**Лекция 7**

**ОБЩАЯ И ЧАСТНАЯ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА**

**1. Общая и частная задачи синтеза**

Все математические задачи, решаемые в теории автоматического управления (ТАУ), можно объединить в два больших класса:

1. Задачи анализа.
2. Задачи синтеза.

*В задачах анализа* полностью известна структура АС, заданы все параметры АС и требуется определить какое-либо ее статическое или динамическое свойство. К задачам анализа относятся определение устойчивости и оценка качества управления АС.

*Задачи синтеза* можно рассматривать как обратные задачам анализа: в них требуется определить структуру и параметры АС по заданным показателям качества управления. Простейшими задачами синтеза являются – задачи определения передаточного коэффициента разомкнутой АС по заданной ошибке или условию минимума интегральной оценки.

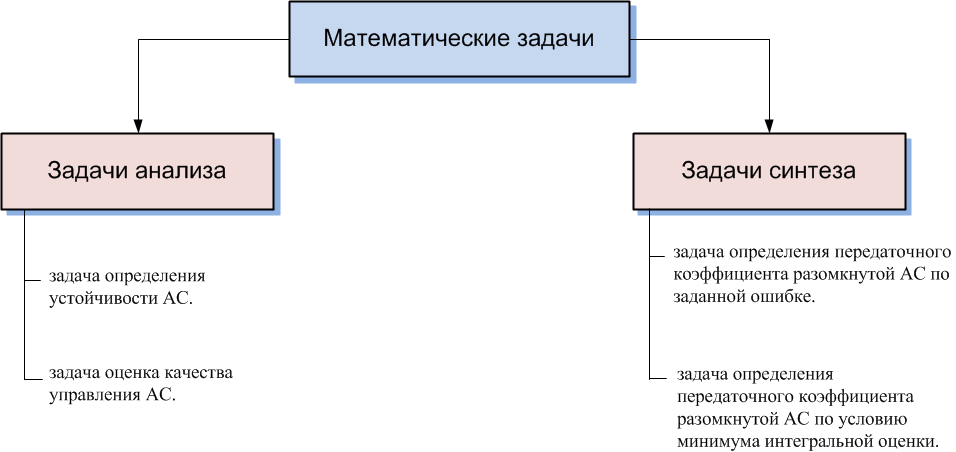


Рисунок 1.1 – Классификация математических задач

теории автоматического управления

Слово синтез в дословном переводе с греческого означает «соединение, сочетание» - это метод исследования какого-либо явления в его единстве и взаимной связи частей, обобщение, сведение в единое целое данных, полученных анализом.

В теории автоматического управления под синтезом понимается некоторый процесс.

**Синтез АС** - это процесс определения структуры, состава элементов и значений параметров АС, при которых она удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям.

В общем случае при проектировании АС необходимо определить алгоритмическую и функциональную структуру АС, т.е. решить общую задачу синтеза.

Приведенное определение характеризует общую задачу синтеза, которая обычно решается в следующем порядке:

**1.** Составляется функциональная схема АС.

**2.** Выбираются функционально необходимые элементы АС с учетом обеспечения энергетических, эксплуатационных и других требований, предъявляемых к системе.

**3.** Определяются математические модели и передаточные функции элементов АС и составляется ее структурная схема.

**4.** Производится оценка качества процесса управления выбранной АС. Если качество процесса управления удовлетворяет заданным требованиям, то поставленная задача синтеза АС решена.

**5.** Если заданные требования не выполняются, то пытаются добиться улучшения качества процесса управления за счет изменения в допустимых пределах параметров элементов АС.

**6.** Если этим путем невозможно добиться удовлетворения всех предъявленных к АС требований, то в структуру системы включают корректирующее устройство (КУ).

Алгоритм процедура синтеза АС с заданными показателями качества приведен на рисунке 2.

Задача определения параметров элементов АС или структуры и параметров КУ, обеспечивающих заданные требования к АС с известной структурой, называется *частной задачей синтеза* (пункты 5,6).

Общая задача синтеза на современном уровне развития науки и техники не имеет окончательно сложившейся стройной теории. Поэтому ее решение можно во многом отнести к области инженерного искусства. В настоящее время бурно развиваются методы решения общей задачи синтеза с использованием, так называемых, систем автоматизированного проектирования (САПР) отдельных элементов и всей АС в целом на ЦВМ.

В данном курсе рассматриваются некоторые основные инженерные методы решения частной задачи синтеза.

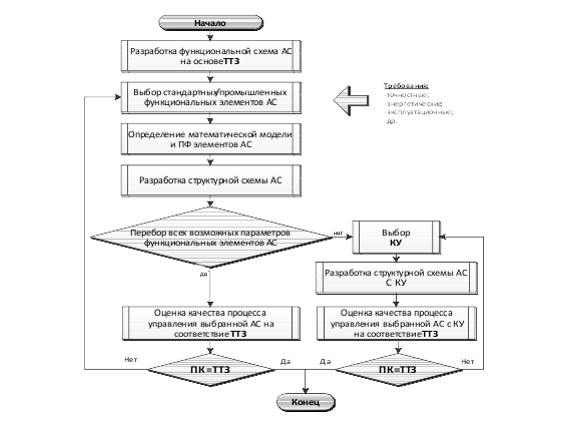


Рисунок 1.2- Алгоритм процедуры синтеза АС с заданными

показателями качества

**2. Последовательные (П-, ПИ-, и ПИД- регуляторы) и**

**параллельные корректирующие устройства (КУ)**

При решении частной задачи синтеза, АС может быть представлена в виде **"неизменной части"** системы и **корректирующих устройств** (КУ), заданных передаточными функциями *WН (p)* и *WKi(p),* соответственно.

*WK1(p)*

*Y(p)*

*X(p)*

*WН(p)*

*WK2(p)*

Рисунок 2.1 – АС с корректирующими устройствами последовательного

и параллельного типа

***Корректирующим устройством*** *называется вспомогательный элемент АС, применяемый для улучшения качества ее процессов управления*.

На практике применяются два вида КУ: последовательные и параллельные.

***Последовательным называется КУ****, включенное в прямой тракт передачи сигнала управления WК1(p).*

***Параллельное КУ*** *WK2 (p) включается в обратную связь внутреннего контура.*

Таким образом, задача синтеза АС при помощи введения в ее состав корректирующих устройств по существу сводится к выбору типа и параметров КУ, при которых АС отвечает заданным показателям качества. Поэтому часто вместо термина "*синтез АС*", употребляют термин "*синтез корректирующего устройства*".

**2.1. Последовательные КУ и их влияние на качество АС**

**2.1.1. ПИД-регулятор**

Для достижения заданных характеристик регуляторов в автоматических системах на современном этапе используют схемы *пропорционально-интегрально-дифференциальных* (**ПИД**) регуляторов. ПИД-регуляторы получили широкое развитие с внедрением микроконтроллеров (микропроцессоров), которые, используя математические модели, решали поставленные задачи точного управления объектом.

***ПИД-регулятор*** *– это устройство, которое реализуется тремя параллельно соединенными динамическими звеньями: усилителем, интегратором и дифференциатором.*

**ПИД-регулятор** – это наиболее общий тип регуляторов, используемых в системах управления (рисунок 2). Этот тип регулятора *применяют* в АС, когда требуется *улучшить* как *вид переходного процесса* и так и *точность в установившемся режиме*.

Если – входной сигнал регулятора , а – его выходной сигнал, то связь между ними определяется уравнением:

где – время,

(18)

– соответственно коэффициент усиления, постоянная времени интегрирования и постоянная времени дифференцирования.



Рисунок 2.2 - ПИД-регулятор в следящей АС с ЖООС

Здесь: – блок регулятора, – объект управления, – управляющее воздействие, – сигнал рассогласования (ошибки), – выходной сигнал регулятора, *у(t)* – регулируемая величина.

Используя преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях, передаточную функцию ПИД-регулятора можно представить в операторной форме:

(19)

где – оператор Лапласа;

– коэффициенты передачи усилителя, интегратора и дифференциатора соответственно.

Структурная схема непосредственно ПИД-регулятора с учетом полученного выражения может быть представлена рисунком 3.



Рисунок 3 - ПИД-регулятор

**ПИД- регулятор** обладает достаточно большим запасом по фазе *ϕЗ*  и низким уровенем широкополосных помех при заданной точности. Либо, при заданном *ϕЗ* можно существенно увеличить *К* системы и тем самым уменьшить ее ошибку *е(t)* в установившемся режиме.

При решении частных задач управления иногда не требуется выполнения всех трех операций ПИД-регулятора. Для этого достаточно обнулить тот или иной коэффициент.

**2.1.2. *П-регулятор***

***П-регулятор*** *– это устройство, описываемое идеальным коэффициентом усиления K (остальные коэффициенты ).*

***П-регулятор*** реализует *пропорциональное управляющее устройство.*

Этот тип регулятора используется тогда, когда желаемых *показателей качества* в *переходном и установившемся режимах* можно достичь простой настройкой *коэффициента усиления системы*, не прибегая к динамическим преобразованиям сигнала.

**2.1.3. *ПИ-регулятор***

***ПИ-регулятор*** *– это устройство, которое описывается двумя звеньями: усилителем и интегратором. Передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид:*

(20)

***ПИ-регулятор*** реализует *пропорционально-интегрирующее управляющее устройство.*

Этот регулятор *увеличивает тип системы на единицу*, обладает *запаздыванием по фазе* и применяется для *повышения точности системы в установившемся режиме.*

При этом наблюдается *снижение высокочастотных шумов* и *уменьшение запаса устойчивости АС.*

***2.1.4.ПД-регулятор***

***ПД-регулятор*** *– это устройство, которое описывается также двумя звеньями: усилителем и дифференциатором. Передаточная функция ПД-регулятора имеет вид:*

(21)

***ПД-регулятор*** реализует *пропорционально-дифференциальное управляющее устройство.*

Этот регулятор *увеличивает тип системы на единицу*, обладает *опережением по фазе* и применяется для *улучшения вида переходных процессов в системе.*

При этом наблюдается *повышение высокочастотных шумов* и *увеличение быстродействия.*

**3. Синтез последовательного КУ методом ЛЧХ**

На предыдущем уроке был рассмотрен один из возможных вариантов синтеза ЛСС с последовательным КУ методом формирования закона управления системы. Однако, такой путь синтеза не позволяет удовлетворить многообразие требований, предъявляемых к АС.

Попутно заметим, что задача синтеза АС при помощи введения в его состав корректирующих устройств по существу сводится к выбору типа и параметров КУ, при которых АС отвечает заданным показателям качества. Поэтому часто вместо термина – «синтез АС», употребляют термин – «синтез корректирующего устройства».

Эту задачу часто называют задачей инженерного синтеза, которая впервые была поставлена и решена В.В. Солодовниковым на основе применения частотного метода с использованием ЛЧХ.

Исходными данными при синтезе любой АС являются:

1. Требования к качеству АС - времени регулирования ,перерегулированию , запасам устойчивости и , максимально допустимым значениям ошибок в установившемся режиме

2. Эксплуатационные ограничения, накладываемые особенностями объекта управления и условиями его функционирования

Ставится задача: скорректировать АС с передаточной функцией разомкнутого контура путем синтеза последовательного КУ таким образом, чтобы удовлетворить требования, предъявляемые к АС. В результате синтеза должны быть определены структура, схема технической реализации и параметры последовательного КУ.

Структурная схема скорректированной АС будет имеет вид:

*WН(p)*

*Y(p)*

*X(p)*

*Wк(p)*

где *)* - передаточная функция неизменной части корректируемой АС;

- передаточная функция последовательного КУ.

Тогда ПФ разомкнутой скорректированной системы (назовём её желаемой) будет иметь вид:

Откуда передаточная функция КУ и его ЛЧХ определяются равенствами:

(1)

В дальнейшем будем рассматривать методику синтеза только таких АС, для которых характерна однозначная связь между и *(такие АС называются минимально-фазовыми)*, поэтому для синтеза КУ можно использовать только одну из ЛЧХ АС, а именно ЛАХ – *.* Поскольку для построения ЛАХ требуется минимум расчетов, то данный метод нашел широкое применение на практике.

Процесс синтеза КУ методом ЛАХ можно разделить на ряд этапов:

1. Построение ЛАХ нескорректированной системы *.*

2. Построение желаемой ЛАХ с учетом требований, предъявляемых к АС.

3. Проверка устойчивости и качества синтезированной АС известными методами. Если заданные требования не выполняются, то изменяется желаемая ЛАХ по равенству.

4. Определение ЛАХ последовательного КУ по равенству (1).

5. Определение передаточной функции КУ по виду ЛАХ КУ .

6. Выбор схемы реализации КУ (по таблицам) и расчет её элементов.

7. Проверка соответствия скорректированной АС с ПФ разомкнутой системы точными методами на соответствие предъявляемым ТТТ.

Таким образом, вся сложность синтеза состоит в удачном выборе желаемой ЛАХ .

**3.1. Построение желаемой ЛАХ**

На этом ключевом этапе синтеза КУ необходимо учесть два противоречивых требования:

1. Скорректированная система должна удовлетворить всем заданным требованиям и при этом

2. КУ, получаемое в результате синтеза, должно быть максимально простым в реализации.

Желаемую ЛАХ условно подразделяют на три части: низкочастотную, среднечастотную и высокочастотную.

Низкочастотная часть определяет статические свойства системы, т.е. принципиальную точность АС в установившемся режиме: коэффициент усиления , астатизм , ошибку в установившемся режиме *.*

Среднечастотная частьявляется наиболее важной. Она определяет устойчивость, запас устойчивости, время регулирования и перерегулирование АС. Основные параметры среднечастотной асимптоты - это ее наклон, частота среза и ее расположение на оси абсцисс относительно границ среднечастотной асимптоты. Чем больше наклон среднечастотной асимптоты и меньше ее размах по частотам, тем хуже динамические свойства системы. Наиболее целесообразным является наклон -20 дб/дeк. Частота среза определяет быстродействие системы. Чем больше , тем меньше время регулирования. Однако, все выше перечисленные связи и зависимости далеко не так прямолинейны и однозначны, что и делает выбор самым ответственным этапом синтеза.

Высокочастотная часть незначительно влияет на динамические свойства системы, но чем больше наклон ее асимптоты, тем меньше потребная мощность исполнительного устройства и влияние высокочастотных помех. Зачастую, высокочастотную часть желаемой ЛАХ строят так, чтобы она совпадала или была параллельной ЛАХ неизменяемой части АС .

Вид типовой желаемой ЛАХ имеет вид:



На рисунке показано условное деление желаемой ЛАХ по частотам:

1 - низкочастотная часть,

2 - сопрягающая часть,

3 - среднечастотная часть,

4 - высокочастотная часть.

Величина - определяет порядок астатизма системы и, следовательно, наклон низкочастотной асимптоты желаемой ЛАХ. Величина - определяет наклон участка, сопрягающего низкочастотную асимптоту со среднечастотной асимптотой, имеющей наклон -20 дб/дек. Частота , ближайшая слева к частоте среза - граничная частота сопряжения. Частота , ближайшая справка к частоте среза - граничная частота сопряжения. Частота - первая частота сопряжения. - входная величина для номограмм Чесната-Майера ([1], Приложение 6) о которых мы поговорим на ПЗ.

Качество АС в основном определяется этими параметрами. В настоящее время, разработаны различные точные методы построения желаемой ЛАХ (методы Солодовникова, Санковского - Сигалова и т.д.). Однако, они достаточно сложны, поэтому на практике чаще пользуются упрощенным методам, который мы сейчас рассмотрим:

1. Исходя из требований к точности АС в установившемся режиме определяют порядок астатизма *ν* и коэффициент усиления системы . Для найденных значений и проводится низкочастотная асимптота желаемой ЛАХ с наклоном . через точку с координатами:

*(участок 1).*

2. Для заданных и определяют частоту среза желаемой ЛАХ по формуле:

где  *–* коэффициент, определяемый из графика:



Для обеспечения % наклон средней асимптоты должен быть (участок 3).

3. Определяют граничные частоты и . Хорошие динамические свойства, т.е. ( и необходимый запас устойчивости () обеспечиваются в случае, если выполняются условия:

,

*.*

То есть, длина среднечастотной асимптоты должна быть не менее одной декады.

4. Участки 1 и 3 сопрягают прямой с наклоном *γ* = -*20⋅S дб/дек*. ( участок 2). Величину *S* выбирают из условия обеспечения наибольшего запаса устойчивости по фазе. Чем больше *S*, тем меньше запас устойчивости. Точка пересечения участков 1 и 2 определяет частоту сопряжения *ω1*.

5. Наклон высокочастотной асимптоты желаемой ЛАХ, как правило, совпадает с наклоном ЛАХ нескорректированной АС на этом участке. Невыполнение данного условия существенно усложняет КУ (участок 4).

Таким образом, с целью простоты реализации КУ необходимо стремиться к максимальному совмещению частот сопряжения *ωi Lж(ω)* с частотами сопряжения ЛАХ исходной нескорректированной системы *LН(ω)* и выполнению п.5 приведенной методики.

**3.2. Определение ЛАХ и передаточной функции**

**последовательного КУ**

После построения ЛАХ исходной нескорректированной системы и ЛАХ желаемой системы, проверки скорректированной АС на устойчивость и соответствие требуемым показателям качества, можно определить ЛАХ последовательного КУ

Эту операцию удобно выполнять графически: на каждой частоте сопряжения характеристик и необходимо вычислить разность их ординат, полученные точки нанести на график и соединить их отрезками прямых:



По ЛАХ КУ *Lк(ω)* составляют передаточную функцию *Wк(p)* последовательного КУ.

Выбор схемы физической реализации КУ, отвечающей полученной передаточной функции, производится, как правило, по таблицам, в которых приводятся схемы активных и пассивных четырехполюсников постоянного тока, реализующих различные передаточные функции, и соотношения для расчета их элементов.([3], Приложение 8)

**4. Синтез параллельного КУ методом ЛЧХ**

**4.1. Достоинства и недостатки КУ и их влияние на качество АС**

Наряду с простотой синтеза и реализации, последовательные КУ обладают рядом недостатков:

1. Требуют дополнительных усилителей мощности по причине ослабления мощности корректируемого сигнала.

2. Предъявляются жестокие требования к стабильности параметров неизменяемой части АС.

3. Наличие форсирующих звеньев в КУ приводит к усилению высокочастотных помех, которые перегружают оконечные каскады.

Перечисленные недостатки последовательных КУ ограничивают их практическое применение в системах средней и большой мощности.

В таких АС для обеспечения заданных требований к качеству управления применяются параллельные КУ (рисунок 1).



Рисунок 4.1 – АС с параллельным КУ

Передаточная функция разомкнутой АС определяется равенством:

где - передаточная функция неизменяемой части системы;

- передаточная функция параллельного КУ.

Рассмотрим АФЧХ данной системы:

Если подобрать параллельное КУ так, чтобы выполнялось неравенство

(1)

тогда

Если подобрать параллельное КУ так, чтобы выполнялось неравенство

(2)

тогда

Таким образом, при выборе параллельного КУ исходя из условия (1) или (2) *динамические свойства звена, охваченного обратной связью, определяются динамическими свойствами КУ*.

Эта особенность определяет основные достоинства параллельных КУ:

1. Уменьшается зависимость качества корректируемой АС от изменения ее параметров (в нашем случае от параметров *W2(p)*).

2. Параллельные КУ не требуют дополнительных усилителей мощности.

3. Значительно меньший, по сравнению с последовательным КУ, уровень высокочастотных помех.

В зависимости от вида передаточных функций, описывающих параллельные КУ, различают жесткие и гибкие обратные связи.

*Жесткой обратной связью (ЖОС) называется параллельное КУ с передаточной функцией вида:*

ЖОС действует как в установившемся, так и в переходном режимах. Введение ЖОС приводит к уменьшению коэффициента усиления разомкнутой системы и, следовательно, к незначительному  и увеличению ошибки АС в установившемся режиме.

*Гибкой обратной связью (ГОС) называется параллельное КУ с передаточной функцией вида:*

Воздействие ГОС проявляется только в переходных режимах. Поэтому, если необходимо изменить динамические свойства АС без изменения точностных характеристик, применяют ГОС.

Однако, в силу того, что дифференцирующие звенья относятся к технически нереализуемым звеньям, на практике вместо ГОС используется изодромная обратная связь.

*Изодромной обратной связью (ИОС) называется параллельное КУ с передаточной функцией вида:*

В авиационных системах широкое применение находят и ЖОС и ИОС, однако параллельные КУ могут быть сложнее и разнообразнее.

**4.2. Синтез параллельного КУ методом ЛАХ**

Синтез параллельного КУ с помощью ЛАХ имеет ряд особенностей по сравнению с синтезом последовательного КУ, но и много общего. Выведем основные расчетные соотношения для определения ЛАХ параллельного корректирующего устройства.

Пусть структура АС имеет вид, приведенном на рисунке 2.



Рисунок 2 – АС с параллельным КУ во втором динамическом звене

В этом случае передаточная функция разомкнутой желаемой АС имеет вид:

,

где *Wн(p)=W1(p)W2(p)W3(p)* - передаточная функция неизменной части АС.

АФЧХ разомкнутой желаемой АС определяется равенством:

 (3)

Метод синтеза КУ с помощью ЛАХ является приближенным, поэтому здесь используется тот же подход, что и при построении асимптотических ЛАХ элементарных звеньев. То есть, ось частот разбивается на два участка.

На первом участке выполняется условие:

, (4)

тогда равенство (3) принимает вид:

*Wж(jω) ≈ Wн(jω)* . (5)

Или в логарифмическом масштабе условие (4) и соотношение (5) примет вид:

*L2(ω)+Lк(ω) < 0* или *Lк(ω) < -L2(ω),* (6)

*Lж(ω) ≈ Lн(ω)*  (7)

На втором участке выполняется условие:

 , (8)

тогда равенство (3) принимает вид:

 (9)

или в логарифмическом масштабе

*Lж(ω) = L1(ω)+L3(ω)-Lк(ω) = L1,3(ω)-Lк(ω),* (10)

где *L1,3 (ω) = L1(ω)+L3(ω).*

Таким образом, на втором участке справедливо неравенство

*Lж(ω) < Lн(ω).* (11)

Анализируя соотношения (7) и (11) можно заключить, что для всего диапазона частот справедливо неравенство:

*Lж(ω) ≤ Lн(ω).* (12)

Неравенство (12) говорит о том, что *Wж(p)* выбирают из энергетических соображений таким образом, чтобы коэффициент усиления *Kж* по возможности, не превышал коэффициент усиления разомкнутой нескорректированной АС *Kн*. В этом случае для скорректированной АС не потребуются дополнительные источники энергии.

Обобщая приведенные выкладки, сформулируем основные правила построения ЛАХ параллельного КУ *Lк(ω):*

1. В диапазоне частот, где *Lж(ω)=Lн(ω)* на ЛАХ КУ не накладывается никаких ограничений, кроме простоты технической реализации и условия (6):

*Lк(ω)<-L2(ω).*

2. В диапазоне частот, где *Lж(ω)<Lн(ω)* ЛАХ КУ должна строиться так, чтобы выполнялось условие (10):

*Lк(ω)*=*L1,3(ω)-Lж(ω)*

и достижением максимального количества совпадений частот сопряжений для и .

Итак, этапы синтеза АС с параллельным КУ не отличаются от аналогичных этапов синтеза АС с последовательным КУ за исключением учета условия на всем диапазоне частот и методики выполнения третьего этапа (построение ).

Порядок синтеза АС с параллельным КУ следующий:

1. Построить ЛАХ неизменной части АС *.* Методика построения ничем не отличается от методики построения ЛАХ разомкнутой АС.

2. Построить желаемую ЛАХ разомкнутой системы . Методика построения желаемой ЛАХ аналогична методике построения в случае последовательного КУ.

3. Проверить устойчивость и качество скорректированной АС.

4. Построить ЛАХ звеньев, не охваченных КУ.

5. Построить ЛАХ звеньев, охваченных КУ и определить *.*

6. Определить ЛАХ и передаточную функцию параллельную КУ *,* исходя из соображений:

- для областей частот где - строится произвольно, но с учетом условий и простоты реализации КУ;

- для области частот где - определяется графическим решением уравнения:

По виду полученной находится .

7. С помощью таблиц ([1], Приложение 8) определить и рассчитать схему технической реализации параллельного КУ.

8. Проверить точными методами выполнение требований по качеству синтезированной АС с ПФ разомкнутой системы:

Рассмотрим пример получения для корректируемой АС (рисунок 3).



Рисунок 3 – АС с параллельным КУ во втором динамическом

звене (вариант решения)

Логарифмические амплитудно-частотные характеристики для АС с приведенной структурой будут иметь вид (рисунок 4).



Рисунок 4 - Логарифмические амплитудно-частотные характеристики

для АС с параллельным КУ (вариант решения)

Для участков 1 и 3 выполняется равенство *Lж(ω)=Lн(ω)*, следовательно, *Lк(ω)<L2(ω)*, а для участка *2 – Lж(ω)<Lн(ω),* следовательно, *Lк(ω)=L1,3(ω*)*--Lж(ω),* т.е. *Lк(ω) > -L2(ω).*

Построение ЛАХ КУ *Lк(ω)* начинается со второго участка. На участках 1 и 3, с целью простоты реализации КУ, ЛАХ КУ *Lк(ω)* получают простым продолжением асимптот *Lк(ω)* второго участка.