1. СОДЕРЖАНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА.

***1.1****. Общая структура ПЗ.*

Порядок следования информации в пояснительной записке (далее **ПЗ**) должен находиться в строгом соответствии с порядком, изложенным в данном разделе.

1.Титульный лист

2. Содержание (*страницы должны быть пронумерованы!!!*).

3. Исходные данные и цель работы.

4. Структура и свойства выбранного типа ООС (указать какого именно).

5. Общая структура разрабатываемого устройства с учетом типа ООС.

6. Предварительный анализ исходных данных.

7. Выбор конфигурации, конкретная структура, принципиальная схема (чертеж).

8. Расчетная часть (*все формулы должны быть пронумерованы!!!*).

9. Результаты проверки в программе EWB.

10. Заключение.

11. ПРИЛОЖЕНИЯ.

СХЕМА УСИЛИТЕЛЯ.

ТАБЛИЦА 1. ПЕРЕЧЕНЬ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЯ

ТАБЛИЦА 2. ПЛАН ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УСИЛИТЕЛЯ

ТАБЛИЦА 3. ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ

*Примерное содержание отдельных частей ПЗ.*

***1****.****2*** *Титульный лист и Содержание* с №№ страниц – без пояснений!!!

***1.3****. Исходные данные и цель работы*.

Исходные данные – из варианта. Отметить, какие дополнительные исследования нужно провести для получения полного комплекса исходных данных.

Цель работы – создание (чего?) с дополнительными свойствами (какими?), которые должна обеспечить ОС.

***1.4.*** *Структура и свойства выбранного типа ООС.*

Привести рисунок структуры, общее уравнение ООС данного типа, основные свойства.

***1.5****. Общая структура разрабатываемого устройства*.

Структурная схема представляется в виде последовательности прямоугольных блоков с описанием функционального назначения каждого блока.

В данном разделе должно быть:

* обоснование количества каскадов, необходимых для реализации выбранного типа ООС,
* *ожидаемые* свойства усилителя на входе и выходе под влиянием ООС,
* точки подключения входа и выхода цепи ООС,
* конкретизации типа каскадов еще не нужно (почему?).

***1.6.*** *Предварительный анализ исходных данных.*

Анализ сводится к определению параметров модуля источника сигнала. Провести этот анализ можно только в файле с модулем, который в дальнейшем будет использован для построения схемы усилителя. В разделе должны быть представлены *схема* анализа и полученные *результаты*. Схема просто рисуется, результаты – в произвольной форме:

* на схеме указываются названия ключей и приборов,
* в тексте указывается режимы измерения (ключи) и формулы (приборы),
* формулы нумеруются, на №№ делается ссылка: Таблица 3, ПРИЛОЖЕНИЕ 2
* раздел заканчивается определением значения **KU.NOM** (см. п.2.2.1).

***1.7****. Выбор конфигурации, конкретная структура принципиальная схема.*

Принципиальная схема строится путем подстановки типовых схемных решений (каскадов) вместо типовых структурных блоков. Выбор схемных решений производится с учетом требуемых показателей, исходных данных и результатов предварительного анализа. Особое внимание обращается на условия согласования каскадов, особенно на входе/выходе. Обязательно должно быть хотя бы краткое обоснование выбора, которое основано на исходных данных и результатах предварительного анализа.

Раздел завершается чертежом принципиальной схемы.

***1.8.*** *Принципиальная схема.*

***1.8.1****. Требования к обозначениям в принципиальной схеме.*

В любом варианте схема будет содержать три каскада. Индексация транзисторов начинается от входа (слева) VT1, VT2, VT3.

Резисторы в схемах имеют двух- или трехзначный индекс:

1-й символ буква – имя вывода транзистора – E, B, C для БТ, S, G, D для ПТ.

2-й символ цифра – индекс транзистора – RE2, RC1 и т.д.,

3-й символ цифра – для выводов, в цепях которых по два резистора: RB21 – первый (верхний) резистор в базовой цепи VT2, RE12 – второй (нижний) резистор в цепи эмиттера VT1 и т.п.

Индексы разделительных конденсаторов – по принадлежности к каскадам.

Индексы блокирующих конденсаторов – как у соответствующего резистора.

 ***1.8.2.*** *Требования к оформлению схемы (пример – ПРИЛОЖЕНИЕ 3)*.

Вообще-то, чертеж схемы положено создавать "вручную" или, по крайней мере, в графическом редакторе (на мой взгляд, лучше всего MS Visio).

Но схему все равно придется создавать в EWB и предъявлять для проверки расчетных данных. В схеме EWB должны быть жестко соблюдены следующие условия:

* через метки *(labels)* элементам задаются имена: Re1, С1, VT1 и т.п.
* у элементов отображаются только имена (*labels*) и значения (*values*),
* порядковые имена (*reference ID*) скрываются,
* управление отображением: Свойства → Display,
* отображение для приборов также через *метки* (l*abels*): рV1, pV2 и т.п.
* отображения для ключей только *значения* (v*alues*) – это управляющие буквы.

Дополнительные требования для файла (обязательно!):

* шрифт – ***черный, жирный, 14pt***.
* все линии выровнены, элементы и надписи не "наезжают" друг на друга – схема выглядит, как на *нормальном* чертеже, образцы в ПРИЛОЖЕНИИ 3.

Представление в ПЗ:

* выполняются все вышеуказанные условия,
* исполнение – лист А4 в *альбомной* ориентации,

***1.9.*** *Расчетная часть.*

***1.9.1.*** *Общие требования.*

Это основная часть ПЗ, в которой должны быть рассчитаны:

* номиналы всех резисторов,
* положение рабочей точки в каждом каскаде: IC.OP, UC.OP (ID.OP, UD.OP),
* показатели работы каждого каскада,
* показатели работы усилителя в целом с отключенной/подключенной ООС,
* расчетные отклонения от требуемых значений.

В разделе производятся расчеты для *одной и той же схемы*, содержащей каскады усиления и цепь ООС, в двух вариантах – для отключенной и подключенной цепи ООС.

Порядок вычислений описан в пп.4.

Расчетная часть не должна состоять просто из последовательности формул!

Общий принцип составления ПЗ (отчета, технического описания и т.п.) – сущность действий и их результатов должна быть понятна не только составителю задания (т.е. мне, да и то не всегда) и его исполнителю (т.е. Вам, и тоже не всегда!), а *любому* человеку с соответствующим уровнем образования.

***1.9.2.*** *Обязательные дополнительные требования****.***

Каждая формула – для номинала элемента, физической величины (I, U или R), показателя работы – должна иметь свой номер. Если величина не рассчитывается, а просто выбирается в определенном диапазоне, тоже должен быть свой номер.

Номер формулы + значение заносится в соответствующие ячейки Таблиц 1, 3.

***1.10****. Работа с программой EWB – проверка.*

Это основной этап сдачи работы. Действия проводятся те же, что и в Л.Р.№№1 ÷ 3. Их подробное описание в пп.5.

***1.11.*** *Заключение.*

Заключительные выводы должны быть основаны:

* на характере совпадения расчетных и экспериментальных данных
* на оценке отклонений и стабильности коэффициента усиления.

***1.12****. Приложение.*

Приложение содержит Таблицы 1÷3 и чертеж схемы усилителя.

Условия приема работы к рассмотрению, действия при ее сдаче и комплекс знаний, необходимых для защиты – в отдельных документах.

*2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ, РАСЧЕТНЫЕ И ИЗМЕРЯЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ.*

***2.1****. Исходные данные.*

***2.1.1****. Первичные исходные данные.*

Исходные данные для каждого варианта:

* модуль с источником сигнала, напряжение питания ЕС,
* типы БТ и ПТ (ПТ, если понадобится),
* *эффективное* значение выходного напряжения **uNOM** – на приборе EWB

***2.1.2.*** *Вторичные исходные данные*

Первое же действие при выполнении К.Р. – анализ источника сигнала в EWB с определением значений **ESS** и **RSS**.

Следующее действие – определение значения **KU.NOM**, подробнее в **пп.2.2.1**.

Критерии проверки качества работы – относительные отклонения см.**пп.2.4**.

***2.1.3.*** *Обозначения коэффициентов усиления и относительных отклонений.*

*Номинальные значения* определяются только исходными данными и *непосредственными* расчетами на их основе, только у них присутствует индекс "NOM".

У *коэффициентов усиления* наличие/отсутствие индекса "ОС" соответствует работе усилителя при замкнутой/разомкнутой цепи ООС.

Все обозначения относятся, как к расчетным, так и измеряемым величинам.

KU**0**(OC) – коэффициент усиления при отключенной нагрузке,

KU**H**(OC) – коэффициент усиления при подключенной нагрузке,

*Выходные напряжения* не имеют дополнительных индексов "ОС", т.к. локальные значения определяются индексом KU, а глобальные еще и режимом выходной цепи

* uOUT(XX) – выходное напряжение при отключенной нагрузке,
* uOUT(H) – выходное напряжение при подключенной нагрузке,

*Относительные отклонения* (подробно в пп.2.4)

 – *общее* отклонение KU0.OC от KU.NOM из-за конечной глубины ООС,

 – *локальное* отклонение KUH.OC от KU.NOM из-за подключения нагрузки,

 – *локальные* потери uIN по сравнению с ESS из-за конечных RIN, RSS,

 – *общее* отклонение uOUT(XX) от uNOM,

 – *общее* отклонение uOUT(Н) от uNOM,

***2.2****. Расчетные величины.*

***2.2.1.*** *Номинальный коэффициент усиления.*

Требуемое значение KU.NOM определяется по формуле

  (2.1)

Это же значение (не завышенное!!!) принимается в качестве значения, которое определяется цепью ОС усилителя при условии бесконечной глубины

  (2.2)

βОС – коэффициент ОС, определяется только параметрами цепи ООС, конкретное выражение должно быть известно.

***2.2.2****. Коэффициент усиления при разомкнутой цепи ООС*.

Во всех вариантах усилитель получится трехкаскадным, т.е. общее значение KU при разомкнутой цепи ООС

 (2.3)

У всех каскадов значение KU определяется с учетом нагрузки:

* для 1-го каскада RH1=RIN.2,
* для 2-го каскада RH2=RIN.3,
* для 3-го каскада RH3=RОС,

***!!!*** Цепь ООС действует только по переменному току, т.к. последовательно с ROC включается конденсатор COC. На режим DC выходного каскада цепь ОС влиять не должна.

***2.2.3****. Коэффициенты усиления при замкнутой цепи ООС*.

Согласно общему уравнению ООС:

 (2.4)

В соответствии с ранее принятым в (2.2)

 (2.5)

Аналогия с параллельным соединением приведена не случайно:

* значение KU.NOM однозначно определяется из исходных данных,
* значение KU0.OC получится в результате расчета двух состояний усилителя,
* если окажется, что KUO >> KU.NOM, то получится KU0.OC ≈ KU.NOM!!!

При определении значения KU0.OC условия на входе/выходе усилителя считаются идеальными, т.е. RSS=0, RH → ∞.

Условие на выходе RH → ∞ реализуется очевидным образом.

Условие на входе RSS=0 не реализуемо нигде, кроме программы:

* отключить от усилителя SS с сохранением рабочего состояния нельзя,
* источников RSS=0 в природе не существует.

Однако измерить значение KU0.OC очень просто – Рис.2.1. При подключенной нагрузке коэффициент усиления будет называться KUH.OC.



Рис.2.1. Структура усилителя, как объекта измерений.

***2.2.4.*** *Выходное сопротивление****.***

Взависимостиот выбранной структуры на входе и на выходе могут оказаться каскады различного типа. Влияние ООС на ROUT не зависит от типа каскада

 (2.6)

*Вывод:* Чем больше глубина ООС, тем меньше значение ROUT.OC, т.е. тем меньше подключение нагрузки влияет на значение KU.OC.

***2.2.5.*** *Входное**сопротивление****.***

В "чистой" теории, не реализуемой в большинстве практических схем должно быть

 (2.7)

Вне зависимости от типа входного каскада *такого сильного* влияния не будет:

* влияния может вообще не быть (в каком случае? почему это не страшно?),
* влияние будет гораздо слабее, чем в (2.7) (почему этого нельзя избежать?).

*Выводы:*

* ООС может вообще не влиять на значение RIN.OC, но это почему-то (?) совсем не страшно,
* ООС может влиять на значение RIN.OC гораздо слабее, чем в (2.7), тем не менее с увеличением глубины ООС RIN.OC растет и потери на входе падают.

***2.3.*** *Измеряемые величины.*

***2.3.1****. Коэффициенты усиления.*

***!!!*** Структура, приведенная на Рис.2.1, обязательно должна быть в графическом материале ПЗ. в ней имеются все органы управления, которые должны быть в представленной для сдачи схеме. Назначение ключей S2 ÷ S4 должно быть известно.

Назначение ключа S1 – переключение между источниками сигнала:

* модули SS выдают сигналы в единицы мВ и предназначены для работы с замкнутой цепью ООС, их напряжение не регулируется,
* напряжение источника Е0 при проверке схемы для всех вариантов устанавливается в пределах 10мкВ; он предназначен для работы с разомкнутой цепью ООС, почему так – решите самостоятельно,

*Рекомендация:* Сразу же опишите в ПЗ все возможные режимы измерения, которые могут понадобиться при исследовании схемы; для трех значений KU, указанных в пп.2.2.2. и пп.2.2.3, это вообще обязательно!

***2.3.2.*** *Входное и выходное сопротивление*.

Входное и выходное сопротивление определяются без амперметров с учетом известных значений RSS и RH.

 (2.8)

  (2.9)

Что такое UOUT(XX) и UOUT(H) в (2.9) и как их измерить – определить самостоятельно.

***2.4.*** *Критерии проверки качества работы – относительные отклонения.*

Обязательные к выполнению правила:

* значение KU.NOM определяется из (2.1),
* параметры цепи ООС соответствуют значению KU.NOM.

Даже при *отлично выполненной* работе значение KU0.OC, и тем более, KUH.OC будут *меньше*, чем значение KU.NOM.

Критерий качества работы количественный и вполне определенный – отклонения не должны превышать установленные допуски!

***2.4.1****. Конечная глубина ООС*.

Источник отклонения – (2.5). Чем лучше соблюдается условие KU0 >> KU.NOM, тем меньше будут различаться значения KU.NOM и KU0.OC.

 (2.10)

Задача расчета – правильно выбрать конфигурацию усилителя и обеспечить такое большое значение KU0, чтобы это отклонение не превышало определенного значения.

***2.4.2.*** *Подключение нагрузки на выходе*.

Источник отклонения виден при другой записи (2.9)

 (2.11)

 (2.12)

*Выводы:*

* источник уменьшения UOUT(XX), а, следовательно, и KU0.OC – это подключение RH, т.е. вообще не зависит от наличия/отсутствия цепи ООС,
* чем больше глубина ООС (KU0 >> KU.NOM), тем меньше значение 

***2.4.3.*** *Потери при подключении источника сигнала*.

Источник отклонения виден при другой записи (2.8)

 (2.13)

 (2.14)

*Выводы:*

* *источник* потерь вообще не зависит от наличия ООС,
* чем больше глубина ООС (KU0 >> KU.NOM), тем меньше *величина* потерь,
* в каскадах определенного типа (какого?) величина потерь не зависит даже от глубины ООС, но при этом может быть сделана очень малой,
* потери проявляются не в *уменьшении* *коэффициента усиления* собственно усилителя, а в *уменьшении выходного напряжения* uOUT по сравнению с **uNOM**.

***2.4.4****. Пользовательские оценки показателей усилителя*.

Еще раз проделаем путь получения значения KU.NOM:

* по данным варианта непосредственно имели значение uOUT=uH.NOM,
* после анализа источника сигнала получили uIN.NOM=ESS,
* очевидным путем получили требуемое значение KU.NOM.

Если бы был создан усилитель с бесконечной глубиной ООС, т.е. KU0 → ∞, то мы получили бы результаты:

из (2.4) или то же самое из (2.5)

 (2.15)

из (2.6) и (2.12)

 (2.16)

из (2.7) и (2.14)

 (2.17)

И в общем результате:

 (2.18)

В рамках предлагаемой структуры создать такой усилитель *невозможно*, впрочем, это *невозможно вообще*. Даже в современных ОУ, в которых значения KU0 > 105, все отклонения существуют, но настолько малы, что делаются практически незаметными.

Задача К.Р. спроектировать усилитель, чтобы все отклонения и потери уложились в заданные допуски. А конечный результат для пользователя – уменьшение значения uOUT по сравнению с ожидаемым значением uNOM.

 (2.19)

Следующее значение является контрольным показателем; если *это значение не укладывается в допуски*, то применение **пп.2.4.5**. является безусловным.

 (2.20)

При измерении коэффициента усиления значения (2.10) и (2.20) должны совпадать.

***2.4.5.*** *Допуски на значения отклонений.*

Рассчитывать и/или определять по показаниям приборов нужно *все* значения отклонений – всего их пять: (2.10), (2.12), (2.14), (2.19), (2.20).

**Главным допуском является значение  (2.19)!!!**

***!!!*** При правильно выполненной работе все остальные могут быть *только меньше*.

Получение в расчетах любого отклонения, большего чем , означает явную ошибку в расчетах, с которой работу сдавать нельзя! Подумайте сами, почему это так!

Допуск на значение  – дифференцированный:

* для оценки "отлично": ,
* для оценки "хорошо": ,
* для оценки "удовлетворительно": .

***!!!*** Указанные значения – это *необходимые*, а не *достаточные* условия получения соответствующей оценки

*Подсказка-рекомендация:* Если после полного расчета усилителя значение KU0 из (2.3) получилось **менее, чем ~ в 20 раз** больше значения KU.NOM (> 5%), то сомнительно, что значение  выйдет даже на уровень "удовлетворительно".

***3.*** *ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ УСИЛИТЕЛЯ*

***3.1****. Общая структура усилителя.*

Численные значения исходных данных к заданию практически на 100% определяют необходимость построения трехкаскадной схемы – Рис.3.1.



Рис.3.1. Структура усилителя, как многокаскадного устройства

Никаких указаний по типу того или иного каскад для конкретных вариантов не приводится – только особенности различных типов.

***3.2****. Предварительный анализ возможного состава структуры усилителя.*

Как известно, если не учитывать частотных и линейных свойств, то усилительный каскад может быть характеризован тремя показателями: KU0, RIN, ROUT. Каскад каждого типа имеет определенные диапазоны для каждого из этих значений. В процессе проведения Л.Р№№1-3 и C.Р.№1,2 примерные *порядки значений* показателей работы для каждого типа каскада должны быть уже известны.

В пояснительной записке *обязательно* провести обоснование выбранной комбинации каскадов. Основанием для выбора данными является сочетание исходных данных к проекту (каких?) и ожидаемые значения показателей работы выбранных каскадов.

В исходные данные проекта входят также необходимые параметры БТ/ПТ и параметры источника сигнала, которые определяются по соответствующим файлам EWB.

***3.3****. Основные показатели работы усилительных каскадов.*

***3.3.1****. Принципиальные схемы каскадов с ОЭ – Рис.3.2.*



Рис.3.2. Принципиальные схемы каскадов с ОЭ.

ООС оказывает влияние только на RIN входного каскада и ROUT выходного каскада; на показатели промежуточного каскада ООС не влияет.

***1.*** *Входное сопротивление* RIN; порядки RIN приведены из расчета h21E≈300, в вариантах могут встречаться БТ с значениями h21E в пределах (200 ÷ 600).

* каскад ОЭ-1 (почему стоит знак"?") – до 10kΩ
* каскад ОЭ-2 – (1 ÷ 2)kΩ,
* каскад ОЭ-3 – (3 ÷ 5)kΩ,

Влияние ООС:

* каскад ОЭ-1 – увеличивает до значения ~RBD,
* каскад ОЭ-3 – увеличивает до значения ~(0.8 ÷ 1.0)⋅RBD,
* к каскаду ОЭ-2 ООС не подключается.

***2****. Коэффициент усиления*

* каскад ОЭ-1 – меньше 10,
* каскад ОЭ-2 – самое большое, вплоть до ~400,
* каскад ОЭ-3 – не более ~ 100.

*!!!* Значения KU приведены без учета того, что каждый каскад имеет нагрузку, которая снижает реальное значение не менее, чем в два раза.

***3.*** *Выходное сопротивление* ROUT у всех типов - ~ RC

Влияние ООС – снижает в соответствии с (2.6).

***!!!*** Решение о том, какой тип каскада может вообще занимать определенное место в структуре на Рис.3.1 решается самостоятельно.

***3.3.2****. Принципиальные схемы каскадов с ОИ и ОК – Рис.3.3.*



Рис.3.3. Принципиальные схемы каскадов с ОИ и ОК (ЭП).

ООС оказывает влияние только на RIN входного каскада и ROUT выходного каскада.

***1.*** *Входное сопротивление* RIN;

* каскад ОИ-1, ОИ-2 – RIN≈RG,
* каскад ОК-2 – десятки kΩ,

ООС не влияет на RIN, несмотря на совершенно различный тип каскадов и по совершенно различным причинам. Эти причины нужно знать!

*Рекомендация:* Минимально возможное значение RG определяется в самом конце расчета, так, чтобы получить значение  из (2.14) < 1%.

***2****. Коэффициент усиления*

* каскад ОИ-1, ОИ-2 – *не более*  (10 ÷ 15) и тоже без учета нагрузки,
* каскад ОК – ≈1, но все-таки <1

***3.*** *Выходное сопротивление* ROUT

* каскад ОИ-1, ОИ-2 - ~ Rd
* каскад с ОК (ЭП) – десятки Ω, могут быть даже единицы Ω.

Влияние ООС – снижает в соответствии с (2.6). Однако не все типы каскадов следует использовать в качестве выходных.

Теперь сами смотрите и решайте, какая комбинация в наибольшей степени подойдет для реализации условий варианта.

***4. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ.***

***4.1****. Общие сведения.*

Поскольку *конкретную* комбинацию УК предстоит определить самостоятельно, то, очевидно, *конкретная* последовательность расчетов от выхода к входу с перебором УК определенного типа – также не имеет особого смысла. Поэтому в МУ приведены общие рекомендации для *самостоятельной работы*, а не просто подстановки исходных данных в готовые уравнения, которые уже выставлены в нужной последовательности.

Общая последовательность расчетов: выходной УК (УК3), далее промежуточный УК (УК2) и входной УК (УК1).

***4.1.1****. Последовательность расчета внутри УК на основе БТ – схемы с ОЭ и ОК*:

* определение тока покоя IOP из требований к нагрузке; минимально допустимое значение тока покоя – 1мА,
* для схемы с ОК определение RE из анализа выходной цепи,
* для схемы с ОЭ определение RC с учетом RE≈0.1R⋅C,
* значение RC (RD) определяется из получения максимального KU,
* определение резисторов БД

***4.1.2****. Последовательность расчета внутри УК на основе ПТ – схема с ОИ:*

Схема с ОИ – это, как правило, УК1. К моменту ее расчета уже известно значение резистора ROC, а, значит и RD(NS) – не шунтированной части резистора в цепи истока:

* определение тока покоя стока – аналитическое или графическое,
* определение RD из анализа выходной цепи.

УК считается полностью рассчитанным, если известны номиналы всех входящих в него резисторов и определены значения KU.J, RIN.J и ROUT.J.

Формулы расчета для каждого типа УК – в ПРИЛОЖЕНИИ 1.

***ВНИМАНИЕ!!!***

Непосредственно в тексте МУ не приводятся расчетные уравнения *для схем с БТ:*

* все уравнения имеются в соответствующих разделах лекционного курса,
* уравнения для расчетов схем с ОЭ, ОИ и ОК использовались при подготовке и защите Л.Р.№№1,2,3.

Хотя этого достаточно для самостоятельной работы, тем не менее в отдельном **ПРИЛОЖЕНИЕ 1** приведенасводка *всех* возможных уравнений, которые могут быть использованы при расчетах. В сводке помимо формулы указаны смысловые назначения уравнений. Задача – самостоятельно определить, где и какое уравнение использовать.

В расчетной части МУ приводятся только:

* формулы, уточняющие обозначения,
* формулы с рекомендуемыми диапазонами значений.

***4.2.*** *Расчет токов покоя.*

***4.2.1.*** *Расчет токов покоя УК3 любого типа.*

Это, возможно самый ответственный момент в расчетах. Неправильно выбранное, обычно заниженное значение IOP3 может проявиться только при проверке схемы в EWB, когда не будет обеспечен заданный допуск uOUT и возникнет большое значение КНИ,%.

Нагрузкой УК3 при работе является эквивалентное сопротивление параллельно соединенных RH и резистора ROC.

 (4.1)

Отсюда по закону Ома нужно найти максимальное значение тока **IH.MAX**, которое должно обеспечить максимальное (оно же амплитудное) uOUT с ***эффективным*** значением **uNOM** (вариант).

Почему задано эффективное, а в расчетах применяется амплитудное значение uOUT?

* проверка результатов проводится по приборам EWB, которые показывают *эффективные* значения, поэтому значения uNOM сравнительно "круглые",
* расчеты УК проводятся для *амплитудных* значений .

Ток покоя УК3 должен обеспечивать:

* IH.MAX – ток через RH с созданием значения uNOM,
* IOC.MAX – ток через неизвестное пока ROC от того же uNOM,
* IOP3.OCT – "остаток" тока в УК3 для обеспечения малого уровня НИ.

К началу расчета известны только значение RH и uNOM, т.е. можно рассчитать только значение IH.MAX!!! Как рассчитывать в условиях отсутствия полной информации?

*Вариант1:*

запас для тока покоя выбирается в виде,

 (4.2)

определяется дополнительный ток через ROC, которое снизит запас до уровня

 (4.3)

отсюда определяется значение ROC, а (4.2) остается для расчета УК3

*Вариант 2:*

* запас для тока покоя выбирается в виде

 (4.4)

* примерно половина тока запаса выделяется для IOC.MAX, отсюда значение ROC.

Уточнение значения ROC проводится при расчете УК1.

***4.2.2.*** *Расчет тока покоя остальных УК, если они на БТ.*

Вообще-то, условие (4.2) должно соблюдаться для всех УК, но только в УК3 оно является достаточно жестким:

Для промежуточного УК (УК2) нагрузкой является RIN3, а выходное напряжение зависит от типа УК3:

* если УК3 –ЭП, то uOUT2 ≈ uNOM, но при правильном расчете RIN3 составляет десятки kΩ, т.е. решающим фактором для IOP2 будет не (4.2), а условие

 (4.5)

* если УК3 – схема с ОЭ, то uOUT2 < uNOM  в KU3 раз, т.е. как минимум на порядок, т.е. будут действовать то же условие (4.5).

Для УК1 условие (4.2) вообще может дать единицы мкА, т.е. тоже (4.5)

В каскадах с ОИ у ПТ-JFET нет существенных изменений свойств в микрорежиме (этим вызвано ограничение (4.5) для БТ). Выбор значения IOP рассматривается в совокупности с общим определением положения рабочей точки в **пп.4.3**.

***4.3****. Расчет параметров УК на БТ.*

***4.3.1****. Расчет положения рабочей точки для УК с ОЭ.*

Самое простое – выбрать условие максимального размаха на выходе. После определения IC.OP сразу определяется значение RС и далее расчет резисторов БД. Вполне возможно, что данный выбор и позволит создать схему, отвечающую условиям задания.

Если увеличить значение RC, то можно повысить локальное значение KU, а значит и KU0, т.е. общую глубину ООС. При уже определенном значении IC.OP повышение значения RC приведет к снижению значения UC.OP, которое должно включать в себя "запас":

* *амплитуда* выходного сигнала в данном УК(!!!),
* падение напряжения на RE

 (4.6)

* напряжение UCE(АCT) для поддержки активного режима БТ.

Теоретическое значение UCE(ACT) ≈ 0.7B. Однако для гарантированного устранения падения значения KU вблизи от насыщения следует выбирать

 (4.7)

В (4.6) значение RE выбрано таким же, как в Л.Р, т.е. RE=0.1⋅RC (рекомендуется), но можете выбрать уже любое значение.

***!!!*** Сильное уменьшение RE << 0.1⋅RC приведет к нестабильности режима DC. Это сразу же скажется при проверке значения KU.OC на температурную стабильность и случайный разброс параметров.

Здесь также имеются численные критерии для оценок, особенно "хорошо" и "отлично", которые указаны в **пп.5**.

***4.3.2****. Расчет положения рабочей точки для УК с ОК (ЭП).*

Здесь также можно принять режим наибольшего размаха и сразу же определить значение RE, а затем и значения резисторов БД.

Если выбор значения RE проводить из анализа выходной цепи, то можно улучшить некоторые показатели, правда при этом ухудшатся другие:

* увеличение RE приведет к увеличению RIN(ЭП), как следствие, к увеличению KU предыдущего УК и общему увеличению KU, т.е. глубины ООС,
* одновременно увеличится значение ROUT(ЭП), т.е. ухудшится согласование с последующим каскадом, особенно может быть видно, если ЭП – это УК3,
* при уменьшении RE будут обратные эффекты.

***4.3.3*** *Расчет резисторов БД для УК с ОЭ и ОК.*

После выполнения пп.**4.3.1**, и пп.**4.3.2** для УК с ОЭ и ОК оказываются известными величины IС.OP и RC, а затем и RE, что достаточно для расчета значений RB1 и RB2.

В Л.Р.№№1÷3 приводились сразу конечные формулы с целью сокращения времени на расчеты. Здесь времени уже достаточно и возможно лучше самостоятельно решить систему уравнений из ПРИЛОЖЕНИЯ 1. Во всяком случае привести в ПЗ нужно именно систему уравнений, а не формулы из Л.Р. Более того, ряд принятых ранее решений может сделать конечные формулы из Л.Р. просто неверными, а решение системы уравнений будет всегда правильным.

Первое уравнение БД – получение требуемого напряжения UB.OP.

Второе уравнение БД – условие его независимости.

***4.3.4.*** *Переход к стандартным значениям ряда Е24*.

Значения всех резисторов УК (4шт.) приводятся к значениям из ряда Е24, производится окончательный анализ схемы и расчет показателей уже для типовых значений:

* из первого уравнения БД определяется действительное значение IE.OP≈ IC.OP,
* из уравнения выходной цепи определяется действительное значение UС.OP.

***!!!*** Поскольку *любое* значение R отличается от ближайшего значения из Е24 не более, чем на ~5%, то пересчет не должен дать больших отклонений.

***4.4****. Расчет входного каскада УК1*.

***4.4.1****. УК1 по схеме с ОЭ*.

Поскольку УК1 *последний* в очереди при расчете, то один расчет такого типа уже произведен в **пп.4.3.1** и пп.**4.3.3**. В УК1 все проводится точно так же, только можно сразу выбирать IOP1 ≥ 1mA без всяких проверок.

После расчета проводится разбивка на два отдельных резистора RE1=RE11+RЕ12 с не шунтированной частью RE12. Значение ROC уже определилось при расчете УК3. Для большей гарантии правильной работы УК3 можно увеличить это значение в (1.5 ÷ 2) раза, т.е. увеличить запас по току для УК3.

Правила расчета RE12 и соответствующей коррекции значения ROC:

* соотношение RE12 и ROC должны *точно соответствовать* ООС с глубиной → ∞,
* значение RE12 должно быть из ряда Е24,
* значение ROC может быть с точностью до 0.01kΩ.

*Вывод.* Определение RE12 и ROC делается в три этапа:

* по известному ROC определяется предварительное значение RE12,
* значение RE12 переводится в Е24,
* определяется значение ROC с точностью до 0.01kΩ.

Осталось установить RE11=RE1– RE12 и привести его к ряду Е24. В ряде конкретных случаев можно этим пренебречь и оставить RE11=RE1.

ВСЕ!!! Расчет параметров усилителя закончен.

***4.4****.****2****. УК1 по схеме с ОИ.*

Исходные данные к расчету:

* напряжение отсечки UGS0 – из EWB → Свойства → Edit → Treshhold Voltage,
* максимальный ток ID0 – файл jfet.ewb → включение при UGS=0,
* входное сопротивление УК2 – RIN2=RH1 – нагрузка УК1 – это обязательно!!!

Самый простой алгоритм расчета:

* из ROC.MIN сразу определяется значение RS1 и переводится в Е24,
* определяется значение тока покоя IOP1,
* определяется максимально допустимое значение RD,
* определяется крутизна S(IOP) и KU1 – обязательно с учетом нагрузки (!!!),
* значение ROC корректируется см.п.4.4.1.

***!!!*** В схеме с ОИ не исключено, что увеличение значения RS1 позволит увеличить значение RD1 и общее значение KU1. При отсутствии RH1=RIN2 это наблюдалось бы достаточно часто. Понижение реального значения KU1 при наличии нагрузки может вообще исключить этот эффект, но проверить это нужно:

* значение RS1 увеличивается ~ на 10Ω,
* вновь проводится расчет значений IOP, RD, S(IOP),
* значение KU1 определяется с *новыми* значениями S(IOP), но со *старым* значением RS1, т.к. добавка будет зашунтирована конденсатором CS1,
* если значение KU1 увеличилось, то все повторяется до получения KU1.MAX,
* если первое же увеличение RS1 не привело к увеличению KU1, дальнейшая проверка прекращается и все остается как есть.

***ПРИМЕЧАНИЕ***.

В схеме с ОИ допускается значение RD, выходящее из ряда Е24 с точностью до 0.1kΩ только при следующих условиях:

* расчетное значение RD ≥ 5kΩ, т.е. "шаг между значениями большой,
* в цепи стока ставятся два резистора: постоянный из Е24 и переменный (потенциометр) значением 1kΩ и шагом (Increment в EWB) 10%.

*Пример:* значение RD=6.8kΩ оставляет возможность увеличения RD, а RD=7.5kΩ уже нет; при RD=7.3kΩ получается увеличение KU1 ~ на 5%.

*Решение:* в расчетах используется значение RD=7.3kΩ, а в схеме ставится резистор значением 6.8kΩ и потенциометр 1kΩ, Increment 10%, Setting 50%, добавляющий 0.5 kΩ.

Значение RG1 выбирается *в самую последнюю очередь* после определения всех показателей работы и расчета отклонений.

***4.5.*** *Показатели работы при отключенной цепи ООС.*

Это самая простая часть, т.к. ничего уже не надо выбирать, а просто подставлять полученные значения в известные формулы.

***4.5.1****. Определение общего и петлевого коэффициента усиления.*

Общий коэффициент усиления KU0 определяется, как произведение локальных KU с учетом того, что для каждого УК существует нагрузка:

* для УК1: RH1=RIN.2,
* для УК2: RH2=RIN.3,
* для УК3: RH3=RОС.

***!!!*** Общий коэффициент усиления имеет индекс "0", т.к. усилитель в целом рассчитывается без подключения нагрузки. Для отдельных УК указывать обозначения без индекса "0".

Петлевой коэффициент усиления KL определяется по известной формуле. Если его значение получилось меньше, чем 20, то глубина ООС окажется явно недостаточной.

***4.5.2.*** *Входное и выходное сопротивление при отключенной цепи ООС..*

Входное сопротивление: 

Выходное сопротивление: 

Для УК1 по схеме с ОИ на ПТ *пока* считается RIN →∞.

***4.6.*** *Показатели работы усилителя при включенной цепи OOC.*

Для всех значений существуют готовые формулы, приведенные в ПРИЛОЖЕНИИ 1:

* по основной формуле ООС определяется значение KU0.OC,
* по известным формулам определяются RIN.OC, ROUT.OC,
* с учетом известных RSS и RH определяется значение KUH.OC.

Для УК1 по схеме с ОИ на ПТ по-прежнему считается RG1=RIN →∞, далее см. **пп.4.7**.

***4.7****. Определение основных отклонений.*

Формулы для определения значений – в пп.2.4.1 ÷ 2.4.4. Начинать в первую очередь с вычисления (2.10), т.к. этот результат уже определяет *максимально возможную* оценку за К.Р., согласно значениям в пп.2.4.5.

А вот теперь можно определить значение RG1. Это значение выбирается минимальным из возможных, которые дают потери на входе ≤1%.

**5**. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ EWB ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТЫ.

Программа EWB может быть использована на всех этапах работы, включая проверку *по каскадам* правильности расчетных решений. Обязательным является использование EWB на следующих этапах:

* определение параметров источника сигнала,
* определение параметров БТ и ПТ (если он включен в состав УК),
* измерение показателей в полной схеме усилителя

Результаты всех этих этапов находят отражение в Таблицах, которые являются неотъемлемой частью ПЗ.

***5.1****. Определение параметров источника сигнала.*

Файл SS(...– ...).ewb, в котором содержится модуль, соответствующий варианту, является базовым для построения схемы усилителя. У каждого варианта свой личный файл с №№ группы и варианта, т.е. не надо его как-то переименовывать.

Схему для определения параметров источника сигнала составить самостоятельно. Можно ее оставить в общей схеме, но отдельно, где-нибудь слева вверху.

Параметры источника сигнала ESS и RSS, а затем и рассчитанное значение KU.NOM заносятся в Таблицу 3, ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

***5.2****. Определение параметров БТ.*

Определение значений β и h21E проводятся уже известным методом в уже имеющемся файле h21e.ewb.

***!!!***  Не забывайте:

* сопротивления амперметров – не менее 1mΩ,
* вся остальная информация – на схеме.

***5.3****. Определение параметров ПТ*

Если в структуре усилителя присутствует ПТ, то EWB может быть использована не только для предварительных определений, но и в основных расчетах – Рис.5.1.



Рис.5.1. Схема для определения параметров ПТ.

Для определения значения UGS0 нужно раскрыть Свойства🡪Edit и посмотреть значение Treshhold voltage (там оно называется VT0).

Для определения значения ID0 нужно просто включить схему и посмотреть ток, т.к. напряжение UGS "жестко" установлено равным 0В.

***5.4****.Определение показателей работы усилителя*.

Схема усилителя кроме его элементов должна содержать необходимые средства измерения pV1, pV2 и управления режимами измерений ключи S1÷S4. Для единообразия буквы управления ключами устанавливать, как показано на Рис.2.1.

Также для единообразия при указании положения ключей использовать или соответствующую букву с индексом, например, La, Ob или L-a, O-b и т.п.

Заготовка плана измерения показателей работы в ТАБЛИЦЕ 2, ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

Еще раз приводится Рис.2.1 структура усилителя, как объекта измерения



Рис.2.1. Структура усилителя, как объекта измерений.

Начальное заполнение ТАБЛИЦЫ 2 производится, исходя из способа получения результата примеры приводятся совершенно отвлеченные:

* непосредственно по показаниям приборов с определенным положением ключей, пример

 (5.1)

* отношение показаний одного прибора при изменении положения одного ключа и неизменном положении остальных

 (5.2)

* дополнительные действия с показаниями приборов с возможным участием известных значений RSS и RH, здесь пример совершенно конкретный

  (5.3)

***5.5.*** *Определение показателей качества и стабильности****.***

В обязательном порядке проводится исследование температурной зависимости KUН.OC и определение значения КНИ,% при uOUT=uH.NOM.

Для работ, претендующих на хорошие и отличные оценки, дополнительно проводятся исследования см. **пп.5.5.3**.

* анализ влияния ООС на уровень НИ при одинаковом uOUT,
* сравнительный статистический анализ схемы с отключенной и подключенной цепью ООС.

При анализе с использованием АС к входу усилителя подключается источник EWB!

***5.5.1****. Исследование температурной зависимости при подключенной цепи ООС*.

В источнике сигнала (не модуле!) устанавливается напряжение 1мВ, для того, чтобы возможные появления НИ не влияли на результат – только температура!

Проводится в режиме Analysis → Temperature Sweep + AC.

Диапазон температур: (-54 ÷ +81)ОС с шагом 27ОС. Это примерно соответствует коммерческому диапазону (-60 ÷ +80)ОС с попаданием точки нормальной (по понятиям EWB) температуры +27ОС.

Диапазон частот для AC: (1 ÷ 10)кГц, т.е. заведомо плоская часть АЧХ, на которой сразу по оси Y выдается значение KU.

Результаты представляются только в виде вычисленных отклонений.

Данные для вычислений – значения max y.

 (5.4)

 (5.5)

***5.5.2.*** *Определение КНИ при замкнутой цепи ООС*.

Проводится в режиме Analysis → Fourier, где просто считывается значение Total harmonic distortion сразу в %%.

Напряжение источника устанавливается таким чтобы прибор показывал значение примерно равное значению uH.NOM из варианта. Частота источника и анализа – 1кГц.

Результат  в ТАБЛИЦУ 3.

***5.5.3****. Дополнительные исследования в ТАБЛИЦЕ 4 (сделать самостоятельно).*

**1**. Исследования температурной зависимости и уровня НИ проводятся для обоих состояний цепи ООС.

**2**. Для температурных зависимостей в режиме Analysis → Temperature Sweep + Transient снимаются два семейства графиков:

* при замкнутой цепи ООС к входу усилителя подключается модуль,
* при разомкнутой цепи ООС к входу усилителя подключается источник EWB
* напряжение источника устанавливается из условий примерного равенства uOUT в обоих случаях,

графики заносятся в ПЗ, с какими-то выводами.

**3**. Статистический анализ делается в два приема:

* Analysis → МС + AC для обоих состояний цепи ООС,
* Analysis → МС + Transient – только для замкнутой цепи ООС.

Диапазон Transient (10 ÷ 15)мс, т.е. пять периодов с пропуском первых десяти.

Проведение анализа и обработка результатов – как в Л.Р.№3.

Данные для расчета зависят от типа УК3:

* если УК3 – это ЭП, то берутся значения min y,
* если УК3 – это схема с ОЭ, то берутся значения max y.

А вот почему так – попробуйте объяснить. Что является наиболее критичным в работе УК3 – увеличение или уменьшение тока? И как изменение тока через транзистор связано с изменением напряжения uOUT?

И еще попробуйте объяснить различие результатов для AC и Transient или отсутствие заметного различия.

***ВСЕ!!!***