ВВЕДЕНИЕ

Катушка индуктивности является элементом радиоэлектронных средств функционирование которой определяется эффектом перехода энергии электрического поля в энергию магнитного поля вследствие протекания по контуру катушки электрического тока. Величина индуктивности определяется конструкцией токопровода и его размерами.

Различают катушки постоянной и переменной индуктивности. Катушки с большими изменениями индуктивности являются вариометрами, а с малыми изменениями индуктивности (10-15%) – подстроенными.

По конструктивному исполнению катушки делятся на цилиндрические и плоские. Цилиндрические катушки индуктивности бывают каркасные и бескаркасные.

Различают катушки индуктивности с однослойной и многослойной намоткой. Многослойные катушки менее технологичны и менее надежны. Различают также экранированные и неэкранированные катушки индуктивности.

В катушках индуктивности применяют магнитные и немагнитные сердечники характер, которого влияет на добротность катушки и интервал варьирования величины индуктивности.

Возможности создания миниатюрных катушек индуктивности очень малы.

В катушках индуктивности потери, влияющие на добротность, складываются из потерь элементов конструкции и увеличиваются при уменьшении размеров конструкции.

В производстве интегральных схем наметилась тенденция замены катушек индуктивности специальными схемами на транзисторах. В производстве гибридно-пленочных интегральных схем катушку индуктивности выполняют в планарном исполнении.

Перспектива развития катушек индуктивности связаны с разработкой новых материалов, имеющие высокие магнитные проницаемости и стабильность на радиочастотах, превосходящие по своим свойствам ферриты, а также развитием конструкции и технологии изготовления таких изделий.

**1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ**

Заданная величина индуктивности, равная 2 *мкГн*, подстройка величины индуктивности ±5% от указанного значения, интервал варьирования лежит от 1,65 *мкГн* до 2,35 *мкГн*, может быть выполнена однослойной намоткой на каркас, в качестве которого может служить немагнитный сердечник, изменяя положение немагнитного сердечника относительно намотки можно достичь указанных пределов изменения индуктивности.

Рабочая частота 29 *МГц*.

Для эксплуатации необходимо, максимальную надежность конструкции, жесткость, защиту от влияния внешних воздействий: механических и электромагнитных, также необходимо ограничить влияние на другие элементы магнитного поля данной катушки. Кроме этого необходимо обеспечить минимальные габариты изделия.

Для обеспечения годовой программы выпуска, равной 1000 штук, необходимо как можно большая технологичность, а именно количество операций по сборке катушки индуктивности должно быть минимальным.

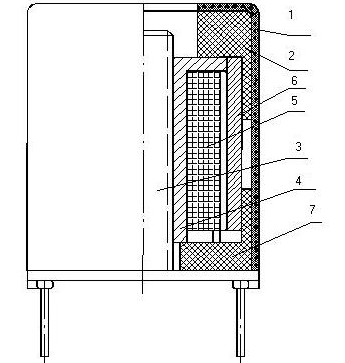
Годовой выпуск разрабатываемого изделия ориентировано на выпуск 1000 изделий в год, что при количестве рабочих дней 250 в году и односменной работе на участке сборки составляет 4 изделий за рабочую смену.

Условия эксплуатации – следует принять общеклиматическую группу с наибольшим разбросом температур, а именно: О 2.1 по ГОСТ 15150-69.Для того чтобы индуктивность катушки не выходила за указанный интервал, необходимо чтобы температурный коэффициент индуктивности был минимален, это значит, что необходимо использовать материалы с малыми значениями температурного коэффициента линейного расширения.

В задание были поставлены довольно строгие требования к параметрам катушки индуктивности так, область использования катушки требует от нее малой массы и габаритов; программа выпуска требует максимальной технологичности и простоты конструкции; при этом необходимо обеспечить максимальную добротность катушки.

**2. ОБЗОР АНАЛОГИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

В источнике [1, стр. 164] приведены конструкции типичных катушек индуктивности в миниатюризированном исполнении, эскиз такой конструкции приведен на рисунке 2.1.



1 - экран;

2- прокладка;

3- продстроечник;

4- каркас;

5- обмотка;

6- кольцо;

7- основание.

Рисунок 2.1 – Эскиз миниатюрного исполнения катушки индуктивности (диаметром 9 мм).

Для обеспечения заданной величины индуктивности намотку достаточно выполнить однослойной и с шагом, что облегчит сборку конструкции и уменьшит паразитную емкость.

Величина индуктивности таких катушек колеблется в пределах от сотых долей до сотен микрогенри. Должна обеспечиваться точность в пределах 0,3...0,5%. На практике применяются катушки индуктивности цилиндрические и кольцевые. Для обеспечения высокой добротности в качестве каркаса используются керамики. В настоящее время применяются катушки индуктивности с каркасами из вакуумплтной керамики. Для уменьшения ТКИ и потерь в собственной емкости каркасы имеют ребристую поверхность. Материалом для каркасов служит керамика. Используются каркасы диаметром от 4...30 мм.

Катушки на керамических каркасах изготавливают тремя способами:

на каркас наматывают с натяжением медный провод;

на горячий каркас наматывают с натяжением медную ленту;

на каркас наносят воженное серебро в виде витков обмотки и покрывают их гальвано способом слоем меди.

Для устранения паразитных связей, обусловленных внешним электромагнитным полем катушки, и для устранения влияния окружающего пространства катушка экранируется, т.е. располагается внутри замкнутого металлического заземлённого экрана. На практике материал для экрана используется из алюминиевого сплава. Под влиянием алюминиевого экрана уменьшается её индуктивность, увеличивается сопротивление и собственная ёмкость, но это приводит к снижению температурной стабильности индуктивности.

Практически величина добротности находится в пределах 10...1000, лучшая добротность однослойных цилиндрических катушек достигается при . Величина добротности зависит от частоты, геометрических размеров и конструкции, числа витков и типа провода. Так, на частотах до 3...4 МГц преимущественно следует использовать провод типа литцендрат (ЛЭШО, ЛЭЛО, ЛЭВ, ЛЭТ), так как это позволяет получить более высокую добротность. При более высоких частотах применяют одножильный провод (ПЭВ, ПЭМ, ПЭЛО, ПЭЛ)



Добротность катушек на кольцевых каркасах относительно меньше, чем у таких же катушек на цилиндрических каркасах.

**3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ И КОНСТРУКТОРСКИЙ РАСЧЕТ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ**

**3.1 Выбор материала и обоснование конструкции**

Материал, из которого изготовлена обмотка катушки индуктивности, должен обладать низким удельным сопротивлением во избежание влияния на протекающий электрический ток, и сравнительно не большой коэффициент линейного расширения – этим требованиям вполне удовлетворяют серебро и медь. Для большей доступности этот материал должен иметь не высокую стоимость. Наиболее всего этим требованиям удовлетворяет медь имея: ;.



Намотку осуществим обычным проводом круглого диаметра. Примем к расчету следующий провод: ПЭЛ-0,5 ГОСТ 16186 – 74.

В качестве материала каркаса используем керамику для уменьшения потерь в диэлектрике каркаса и увеличения добротности. Для уменьшения собственной емкости, но достижения высокой добротности используем каркас диаметром 10 мм.

Для подстройки индуктивности катушек КВ и УКВ часто применяются немагнитные сердечники из меди или латуни . Проанализировав рабочие частоты мы примем немагнитный сердечник выполненный из меди .Это приведет к уменьшению индуктивности и понизит ее добротность .

Для упрощения расчёта сопротивления проводника переменному току вводят понятие "глубина проникновения тока", под которой понимают некоторую величину слоя *xэ* , на протяжении которой плотность тока уменьшается до 0,37 от его значения на поверхности проводника. Величину проникновения тока определяют по формуле (3.1)

, где (3.1)



*-*удельное сопротивление материала проводника, 0,017*Оммм2/м;*

*f-* частота тока. МГц.

Тогда конструкция экрана будет представлять достаточно прочную конструкцию с высокой проводимостью. В принципе для обеспечения большей жесткости экрана было бы лучше изготовить из материалов с высокой прочностью (большей, чем прочность бронзы, латуни), но это будет связано с дополнительными технологически операциями и затруднит обработку. Толщина стенок экрана на практике не превышает *2 мм.*

Примем толщину стенок – 0,5 *мм.*

Диаметр экрана примем равный 8*мм,* тогда диаметр внутренней поверхности составит *7 мм.*

Длину экрана примем равной *12мм.*

Тип намотки выбирается сплошным с шагом – для уменьшения длины намотки и свести габариты к минимуму. Данный тип намотки выбран как наиболее простой, а значит для условий массового производства, наиболее подходящим.

Конструктивные элементы катушки (каркас, кольцо, прокладка и т.д. ) – должны обладать высоким омическим сопротивлением, высокой диэлектрической проницаемостью (малым тангенсом угла диэлектрических потерь) и слабой зависимостью диэлектрической проницаемости от частоты и температуры, малый коэффициент линейного расширения. Из курса материаловедения известно, что к таким материалам относятся: керамики, стекла и фторопласт. Для повышения технологичности необходимо использовать материал, выполняющий из керамики у которого *ε =4÷6*; .



Конструкция катушки индуктивности определяется назначением и условиями эксплуатации. Проанализировав принятые материалы для данной катушки индуктивности можно указать конструктивное решение: выполнить однослойную обмотку на каркасе, выполненного из керамики, фиксировать положение катушки относительно оси симметрии будут основание (снизу), в котором будут предусмотрены отверстия для выводов, и прокладка (сверху), выполненные из мягкого материала, примем полистирол; в качестве подстроечника используем немагнитный сердечник; на нижнее кольцо помещается каркас с намоткой, выводы от намотки крепятся к выводам катушки, которые помещены в прокладке и закреплены – залиты эпоксидным компаундом.

Это конструктивное решение позволит свести габариты к минимуму.

Требуемый интервал изменения индуктивности (±5%) планируется достичь как: минимальное значение индуктивности (*1,65 мкГн*) будет соответствовать положению магнитного сердечника, находящегося, частично, вне рабочей области катушки индуктивности; максимальное (*2,35 мкГн*) – когда, немагнитный сердечник находится в рабочей области катушки. Влияние сердечника приведет к уменьшению требуемой индуктивности катушки (медной намотки). Немагнитный сердечник должен обеспечить требуемый верхний предел величины индуктивности. Значит, требуемая величина индуктивности будет определяться по формуле (3.2):

(3.2)



Введение сердечника числено уменьшило требуемую величину индуктивности, что привело к уменьшению количества витков.

Диаметр сердечника выбирается как можно меньшим, из стандартного ряда ГОСТ 11082 –64 – примем *D = 6 мм*, для обеспечения минимальных размеров катушки и собственной емкости.

**3.2 Расчет числа витков**

Расчет числа витков однослойной обмотки осуществляем по методу предложенному В.А. Волговым и изложенному в [1].

Число витков можно определить, если известны диаметр и длина намотки:

, (3.3)



где D - диаметр обмотки (данный параметр выбираться из производственных возможностей), в см;

L - индуктивность катушки (заданная величина), в мкГн;

L0 - коэффициент формы (табличное значение).

Диаметр обмотки выбран из соображений целесообразности – диаметр обмотки катушки индуктивности будет соответствовать, внешнему диаметру стандартного корпуса катушки *D = 10 мм*. Умножим и разделим правую часть выражения , на .



Получим формулу (3.4):

, (3.4)



Величину обозначим - определяет количество витков, приходящихся на единицу длины намотки, которое определяется как



(3.5)



где  - коэффициент не плотности намотки, определяется из условия выбранного диаметра в изоляции;

- диаметр провода в изоляции.



Так, для выбранного провода d = 0,5; (из источника [2]), данному значению соответствует  =1,3 (из источника [1]). Тогда принимая во внимание формулу (3.3) получим:



(3.6)



Произведение обозначим как - определяется соотношение длины и диаметром намотки. Учтя принятые обозначения, получим формулу (3.7)



, (3.7)



Из формулы (3.7) следует формула (3.8)

, (3.8)



Учитывая выражения (3.2) и (3.6) подставляя числовые значения в (3.6), получим:

(3.9)



Определено отношение длины намотки к диаметру намотки . Для данного случая оно составляет . По полученному значению определяем длину намотки по формуле (3.10)



, (3.10)



По известной длине намотки определяем число витков, пользуясь формулой (3.11):

(3.11)



**3.2.1 Определение фактической длины намотки**

При намотке с шагом фактическая геометрическая длина катушки определяется формулой (3.12):

, (3.12)



где -шаг намотки,

= dпр 1,1

= 0,241,1=0,26, тогда *lн* = 0,26(13-1)=3,2мм;

теперь, по известному числу витков, определим фактическую индуктивность катушки по формуле (3.13)

, (3.13)



учитывая значение, полученное из выражения (3.11), и формулу (3.14), связывающую и ,



, (3.14)



подставляя полученное значение в (3.13), получим:



Полученное значение на 2% отличается от верхнего значения , отсюда следует, что мы не будем выполнять дополнительных расчетов для фактической индуктивности.



**3.2.2 Расчет оптимального диаметра провода**

Расчет оптимального диаметра провода производится графоаналитическим методом:

Определяем по формуле (3.15)

(3.15)



где средняя частота рабочего диапазона, Гц;



Вспомогательный коэффициент равен:



Определяем поправочный коэффициент . Для



Находим вспомогательный параметр ψ по формуле (3.16)

(3.16)



где N – число витков обмотки;

k – поправочный коэффициент;

z′– вспомогательный коэффициент;

D – диаметр каркаса, см.

Вспомогательный параметр ψ равен:



Определяем величину zопт из источника [1, стр. 102]

Величина zопт будет равна: .



По найденному значению zопт находим оптимальный диаметр провода, по формуле (3.17):

(3.17)



Итак, оптимальный диаметр провода будет равен:



**3.3 Уточнение электрических параметров конструкции**

Как, впрочем, и другие конструкции данная конструкция катушки индуктивности не совершенна из-за присутствующих сопротивлений потерь намотки, экрана и сердечника, каркаса, диаметр которого влияет на собственную емкость катушки. Сопротивление потерь намотки характеризуется активным сопротивлением провода и его сопротивлением току высокой частоты. Сопротивление провода является физический характеристикой материала, из которого изготовлен данный провод. Активное сопротивление металлического отрезка провода длиной и площадью поперечного сечения определяется по следующему соотношению (3.18)



, (3.18)



где - удельное сопротивление материала, из которого изготовлен провод, для меди оно составляет 0,0017 ;



фактическая длина намотки.



Учитывая это, получим формулу (3.19)

(3.19)



где диаметр одной жилы;



количество витков обмотки;



диаметр каркаса () .



Тогда, учитывая данные примечания, получим:



Сопротивление провода круглого диаметра току высокой частоты (до 100 *МГц*) можно вычислить по формуле (3.20)

, (3.20)



где r0 – сопротивление постоянному току, Ом;

F(z) – коэффициент, определяющий сопротивление с учетом

поверхностного эффекта;

G(z) – коэффициент, учитывающий эффект близости;

N – количество витков намотки;

D – диаметр каркаса;

полный диаметр провода без наружной изоляции;



*k* – для отношения (*l/D = 0,2), равен 1,4.*

Значения коэффициентов F(z) и G(z) определены из таблицы [1]

Аргумент z определяется по формуле (3.21)

(3.21)



где – диаметр провода, см;



– частота, Гц.



И равен:

,



Тогда



**3.3.1 Суммарное сопротивление потерь**

– суммарное сопротивление потерь, определяется по формуле (3.22)



, (3.22)



где – сопротивление провода току высокой частоты, характеризующие эффект близости и поверхностный эффект;



– сопротивление, обусловленное влиянием экрана;



– сопротивление потерь в диэлектрике каркаса;



**3.3.2 Сопротивление потерь в диэлектрике каркаса**

Сопротивление потерь в диэлектрике каркаса определяется по формуле (3.23)

, (3.23)



где С0 Д – емкость через диэлектрик, пФ;

f – частота рабочего диапазона, МГц;

L – реальная индуктивность катушки, мкГн.

- тангенс угла диэлектрических потерь();



Определяем собственную емкость катушки индуктивности, , пФ:



(3.24)



где *l* – длина намотки, см; *Dэ* – диаметр экрана, см; *D* – диаметр каркаса, см, Dэ/D=0,2см из источника [1, стр124]

Рассчитываем емкость через диэлектрик, :



(3.25)



где ε -диэлектрическая проницаемость каркаса (4÷6);

С0 – собственная емкость катушки, пФ; а – коэффициент, зависящий от типа намотки – при намотки круглого сечения на гладком каркасе *а =0,08.*

Тогда сопротивление потерь в диэлектрике каркаса будет равно:



**3.3.3 Сопротивление, вносимое экраном**

Сопротивление, вносимое экраном, определяется по формуле (3.26):

(3.26)



где – сопротивление току высокой частоты, определяется аналогично по формуле, Ом; – вносимое сопротивление, Ом.



Вносимое сопротивление, rэ:



где lэ – длина экрана, см;

к – коэффициент связи, для не магнитного экрана коэффициент связи равен единице;  – удельное сопротивление материала экрана – удельное сопротивление нанесенного серебряного покрытия - *0,017 Ом мм2/м;* e – коэффициент, зависящий от удельного сопротивления материала экрана для серебреного покрытия данный коэффициент равен десяти;

*f* – частота рабочего диапазона, *МГц*;

*Dэ* – диаметр экрана, см; *D* – диаметр каркаса, см.

Сопротивление току высокой частоты определяется

,



где r0 – сопротивление постоянному току, Ом;

F(z) – коэффициент, определяющий сопротивление с учетом

поверхностного эффекта;

N – количество витков намотки;

D – диаметр каркаса;

полный диаметр провода без наружной изоляции;



*k* – для отношения (*l/D = 0,2), равен 1,4.*

Значения коэффициентов F(z) и G(z) определены из таблицы [1]

Тогда сопротивление току высокой частоты будет равно:

rэ =[1,228+(1,4 130,1/21)2  (1-1,4) 0,34] =0,13 *Ом*

Отсюда следует, что сопротивление, вносимое экраном, будет равно:

(3.28)



Если просуммировать выше найденные значения rf, rэ, r, то суммарное сопротивление потерь будет равно:

rк=0,14+0,24+1,29=1,7 *Ом*

**3.3.4 Добротность катушки индуктивности**

По найденным сопротивлениям потерь определим добротность катушки индуктивности, пользуясь формулой (3.29)

, (3.29)



где ω – круговая частота; Lэ.к –индуктивность экранированной катушки;



*к* - коэффициент связи, который рассчитывается по формуле (3.30):

, (3.30)



где – коэффициент, зависящий от отношения l/D; D – диаметр катушки, см; Dэ диаметр экрана, см.



**3.4 Определение температурного коэффициента индуктивности**

Температурный коэффициент индуктивности (впредь ТКИ) является интегральной величиной, величиной состоящей из нескольких слагаемых, и определяется по формуле (3.31):

, (3.31)



где g – геометрическая составляющая, *1/град*;

– высокочастотная составляющая, учитывающая влияние эффекта близости, *1/град*;



э – составляющая, вносимая экраном, *1/град*.

емкостная составляющая.*1/град.*

**3.4.1 Составляющая, учитывающая влияние эффекта близости**

Воздействие температуры приводит к изменению удельного сопротивления обмотки, так для меди . Следствием этого является изменение глубины проникновения высокочастотных, составляющих переменного тока, что эквивалентно изменению диаметра витка обмотки.



Подобная нестабильность является, высокочастотной составляющей ТКИ, которую можно определить через добротность катушки по формуле (3.32):

(3.32)



где – коэффициент, зависящий от типа провода, = 2 для катушек с круглым проводом; Q – добротность катушки индуктивности.



Геометрическая составляющая рассчитывается по формуле (3.33):

, (3.33)



l – ТКЛР длинны, 1/град; К – коэффициент, равный 0,37…0,45; D – диаметр каркаса, см; – длина намотки, см.



Так составляющая  для каркаса, выполненного из керамики, составляет порядка 12⋅10-6 и l для меди составляет 1.7⋅10 -5 , и примем К=0,45 , то



**3.4.2 Составляющая, вносимая экраном**

Составляющая, вносимая экраном, э, определяется по формуле (3.34):

(3.34)



где *к*–ТКЛР материала каркаса катушки, 1/град; *э*–ТКЛР материала экрана, 1/град; *k*– коэффициент, зависящий от отношения l/D.

Тогда cоставляющая, вносимая экраном, будет равна:



**3.4.3 Емкостная составляющая**

Емкостная составляющая определяется по формуле(3.35):

=ТК(С0.Д/Сконт) (3.35)

Тогда емкостная составляющая будет равна:

=1210-6(0,2/100)=0,02410-6 *1/град*

Итак, исходя из полученных результатов по формулам , ТКИ будет равен:

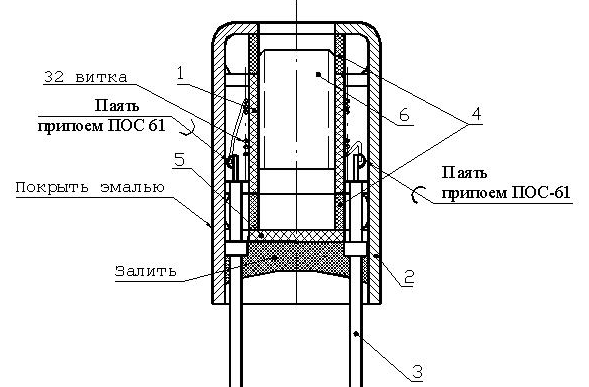
(3.36)



**4. ЭСКИЗНАЯ ПРОРАБОТКА ЭЛЕМЕНТА**

Катушку индуктивности планируется выполнить однослойной намоткой на каркасе, которым является магнитный сердечник, эскиз конструкции приведен на рисунке 4.1.

13 витков



1- каркас; 2- экран; 3- вывод; 4- втулка; 5 – прокладка; 6- подстрочник;

Рисунок 4.1 – Эскиз выполнения катушки индуктивности.

Выводы токопровода планируется закрепить как это показано на рисунке 4.2.

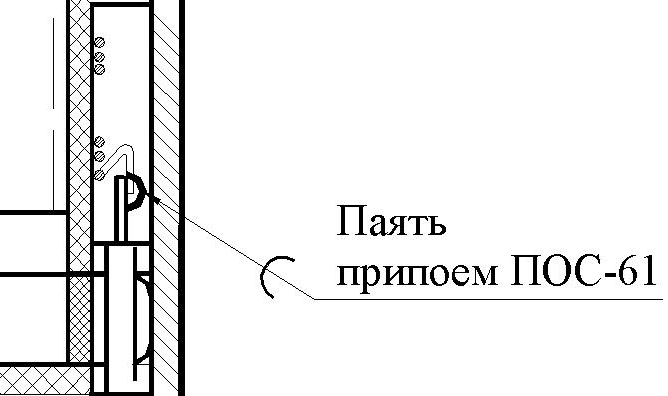


Рисунок 4.2 – Эскиз крепления выводов токопровода катушки индуктивности.

* 1. **Описание конструкции**

Катушка индуктивности состоит из токопровода, которым является провод марки ПЭЛ-0.5 ГОСТ 16186 - 74, намотанного на каркас из керамики, длина намотки составляет 4 *мм*, медного сердечника, который является подстроечником. Каркас фиксируется на одной втулке к которой также крепятся контактные выводы. Выводы катушки индуктивности крепятся к выводам конструкции при помощи припоя (ПОС- 61). Затем надевается вторая втулка, и конструкция фиксируется в экране. Для фиксации выводов конструкции выводы в месте их крепления во втулке заливаются эпоксидным компаундом. После выполнения этих операций на экран следует нанести защитное покрытие.

**ВЫВОДЫ**

В ходе конструкторского расчета катушки индуктивности была определена ее конструкция, сборочный чертеж которой приведен в приложении. Фактический предел подстроки величины индуктивности: от 2.35 до 1,65*мкГн* – определяется конструктивным выполнением взаимного положения намотки и сердечника, при этом катушка индуктивности обладает достаточно хорошей добротностью, и низким ТКИ. Конструкция катушки индуктивности очень проста, это позволит уменьшить количество сборочных операций, что крайне необходимо при годовой программе выпуска 1000 штук в год, которая вполне может являться массовым производством. Результаты проектирования показали, что на основании поставленных в задании, условий спроектированная катушка в определенной степени отвечает всем требованиям.

**ПАСПОРТ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ**

Габаритные размеры, мм

Длина (без учета выводов) 32;

Диаметр 10;

Фактическая индуктивность, мкГн 2;

Количество витков 13;

Тип провода ПЭЛ-0.5 ГОСТ 16186 – 74;

Добротность 170;

Сердечник (подстроечник) М1 ГОСТ 495-70;

Условия эксплуатации О 2.1 ГОСТ 15150-69.

**ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК**

1) Радиодетали, радиокомпоненты и их расчет. Под ред. А. В. Коваля. М.,"Сов. радио", 2007, 388с

2) Кжиров Р.И. Краткий справочник конструктора. – Л.: Машиностроение, 2003. – 464с.

3) Рычина Т.А.Электрорадиоэлементы.Учебник для вузов.М.,"Сов.радио",2006, 336с

4) Волглв В.А Детали и Узлы радиоэлектронной аппаратуры.М.,изд-во "Энергия",1967,542с.