уравнение, строгое решение которого в общем виде отсутствует.

Однако учитывая, что в автогенераторах обычно стараются использовать высокодобротные избирательные усилители, такое уравнение получается специфическим – с относительно малым коэффициентом a_1 (с малыми потерями, с малой диссипацией) при первой производной в дифференциальном уравнении второго порядка.

Такие уравнения получили название уравнений Ван дер Поля. Именно для этих уравнений разработан ряд методов приближенных решений и, в частности, метод медленно меняющихся амплитуд.

Аналитические выкладки можно значительно упростить, если заинтересоваться только видом переходного процесса вблизи момента

возникновения колебаний, когда еще можно воспользоваться линеаризованным дифференциальным уравнением.

Используя полученные в предыдущем разделе значения корней характеристического уравнения, зададимся получением ответа на вопрос: «Какой закон – колебательный или апериодический может наблюдаться в непосредственной близости к моменту возникновения колебаний?»

Когда $(a_1/2)^2 \ll (a_0)^2$, то корни комплексно сопряженные. В этом случае от начала возникновения колебаний переходный процесс развивается как колебательный на частоте, незначительно отличающейся от частоты «квазирезонанса» цепи Вина (конечно считая, что на этой частоте ОУ не вносит фазового сдвига, т.е. является идеальным). Однако, если декремент (подкоренное выражение корней характеристического уравнения) станет равным нулю, то, начиная с этого момента, процесс станет апериодическим.

Как нетрудно убедиться на основе простейших выкладок, это произойдет, когда коэффициент усиления по неинвертирующему входу $K_{\text{нин}}$ будет больше пяти. Ясно, что переходный процесс будет происходить по гармоническому закону с нарастающей по экспоненте амплитудой при условии, если $3 < K_{\text{нин}} < 5$. При усилении $K_{\text{нин}} > 5$ мы должны наблюдать апериодический закон нарастания.

Учитывая, что усиление $K_{\text{нин}}$ легко изменяется за счет вариации сопротивления потенциометра $R13$, мы можем попытаться пронаблюдать разницу в работе автогенератора в двух указанных выше режимах. По мере нарастания амплитуды гармонического напряжения во время переходного процесса, связанного с возникновением колебаний в автогенераторе, из-за влияния нелинейности коэффициент передачи по напряжению падает. С физической точки зрения последнее означает, что введение энергии в колебательную систему автогенератора также уменьшается. Очевидно, что стационарное значение выходного напряжения в автогенераторе наступит при равенстве вносимой и теряемой энергий за период генерируемых колебаний. Такая ситуация будет иметь место, если коэффициент a_1 при первой производной дифференциального или характеристического уравнений станет равным нулю. Таким образом, нарастание колебаний заканчивается в рассматриваемой схеме при условиях, когда наряду с балансом фаз выполняется условие баланса амплитуд:

$$K_{\text{нин}} = 3 \text{ или } K_{\text{нин}} \cdot A_0 = 1,$$

где $K_{\text{нин}}$ – передача неинвертирующего усилителя по напряжению по первой гармонике выходного напряжения.

3.2.4. К определению амплитуды установившихся колебаний

Выше отмечалось, что процесс установления стационарной амплитуды колебаний в автогенераторе обусловлен влиянием нелинейности, обязательно входящей в состав любого автогенератора. Из-за влияния нелинейности амплитудной характеристики схемы неинвертирующего включения ОУ по мере нарастания амплитуды гармонического колебания от периода к периоду возрастают нелинейные искажения выходного сигнала. Искажения формы сигнала особенно становятся заметными, если амплитуда выходного сигнала достигает предельных значений на амплитудной характеристике схемы на ОУ. В этом случае выходное напряжение имеет явные признаки двухстороннего ограничения (при симметричном питании ОУ).

Для определения стационарной амплитуды выходных колебаний необходимо теоретически или экспериментально получить, так называемую колебательную характеристику неинвертирующего усилителя, т. е. зависимость значения первой гармоники выходного напряжения (в общем случае несинусоидального – «квазисинусоидального») от значения входного гармонического напряжения. Мы трансформируем эту зависимость в виде $K_1 = f(U)$, где K_1 определяется как отношение значения первой гармоники выходного напряжения к входному гармоническому напряжению U , действующему на неинвертирующем входе ОУ.

В программно-аппаратной среде NI ELVIS измерение первой гармоники в спектре выходного напряжения более точно определяется с помощью анализатора спектра DSA.

Однако, при относительно малых значениях нелинейных искажений сигнала (коэффициента THD при использовании анализатора спектра DSA), меньших, например, 10 %, можно без существенной погрешности подменить измерение первой гармоники измерением среднеквадратического (действующего) значения (С.К.З.) выходного напряжения.

Таким образом, под K_1 в лабораторной работе мы будем подразумевать отношение С.К.З. (RMS) выходного напряжения к такому же значению входного. Чтобы не вносить дополнительной погрешности в измерение С.К.З. (RMS) напряжений из-за возможного присутствия в них постоянной составляющей, целесообразно определение значений проводить при закрытом входе осциллографа.

Экспериментальную зависимость $K_1 = f(U)$ получаем, проводя исследования неинвертирующего усилителя, как части автогенератора (рис. 3.101). Затем используя условие баланса амплитуд, определяем значение стационарной амплитуды $U_{ст}$, как координату точки пересече-

чения кривой колебательной характеристики и линией обратной связи $1/A_0 = 3$. Эти построения проведены на рис. 3.102.

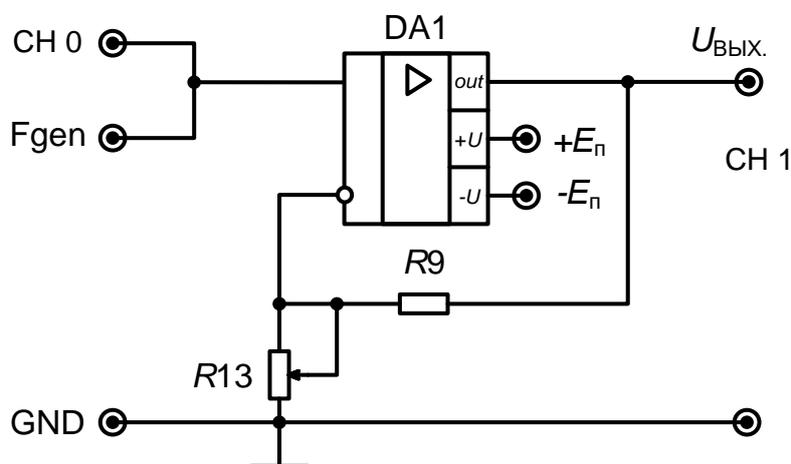


Рис. 3.101. Схема для снятия колебательной характеристики неинвертирующего усилителя автогенератора

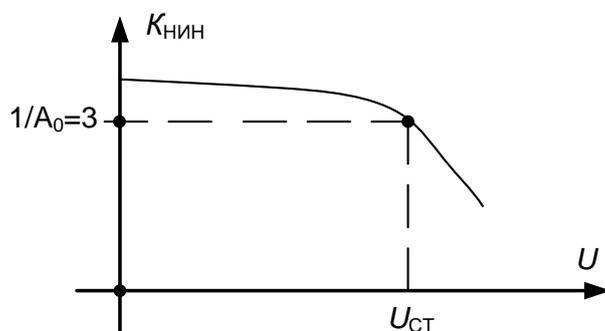


Рис. 3.102. Определение амплитуды стационарных колебаний

Обратим внимание, что при указанном виде колебательной характеристики полученное стационарное решение, как правило, является устойчивым. Действительно, если из-за любых дестабилизирующих факторов значение амплитуды U , например, уменьшится, то, возводя перпендикуляр в этой точке, получим значение усиления K_1 больше трех. Тогда петлевое усиление станет больше единицы, и создадутся условия увеличения напряжения до стационарного значения.

Аналогичные рассуждения можно провести для случая первоначального отклонения от стационарной амплитуды в большую сторону. Однако, если при работе автогенератора стационарная точка «проскаки-

вается», то стационарное решение является неустойчивым, а автогенератор работает в режиме прерывистой генерации.

3.2.5. Стабилизация амплитуды колебаний в автогенераторе

Более конкретно речь идет о стабилизации различных значений стационарных гармонических колебаний. Как известно, такими значениями могут быть амплитудное, действующее (среднеквадратическое), а также средне выпрямленное значения выходного напряжения автогенератора. При изучении устойчивости стационарного напряжения автогенератора было отмечено важное положение о том, что, если по каким-либо причинам напряжение уменьшилось (увеличилось), необходимо, чтобы усиление неинвертирующего усилителя автогенератора увеличилось (уменьшилось).

На этом основании можно сделать вывод: для стабилизации выходного напряжения необходимо, чтобы в схеме реализовывалась отрицательная производная коэффициента передачи усилителя по напряжению, т. е. стабилизация напряжения сопряжена с наличием контура отрицательной обратной связи.

Среди возможных технических реализаций отметим две: с использованием в обратной связи инерционно нелинейного элемента, как правило, малогабаритных ламп накаливания или термисторов или применением различных схем стабилизации с необходимым типом детектора (выпрямителя того или иного значения гармонического колебания) и регулятора на полевом транзисторе.

Примеры построения таких схем изображены на рисунках 3.103 и 3.104, соответственно.

Для схемы на рис. 3.103 механизм стабилизации действующего значения выходного напряжения состоит в следующем. Если по каким-либо причинам выходное напряжение уменьшится, то уменьшится ток в цепи отрицательной обратной связи, в том числе и ток, протекающий по лампе накаливания (ЛН). Как известно, при этом уменьшится ее сопротивление, а значит, и коэффициент отрицательной обратной связи. В свою очередь, это приведет к увеличению усиления усилителя, а, значит, и выходного напряжения.

Таким образом, уменьшение напряжения вызвало увеличение коэффициента усиления, т.е. в схеме реализована отрицательная производная коэффициента передачи усилителя по напряжению, что необходимо для целей стабилизации выходного напряжения.

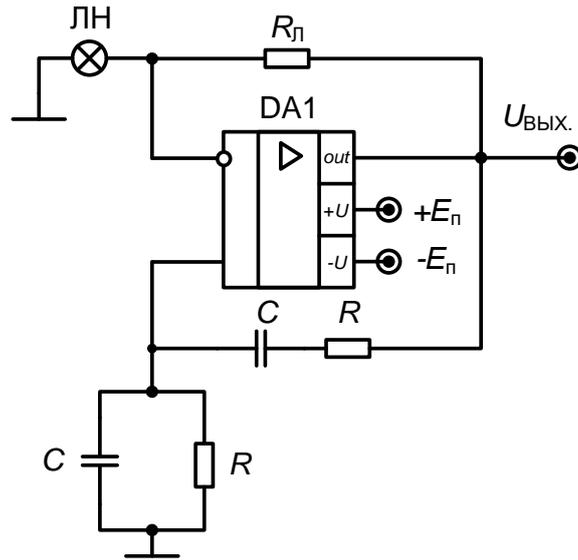


Рис. 3.103. Автогенератор с инерционной нелинейностью

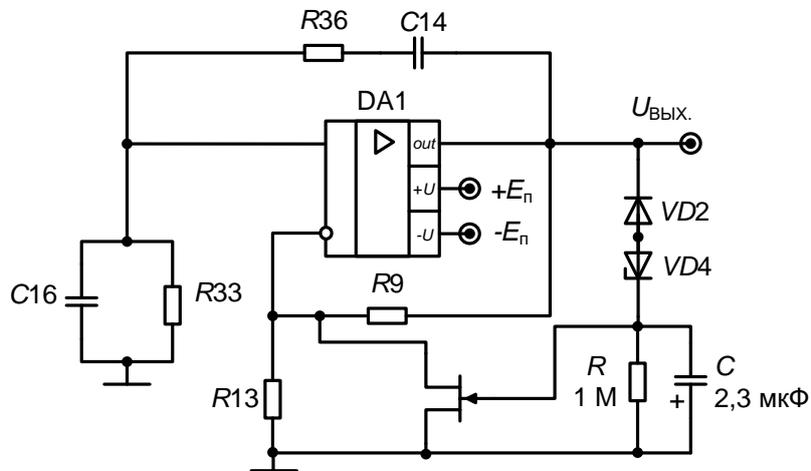


Рис. 3.104. Стабилизация напряжения с использованием регулятора на полевом транзисторе

Схема, показанная на рис. 3.104, в цепи отрицательной обратной связи содержит схему однополупериодного выпрямителя на $VD2$ для получения постоянной составляющей отрицательной полярности, которая за вычетом напряжения на стабилитроне $VD4$, управляет полевым транзистором, работающем в режиме электрически управляемого сопротивления, установленного в местную обратную связь неинвертирующего ОУ.

Стабилизация средне выпрямленного значения выходного напряжения происходит так. Если напряжение генератора уменьшилось, то уменьшилось постоянное напряжение на выходе выпрямителя и на затворе полевого транзистора. Полевой транзистор приоткрылся, сопро-

тивление его канала уменьшилось, что привело к уменьшению глубины обратной связи для ОУ и увеличению усиления неинвертирующего усилителя, а, значит, и выходного напряжения.

Начав рассуждения с уменьшения выходного напряжения мы, пройдя по цепи обратной связи, пришли к выводу, что схема стремится вернуть прежний уровень выходного напряжения.

4. Программа лабораторной работы

1.1. Исследование характеристик цепи Вина

Проводится, если не выполнялся п. 4.5 лабораторной работы № 4.2. «Функциональное применение операционных усилителей (линейные преобразования сигналов)».

Соберите схему для исследования характеристик цепи Вина с помощью анализатора Боде, изображенную на рис. 4.95.

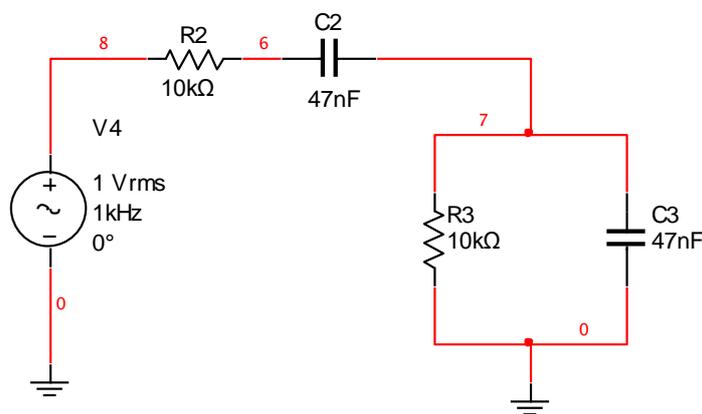


Рис. 4.95. Схема исследования АЧХ и ФЧХ цепи Вина

Проведите предварительно анализ цепи Вина. Определите частоту «квазирезонанса» RC -цепи по параметрам ее сопротивлений и емкостей. Найдите значения модуля и фазового сдвига передачи цепи на частоте «квазирезонанса». Теоретически определите добротность цепи по ожидаемому виду АЧХ и ФЧХ.

Используя методику частотного анализа (AC analysis) проведите анализ цепи Вина, начальное значение частоты установите равным 100 мГц, конечное значение частоты 1 МГц и число шагов за декаду изменения частоты, равное 10. Результаты анализа отображаются на плоттере, рис. 4.96.

По экспериментальным данным уточните частоту «квазирезонанса» избирательной цепи и определите ее добротность. Добротность определите следующим образом: по нулевому фазовому сдвигу на ФЧХ

уточните частоту «квазирезонанса» и значение передачи цепи в децибелах на этой частоте.

Затем от полученного значения отнимите 3 дБ и определите нижнюю и верхнюю частоты полосы пропускания цепи, а потом и саму полосу, как разность полученных значений. Добротность приблизительно определяется как отношение частоты «квазирезонанса» цепи к полосе ее пропускания. Совпали ли у Вас теоретические и экспериментальные данные? Сделайте выводы по проделанному исследованию.

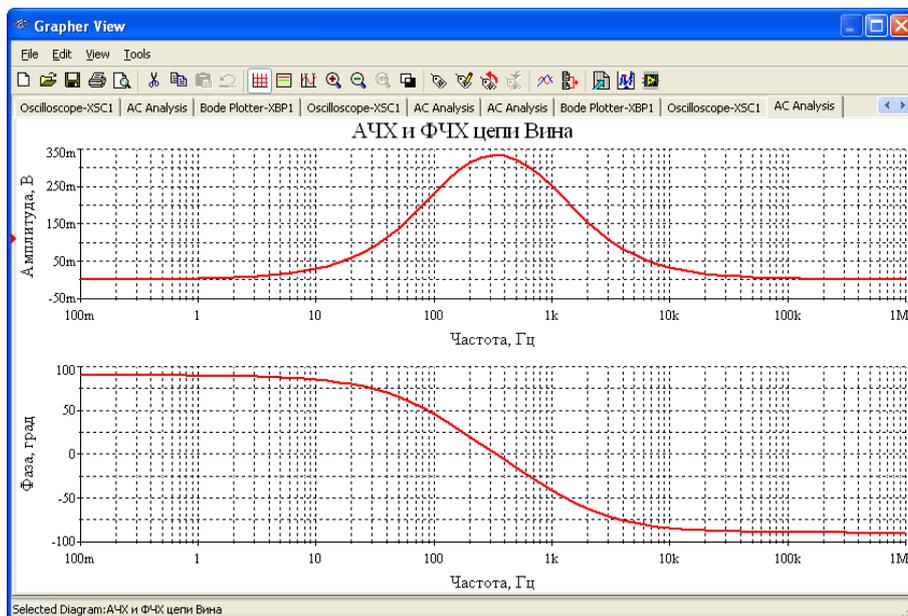


Рис. 4.96. АЧХ и ФЧХ цепи Вина

1.2. Исследование автогенератора гармонических колебаний

1.2.1. Исследование условий возникновения колебаний

Соберите схему для исследования моста Вина, изображенную на рис. 4.97.

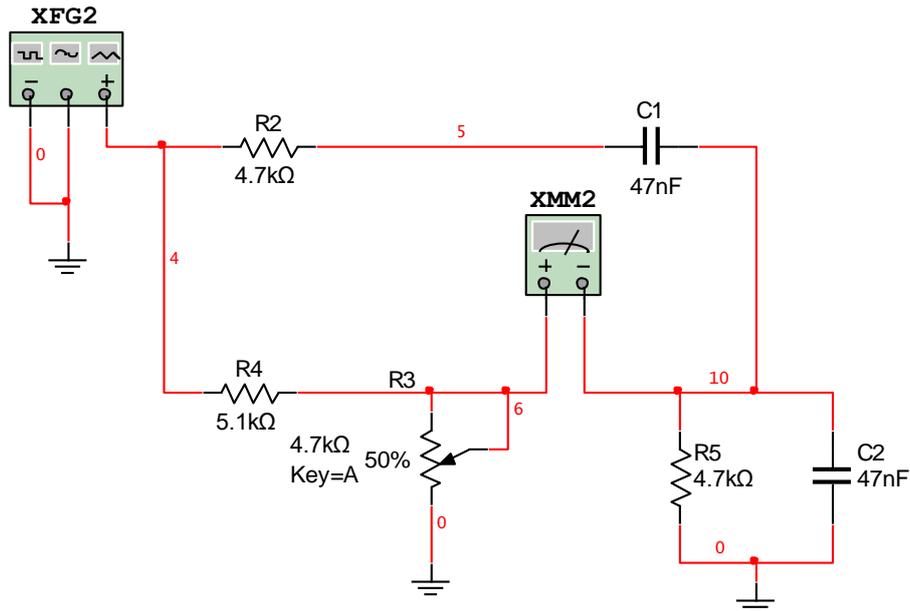


Рис. 4.97. Мостовая схема в RC-автогенераторе

Проведите сопротивление потенциометра R_3 , найдите и запомните положение движка потенциометра R_3 , когда его сопротивление составляет половину сопротивления R_4 и усиление неинвертирующего усилителя будет равно 3. Найдите также и запомните положение движка потенциометра, когда сопротивление R_4 в четыре раза больше сопротивления R_3 и коэффициент усиления неинвертирующего усилителя станет равным 5. Установите также направление вращения движка потенциометра, при котором, например, его сопротивление увеличивается.

Установите у мультиметра режим измерения напряжения переменного тока.

Установите на генераторе, значение рассчитанной ранее частоты «квазирезонанса» для цепи Вина и амплитуду 2,5 В гармонического напряжения.

Установите движок потенциометра R_3 в положение, когда его сопротивление примерно составляет половину сопротивления R_4 , а затем, вращая движок, сбалансируйте мост. Зафиксируйте значение минимального напряжения. Почему оно не равно нулю? Совпало ли положение движка с исходным положением (в начале пункта). Отметьте, что разбалансировка моста приводит к увеличению выходного напряжения моста и к изменению его фазы на инверсное значение.

Проверьте, что при балансе моста напряжение на выходе цепи Вина и резистивного делителя составляет определенную долю (какую?) от входного напряжения, получаемого с генератора. Чтобы выполнить этот

пункт, измените схему: вывод «←» мультиметра заземлите, а вывод «+» подсоединяйте поочередно к входу и к одному или другому выходу моста. Чтобы произвести одновременные измерения добавьте второй мультиметр в схему. Полученные данные зафиксируйте и сравните их с теоретическими значениями.

1.2.2. Исследование разомкнутой системы автогенератора, получение условий возникновения колебаний в автогенераторе

Для исследования условий возникновения колебаний по поведению АЧХ и ФЧХ петлевого усиления разомкнутой системы соберите схему, изображенную на рис. 4.98.

Установите движок потенциометра $R7$ в положение, когда его сопротивление больше половины сопротивления $R10$, т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя меньше 3.

С помощью методики частотного анализа (AC analysis) проведите анализ цепи Вина, начальное значение частоты установите равным 1 Hz, конечное значение частоты 100 kHz и число шагов за декаду изменения частоты, равное 10.

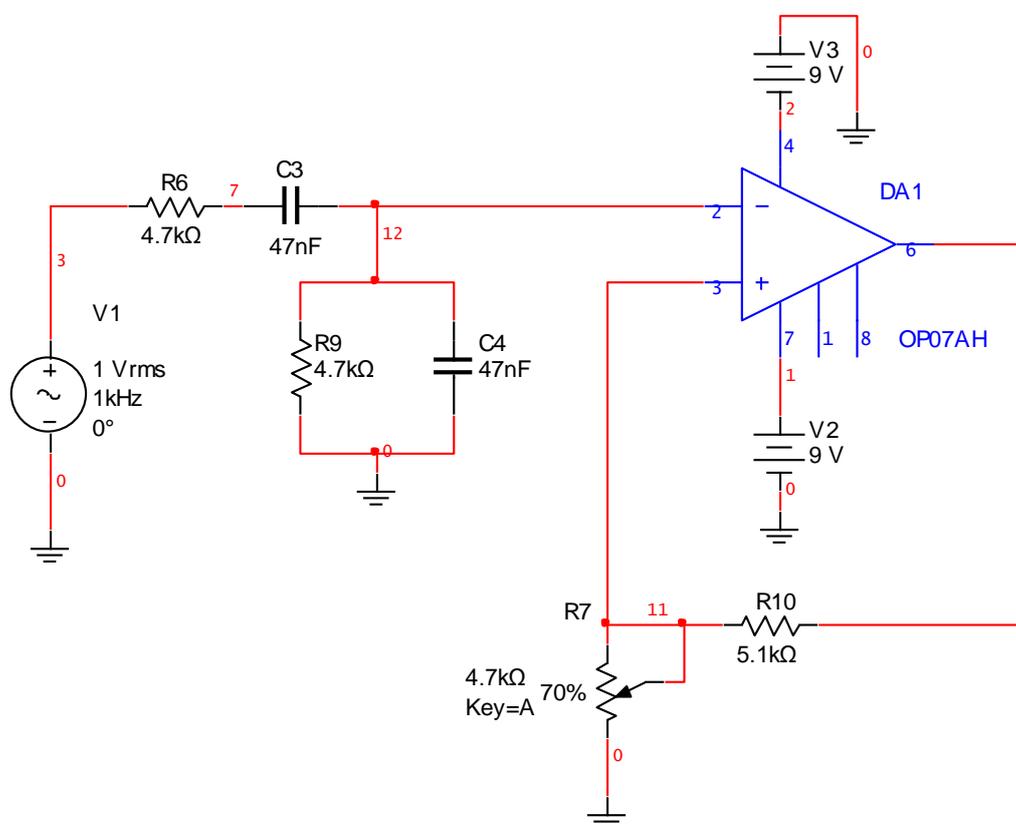


Рис. 4.98. Схема для исследования АЧХ и ФЧХ петлевого усиления разомкнутой системы автогенератора

На полученной ФЧХ по нулевому фазовому сдвигу определите частоту «квазирезонанса», а затем на этой частоте переместитесь на АЧХ петлевого усиления и определите его значение. Если это значение меньше единицы, то, несмотря на выполнение условия баланса фаз, при замыкании петли обратной связи генерация колебаний будет отсутствовать, так как не выполняются необходимые амплитудные соотношения.

Переберите схему, замкнув цепь положительной обратной связи, т.е. соберите схему автогенератора, изображенную на рис. 4.99. Запустите симуляцию и убедитесь в отсутствии колебаний.

Вернитесь снова к схеме рисунка 4.98, но положение движка потенциометра поставьте так, чтобы его сопротивление $R7$ было чуть-чуть меньше половины сопротивления $R10$, т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя был бы немного больше 3.

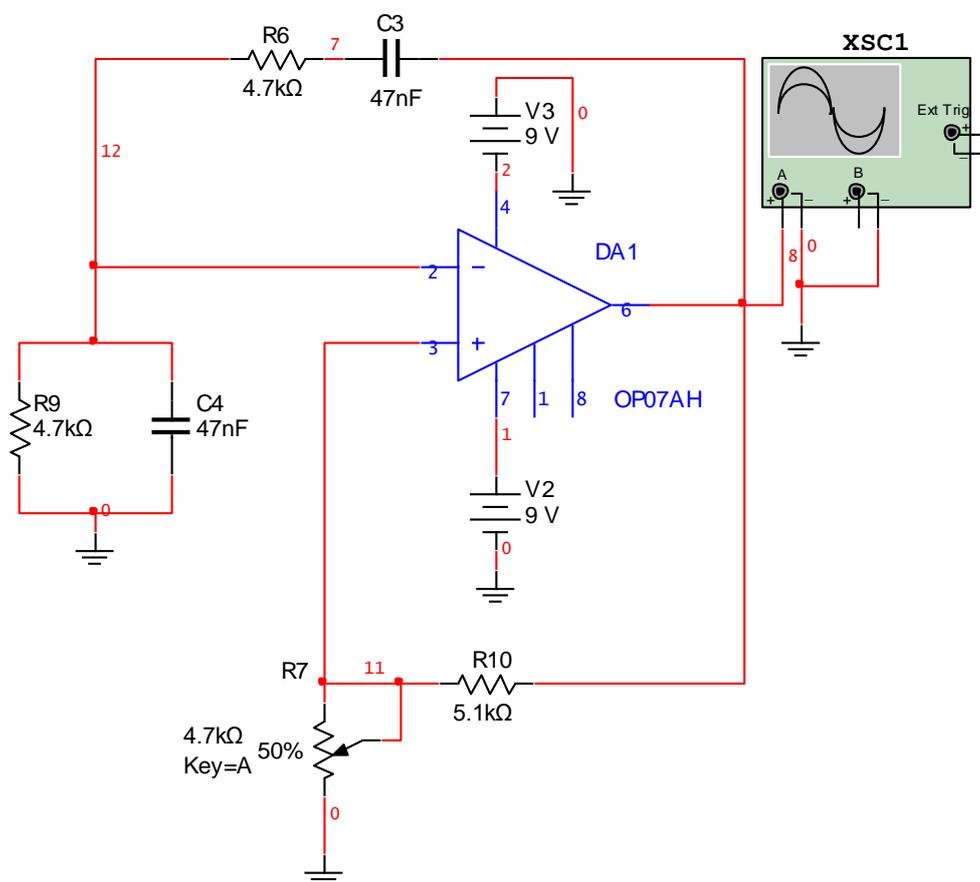


Рис. 4.99. Автогенератор синусоидальных колебаний с цепью Вина

Далее проделайте аналогичные действия с частотным анализом, а затем соберите схему автогенератора (рис. 4.99) и включите осцилло-

граф. Почему генератор заработал? Попробуйте уменьшить искажения в выходном сигнале. Что при этом получается?

Снова вернитесь к схеме на рис. 4.98, но положение движка потенциометра поставьте так, чтобы его сопротивление $R7$ было равно чуть меньше одной четверти сопротивления $R10$, т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя был бы немного больше 5.

Проделайте аналогичные действия, как в предыдущих пунктах. Сформулируйте выводы по выполненному разделу.

1.2.3. Определение стационарной амплитуды колебаний автогенератора

Соберите схему, изображенную на рис. 4.100. Положение движка потенциометра поставьте так, чтобы его сопротивление $R7$ было чуть-чуть меньше половины сопротивления $R10$, т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя был бы немного больше 3.

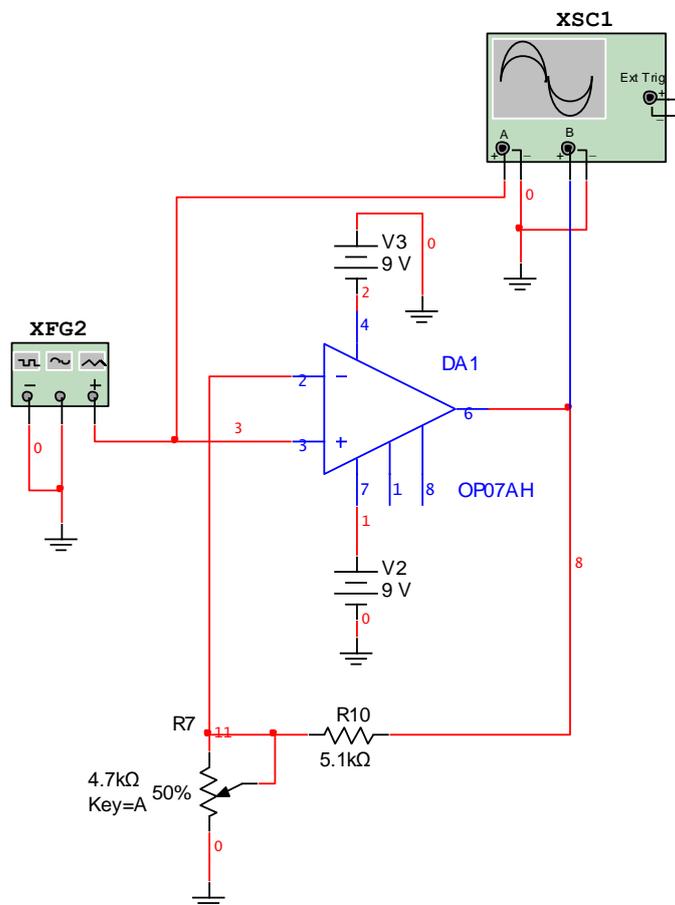


Рис. 4.100. Схема для снятия колебательной характеристики неинвертирующего усилителя автогенератора

Установите на генераторе частоту гармонического сигнала, равную (близкую) к частоте «квазирезонанса» цепи Вина. Входы обоих каналов осциллографа закройте, т.е. переведите в режим АС.

Получите данные исследуемой характеристики, изменяя амплитуду входного напряжения генератора от 0,2 до 2,4 В через 0,2 В.

Для каждого уровня входного напряжения регистрируйте действующее значение входного и выходного напряжений, используя измерители осциллографа, а затем рассчитывайте коэффициент усиления как отношение полученных значений. Разработайте вид таблицы, внесите в нее данные, а потом по ним постройте график.

Определите по колебательной характеристике действующее значение выходного напряжения, используя линию положительной обратной связи, которая определяется коэффициентом передачи цепи Вина на частоте «квазирезонанса».

Переберите схему, замкнув цепь положительной обратной связи, т.е. соберите схему автогенератора, изображенную на рис. 4.99. Для наблюдения и измерения действующего значения выходного напряжения используйте осциллограф в режиме АС. Сравните значения выходного напряжения, полученные в этом и предыдущем пунктах. Сделайте выводы.

5. Контрольные вопросы.

5.1. Докажите, из каких частей должен состоять любой автогенератор синусоидальных колебаний.

5.2. Каким образом экспериментально определяются частотные свойства цепи Вина? Приведите схему и алгоритм исследования.

5.3. Аналитически определите выражения для АЧХ и ФЧХ цепи Вина. Чему равна эквивалентная добротность этой RC -цепи?

5.4. Каким образом экспериментально определяются частотные свойства избирательного усилителя на цепи Вина? Приведите схему и алгоритм исследования.

5.5. Докажите, что в анализируемой схеме автогенератора выполняется условие баланса фаз.

5.6. Составьте дифференциальное уравнение схемы анализируемого автогенератора.

5.7. Сформулируйте условия возникновения автоколебаний на основе анализа дифференциального и характеристического уравнений, описывающих работу автогенератора.

5.8. Рассчитайте значение сопротивления R_{13} , приводящее к возникновению колебаний в схеме. Поясните Вашу последовательность действий по определению такого положения движка потенциометра R_{13} .

5.9. Поясните, каким образом с использованием анализатора Боде будет определена частота «квазирезонанса» при исследовании АЧХ и ФЧХ петлевого усиления разомкнутой системы автогенератора.

5.10. Сформулируйте, как ведет себя схема автогенератора, когда проводится эксперимент с разными положениями движка потенциометра R_{13} .

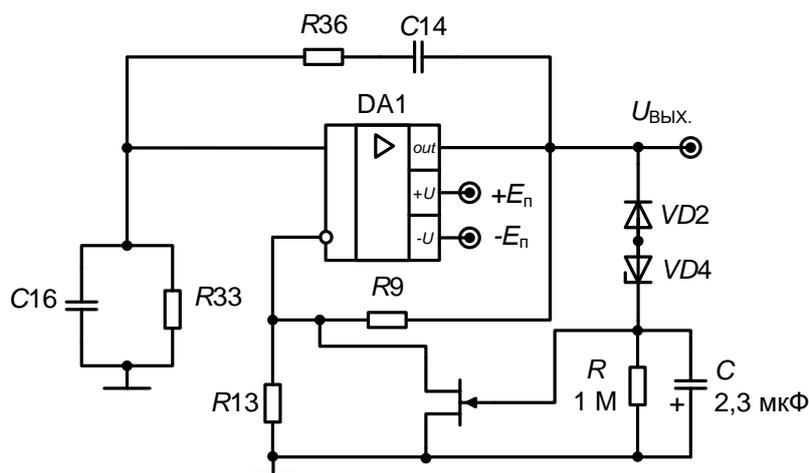
5.11. Докажите, что состояние после включения автогенератора будет неустойчивым, если анализ его дифференциального уравнения фиксирует наличие хотя бы одного корня характеристического уравнения, находящегося в _____ части комплексной плоскости.

5.12. Поясните, почему при анализе переходного процесса и определения установившихся значений колебаний в автогенераторе обязательно должна учитываться нелинейность.

5.13. Каким образом в ходе лабораторной работы определяется колебательная характеристика усилителя автогенератора.

5.14. Как, используя колебательную характеристику усилителя автогенератора, определить амплитуду установившихся колебаний.

5.15. Определите условия, при которых в автогенераторе устанавливается стационарный режим работы.



5.16. Проанализируйте работу схемы, приведенную выше. Поясните формирование отрицательной производной коэффициента передачи неинвертирующего усилителя автогенератора от уровня выходного напряжения, которое необходимо для стабилизации его амплитуды.

6. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схемы проведенных экспериментов;
- результаты (таблицы, графики, заключения);
- выводы.