

Предисловие

Изучение дисциплины «Радионавигационные системы ВС и АП» требует хороших знаний по общетехническим дисциплинам и большой самостоятельной работы. Ее освоение является залогом успешной работы при изучении вопросов технической эксплуатации, а также при выполнении дипломного проекта.

Традиционно она включает вопросы теоретических основ радионавигации и знания по конкретным радионавигационным системам. К основным вопросам теоретических основ радионавигации можно отнести:

- основные понятия навигации и самолетовождения;
- основы амплитудных, частотных, фазовых и других методов радионавигационных измерений;
- основы построения бортовых навигационно-пилотажных комплексов и наземных радионавигационных систем (РНС);
- основы комплексного использования РНС.

Изучение схем радиоприемных и радиопередающих каналов РНС опирается на ранее полученные знания в соответствующих курсах. Конкретные схемы преобразования сигналов с целью получения необходимой навигационной информации изучаются только в данной дисциплине.

Для изучения отдельных систем и устройств, описание которых отсутствует в учебной литературе, необходимо использовать заводские технические описания на оборудование, имеющиеся в лабораториях учебной базы УАТЦ.

Курсовое проектирование посвящено разработке радиотехнических систем навигации. Возможен выбор тем как по наземной, так и по бортовой аппаратуре.

Курсовой проект является отчетным документом студента и должен оформляться в соответствии с требованиями ЕСКД.

Целью проектирования является разработка бортовой или наземной аппаратуры радионавигационной системы (РНС) или устройства (РНУ). Разработка аппаратуры должна включать: определение ее технических параметров по заданным тактическим параметрам; разработку структурной схемы; эскизный расчет функциональной схемы; расчет принципиальной схемы одного из основных узлов аппаратуры; формирование требований к установке (размещению) аппаратуры, правилам ее эксплуатации; разработку конструкции; оформление требуемой документации. В том случае, если у разрабатываемой РНС или РНУ существует система-аналог, эксплуатируемый в ГА, то работу над проектом следует начинать с его анализа. Тогда целью проектирования является совершенствование тактико-технических параметров аппаратуры, включая эксплуатационные и стоимостные характеристики, на основе критического подхода к уже имеющимся техническим решениям. В таком виде курсовой проект может явиться основой дипломного проекта.

1. Структура пояснительной записки курсового проекта

Типовая структура пояснительной записки курсового проекта (КП) представлена ниже:

	Примерный процент от общего объема
1. Титульный лист (Приложение 1).	
2. Содержание.	
3. Введение.	0.5%
4. Раздел 1. Обоснование и расчет эксплуатационно-технических характеристик РНС.	39%
5. Раздел 2. Разработка структурной схемы.	20%
6. Раздел 3. Разработка функциональной схемы.	20%
7. Раздел 4. Разработка принципиальной схемы узла.	10%
8. Раздел 5. Конструктивная и эксплуатационная части.	10%
9. Заключение.	0,5%
Приложение: чертеж функциональной схемы; чертеж принципиальной схемы	

Выбор варианта задания осуществляется студентом из перечня заданий, приведенных в Приложении 2. Этот перечень включает набор комплексных заданий, для выполнения которых может создаваться бригада из 2–4 студентов, а также заданий по наземной или бортовой тематике.

Выбор задания необходимо согласовывать с руководителем курсового проектирования.

По инициативе студента возможен выбор индивидуальной темы курсового проекта, связанного с разработкой цифровой модели РНС, лабораторной установки, имитирующей сигналы РНС и т.д. Такие темы могут носить и чисто эксплуатационный характер, но должны лежать в рамках данной учебной дисциплины и быть согласованными с руководителем курсового проектирования.

Общий объем пояснительной записки курсового проекта 35-40 листов. В ряде тем КП требуется провести анализ влияния внешних или внутренних факторов на эксплуатационно-технические параметры РНС (РНУ). Например, влияние нестабильности коэффициентов модуляции, изменение уровня подстилающей поверхности, влияние переотражающих объектов и т.д. Указанные расчеты необходимо приводить во втором разделе пояснительной записки КП. При этом требуется четкое понимание физического смысла

используемых формул.

2. Методические указания к выполнению основных разделов проекта

2.1. Введение

Введение содержит краткий обзор вопроса в связи с задачами безопасности полетов и экономической эффективностью. Отмечается место проектируемой системы в комплексе радионавигационных средств и дается общая характеристика достигнутого в настоящее время технического уровня. Из данного раздела должен следовать вывод об актуальности решаемой задачи, обоснование и описание метода исследования.

2.2. Обоснование и расчет эксплуатационно-технических характеристик

В данном разделе дается классификация РНС по типу измеряемого параметра радиосигнала: амплитудная, частотная, фазовая, временная (импульсная) и др. В классе амплитудных РНС указывается используемый метод измерения: метод минимума, метод максимума, метод сравнения. Проводя анализ разрабатываемой системы, следует иметь в виду, что наиболее важными для РНС являются следующие тактические параметры:

- точность определения навигационного параметра;
- рабочая область и дальность действия;
- пропускная способность (для «временных» РНУ);
- надежность изделия.

В случае, если значение тактического параметра не задано в условии темы КП, его следует обосновать на основе норм ИКАО [4], справочной литературы [5]. Следующим этапом является обоснование и расчет технических параметров РНС, среди которых основными являются:

- величина и стабильность несущей частоты. Диапазон частот;
- мощность передатчика и чувствительность приемника;
- вид и параметры модуляции;
- характеристики диаграммы направленности антенн.

Особое место при анализе работы и проектировании РНС занимает вопрос точности радионавигационных измерений, т.к. точность является одним из основных тактических параметров РНС. Наземные РНС и РНУ, как правило, являются частью измерительных систем. Для неавтономных РНС общую погрешность измерения (σ_z) можно условно представить в виде суммы 3-х составляющих: погрешности бортовой аппаратуры, наземной аппаратуры и погрешности за счет среды распространения. Учитывая их примерное равенство, погрешность, обусловленная наземной аппаратурой, представляется в виде:

$$\sigma_{\text{наз}} = \frac{\sigma_z}{\sqrt{3}} \leq \frac{z}{\sqrt{3}},$$

где Z - допустимые отклонения самолета,

$\sigma_{\text{наз}}$ - среднеквадратическая погрешность наземной аппаратуры.

Расчет точностных характеристик РНС должен иметь итерационный характер и выполняться в следующем порядке:

1. На основе заданной погрешности определения местоположения летательного аппарата (ЛА) σ_r оценивается погрешность измерения навигационного параметра σ_N , используя соотношение [7]:

$$\sigma_r = \frac{1}{\sin(\gamma)} \cdot \sqrt{(k_1 \cdot \sigma_{N1})^2 + (k_2 \cdot \sigma_{N2})^2}, \quad (1)$$

где $N1, N2$ – навигационные параметры (азимут, дальность и т.д.), используемые для определения местоположения; γ - угол пересечения линий положения; K_1, K_2 – коэффициенты погрешности определения линий положения. В общем случае $K_i = |(grad(N_i))^{-1}|$.

Обеспечить заданное значение σ_r можно при различных соотношениях между ошибками измерения N_1 и N_2 , т.е. нужно общую погрешность рационально распределить между указанными составляющими.

2. Рассчитывается требуемая погрешность измерения информативного параметра сигнала (σ_I), опираясь на соотношение в [7]:

$$\sigma_N = \sqrt{(I \cdot \sigma_M)^2 + (M \cdot \sigma_I)^2}, \quad (2)$$

где I - измеряемый информативный параметр сигнала (амплитуда, фаза и т.д.);

M - масштабный коэффициент, связывающий I и навигационный параметр (дальность, азимут и т.д.);

σ_M - средняя квадратическая погрешность масштабного коэффициента, вызванная дестабилизирующими факторами.

3. По известной оценке σ_I проводится расчет технических параметров РНС, исходя из метода измерения и других требований.

В радионавигационных устройствах широко применяются меры по стабилизации масштабного коэффициента, что позволяет пренебрегать составляющей σ_M в формуле (2).

Так, например, в амплитудных угломерных устройствах, работающих по методу сравнения:

$$\sigma_N = \frac{f(\theta_0)}{2 \cdot f'(\theta_0)} \sigma_I, \quad (3)$$

по методу максимума:
$$\sigma_N = \sqrt{\frac{2}{f''(\theta_0)}} \sigma_I, \quad (4)$$

по методу минимума:
$$\sigma_N = \frac{1}{f'(\theta_0)} \sigma_I, \quad (5)$$

где $f(\theta_0)$, $f'(\theta_0)$, $f''(\theta_0)$ - нормированная диаграмма направленности антенны (ДНА) и ее производные в равносигнальном направлении.

Обязательным элементом амплитудных угломерных РНУ является одна или несколько направленных антенн, с помощью которых формируется сигнал с амплитудой $U_m(\varphi_p)$, зависящей от угла рассогласования φ_p между осью симметрии ДНА и направлением передатчик-приемник. Информативный параметр сигнала образуется как:

$$I = \frac{U_m(\varphi_p)}{U_{m0}},$$

где U_{m0} - амплитуда опорного сигнала.

В фазовых дальномерных системах справедливо соотношение [7]:

$$\sigma_N = \frac{\lambda_M}{4 \cdot \pi} \cdot \sigma_I, \quad (6)$$

где λ_M - длина волны модуляции.

Для угломерной системы типа интерферометра с базой d зависимость

$\sigma_N = f(\sigma_I)$ имеет вид:

$$\sigma_N \approx \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot \sigma_I, \quad (7)$$

где λ - длина волны.

В импульсных (временных) системах значение M может принимать значение $M=c/2$ (дальномерные РНУ) или $M=2\pi F_{вр}$ [рад/с] (угломерные РСБН), где $F_{вр}$ - частота вращения азимутальной антенны, c - скорость света.

Величина минимальной среднеквадратической погрешности измерения параметра сигнала, характеризующая потенциальную точность измерения, т.е. учитывающая лишь флуктуационные погрешности измерения, определяется формулами:

$$\begin{aligned} \text{для амплитудных РНУ: } \tilde{\sigma}_I &= E_m \cdot q^{-1}; \\ \text{для фазовых РНУ: } \tilde{\sigma}_I &= q^{-1}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{для временных: } \tilde{\sigma}_I = \tau_u \cdot q^{-1},$$

где E_m - амплитуда сигнала,

q - отношение сигнал/шум на выходе приемника,

τ_u - длительность колоколообразного импульса $\exp(-t/\tau_u)^2$ на уровне 0,78.

При разработке или анализе конкретных РНС рекомендуется использовать формулы, учитывающие их схемное решение [5, 8, 9, 19, 30].

К примеру, для фазовых угломерных РНУ:

$$\sigma_I = \frac{1}{q^2 \cdot m \cdot S_\phi} \cdot \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}} \quad (q \ll 1) \quad (9)$$

$$\sigma_I = \frac{1}{S_\phi} \cdot \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}} \cdot \frac{\sqrt{2+m^2}}{m} \cdot \frac{1}{q} \quad (q \gg 1), \quad (10)$$

где m - коэффициент модуляции;

$\Delta f, \Delta F$ – полосы частот приемника и измерителя фазы соответственно;

S_ϕ – крутизна фазового дискриминатора.

Формулы (9, 10) учитывают и динамическую составляющую погрешности. Для импульсных угломерных систем:

$$\sigma_I = \frac{1}{f'(\theta_{0.5}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{\text{вр}}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}, \quad (11)$$

где $f'(\theta_{0.5})$ - крутизна ДНА;

$F_{\text{вр}}$ - частота вращения ДНА.

Пример 1. РНС определения местоположения ЛА на базе 2-х радиодальномеров:

-на основе известных норм продольного и поперечного эшелонирования задается значение погрешности оценки местоположения самолета σ_r ;

-по методу определения места, в данном случае дальномерному, находится погрешность для навигационного параметра $N=D$

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{2} \cdot \sigma_D}{\sin(\gamma)} \quad (12)$$

(значением синуса угла γ пересечения линий положения – линий равных дальностей – можно задаться или определить по рабочей зоне используемых радиомаяков);

-с учетом масштабного коэффициента M , связывающего измеряемое запаздывание сигнала с дальностью, и нестабильности σ_m определяется σ_t . В данном случае $M = c/2$ и $\sigma_m = 0$. Следовательно, $\sigma_D = c \sigma_t / 2$. Если дальность определяется по времени запаздывания импульсного сигнала, то система временная ($I = t$) и можно воспользоваться соотношением [32]:

$$\sigma_t = \frac{1.25 \cdot \tau_{\text{фр}} \cdot \sigma_{\text{ш}}}{U_{\text{и}}}, \quad (13)$$

где $\tau_{\text{фр}}$ – длительность фронта импульса;

$U_{\text{и}}$ – амплитуда импульса;

$\sigma_{\text{ш}}$ – среднеквадратическое значение шума.

Данное выражение связывает крутизну фронта импульса

$$S_{\phi} = 0.8 \frac{U_n}{\tau_{\phi p}}$$

с найденной ранее требуемой погрешностью измерения параметра сигнала σ .

Значение $\sigma_{ш}$ можно найти, если известно требуемое отношение сигнал/шум q , из равенства:

$$q = \frac{U_n}{\sigma_{ш}}; \quad q = \frac{E_0}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{ш}} \quad (\text{для непрерывных сигналов}), \quad (14)$$

где E_0 – амплитуда колебаний несущей частоты.

Возможен путь определения $\sigma_{ш}$ по спектральной плотности мощности шума на входе G_0 и полосе приемника Δf_c

$$(\sigma_{ш})^2 = G_0 \cdot \Delta f_c.$$

Далее обосновывается схемное решение системы.

Пример 2. Рассчитать точность измерения информативных параметров системы ближней навигации, измеряющей азимут A и дальность D до ВС.

В соответствии с формулой (1) имеем:

$$\sigma_r = \sqrt{(0.5 \cdot \sigma_D)^2 + (0.0175 \cdot D \cdot \sigma_A)^2}.$$

Используя соотношение $2D = ct$ и формулу (2), находим, что для обеспечения $\sigma_D = 100$ м необходимо получить $\sigma_t = 0,7$ мкс. Аналогично для получения отсчета азимута с погрешностью $\sigma_A = 2,5$ градуса с помощью фазового угломера с вращающейся однолепестковой ДНА необходимо обеспечить измерение огибающей сигнала с погрешностью:

$$\sigma_{\psi} = \sigma_A$$

по полученным значениям σ_t и σ_{ψ} разрабатываются схемы измерителей.

Следует помнить, что на общую погрешность измерения навигационного параметра в общем случае влияют внешние и внутренние дестабилизирующие факторы. Для оценки их влияния можно использовать Приложение 3, а также [5, 8, 21, 25, 30].

Если задачей является повышение точности, то необходимо снижать методические, инструментальные и другие виды погрешностей. Так, проектируя РВ с повышенной точностью и зная, что основная методическая погрешность ΔH обратно пропорциональна девиации частоты Δf

$$\Delta H = \frac{C}{8 \cdot \Delta f},$$

можно ограничиться методами увеличения Δf . Однако более кардинальное решение - изменение метода определения высоты, использование схем измерения, отличных от счетчиков импульсов.

При расчете энергетических характеристик РНС, в частности, требуемой мощности передатчика ($P_{ср}$), следует учитывать с каким типом волны (поверхностная, пространственная и т.д.) работает данная РНС. Мощность

прямолинейно распространяющейся волны в точке приема обратно пропорциональна квадрату расстояния между излучателем и приемником. Если известно требуемое действующее значение напряженности электрического поля радиоволны (E_d) в точке приема, то для обеспечения дальности действия РНС D_{max} необходимо использовать передатчик с мощностью [10]:

$$P_{cp} = \frac{(E_d)^2 \cdot (D_{max})^2}{6 \cdot 10^4 \cdot G}, \quad (15)$$

где P_{cp} - средняя мощность передатчика, кВт;

D_{max} - расстояние, км;

G - коэффициент усиления антенны;

E_d - напряженность электрического поля, мВ/м.

Формулу (15) можно использовать при анализе наземных пеленгаторов, курсовых маяков СП, РСБН, МСП и т.д.

Если задана чувствительность приемника ($P_{np \min}$), т.е. в энергетическом балансе необходимо учесть параметры приемной антенны, то следует пользоваться известным уравнением дальности для свободного пространства [11]:

$$D_{max} = \sqrt{\frac{P_{cp} \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^2 \cdot P_{np \min}}}, \quad (16)$$

где G_1, G_2 – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн;

$$G_i = K_{HDi} \cdot \eta_i;$$

$$K_{HDi} = \frac{4 \cdot \pi \cdot S_i}{\lambda^2},$$

K_{HDi} - коэффициент направленного действия i -ой антенны,

S_i - эффективная площадь i -ой антенны,

η_i - КПД i -ой антенны

или в другой записи:

$$D_{max} = 1.24 \cdot 10^3 \cdot \frac{\lambda}{q} \cdot \sqrt{\frac{P_{cp} \cdot G_1 \cdot G_2}{k \cdot T \cdot \Pi \cdot \Delta f}}, \quad (17)$$

где kT - спектральная плотность шума,

Π - коэффициент шума приемника.

В формуле (16), (17) средняя мощность (P_{cp}) измеряется в Вт, длина волны (λ) в метрах, q – требуемое отношение сигнал/шум на входе детектора ПРМ, f - в МГц, D_{max} – в километрах.

Очень часто на практике мощность передающего устройства находят из уравнения баланса мощностей на максимальном удалении от передатчика, которое в логарифмическом виде записывается как:

$$P_{ПРД} = P_{ПР. \min} + G_1 + G_2 - L_p - L_3 + \eta_{ПРД} + \eta_{дн}, \quad (18)$$

где все параметры записываются в дБ и представляют собой:

L_p - потери на распространение ;

L_3 - потери на затухание в гидрометеорах ;

$\eta_{ПРД}$ - потери на участке от ПРД до антенны ;

$\eta_{дн}$ - потери на неравномерность характеристик ДН передающей антенны.

В случае, если передатчик излучает импульсный сигнал мощностью P_u со скважностью (ξ), то его средняя излучаемая мощность будет равна:

$$P_{cp} = \frac{P_u}{\xi}. \quad (19)$$

Формула (19) позволяет оценить пропускную способность РНС, ограничиваемую, как правило, мощностью передатчика.

Пример. Выходной каскад дальномерного передатчика РСБН-4Н собран на лампе ГИ-23Б, которая обеспечивает $P_{cp} = 140$ Вт. Излучаемый сигнал имеет параметры: $P_u = 30$ кВт, длительность импульса $\tau_u = 1,5$ мкс, частота следования $F_{cl} = 30$ Гц. Среднее число ответов, обеспечиваемое передатчиком в единицу времени (I_c), примерно равно:

$$n_{отв} = \frac{P_{cp}}{P_u \cdot \tau_u \cdot F_{cl}} \approx 100.$$

По мере укорочения длины волны начинает сказываться поглощение радиоволн в атмосфере и гидрометеорах, которое следует учитывать коэффициентом километрового затухания радиоволн β_3 соотношением [11]:

$$D_{max1} = D_{max} \cdot e^{-0.23 \cdot \beta_3}. \quad (20)$$

Земля в силу своей сферичности может экранировать приемник от передатчика, поэтому наряду с расчетом энергетики необходимо следить за выполнением геометрического условия прямой видимости:

$$D_{прв} = (3.7...4.1) \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (21)$$

где h_1, h_2 - высоты расположения соответственно наземной и бортовой аппаратуры в метрах;

$D_{прв}$ - дальность прямой видимости в километрах.

В диапазоне СВ и ДВ (приводные радиостанции) следует учитывать на распространение волн влияние земли. В этом диапазоне преобладают поверхностные волны, мощность которых затухает обратно пропорционально приблизительно четвертой степени расстояния. В частности, для расчета дальности действия приводных радиостанций можно воспользоваться формулой М.В. Шулейкина [10]:

$$E_D = \frac{245 \cdot \sqrt{P_{cp} \cdot G}}{D_{max}} \cdot F_1, \quad (22)$$

где все обозначения и размерности аналогичны формуле (15);

F_1 – множитель ослабления (мВ/м) или графиком Международного Комитета по Радиосвязи (МККР), фрагмент которого приведен на рис.1. Все значения напряженности поля на рис. 1 приведены к

величине излучаемой мощности, равной 1 кВт. Для определения напряженности электрического поля на данном расстоянии надо величину E_D , взятую из графика, умножить на квадратный корень из мощности передатчика (в кВт).

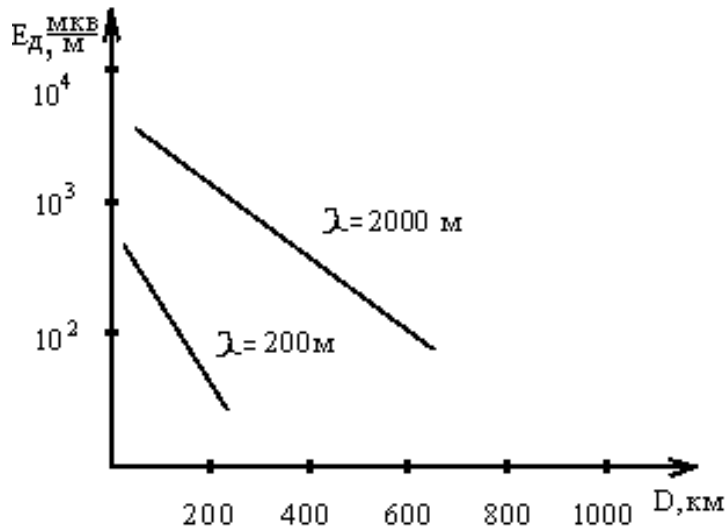


Рис. 1. График МККР для определения напряженности электрического поля на средних волнах в ночные часы

2.3. Структурная схема

После выбора метода, лежащего в основе работы разрабатываемой системы, имея результаты предварительных расчетов зависимостей зоны действия, реализуемой системой точности, надежности и т.д. от технических параметров, строится структурная схема РНС. Структурная схема должна отражать алгоритм формирования и преобразования сигналов. Описание структурной схемы должно сопровождаться описанием принципа действия РНС (РНУ) с поясняющими формулами, эпюрами и т.д.

2.4. Функциональная схема

Данный раздел посвящен краткому анализу основных функциональных узлов РНС (РНУ) и включает в себя подразделы:

1. Антенно-фидерное устройство (АФУ).
2. Передающее устройство (ПРД).
3. Приемное устройство (ПРМ).
4. Устройство обработки сигналов (УОС).
5. Аппаратура контроля.
6. Аппаратура индикации, питания и т.д. (при необходимости).

В данном разделе на основе рассчитанных технических параметров дается обоснование и выбор технического решения основных функциональных узлов РНС. К примеру выбор антенны (особое внимание антенной системе

следует уделять в амплитудных РНС), ее тип, структура, состав, расчет требуемой высоты подвеса антенны, ее основных параметров (длина, число излучателей и т.д.) и характеристик (диаграмма направленности, коэффициент направленного действия, точность установки луча ДНА и т.д.).

Рассматривая передатчик, нужно выбрать оконечный мощный СВЧ прибор (транзистор, лампа, амплитрон, пролетный клистрон, ЛБВ и т.д.), элементную базу возбуждителя, определить число каскадов ПРД, тип модулятора (механический, электронный). Другими словами необходимо провести эскизный расчет ПРД, удовлетворяющего разрабатываемой РНС по мощности, частоте, стабильности, нелинейным искажениям и т.д.

Проводя обоснование и выбор функциональной схемы приемника, следует обеспечить заданную чувствительность, диапазон частот, динамический диапазон, уровень искажения и т.д. При оформлении этих подразделов необходимо опираться на знания, полученные в процессе выполнения курсовых проектов по ПРД, ПРМ и АФУ.

В подразделе аппаратуры контроля надо сформулировать требования к системе контроля, определить состав контрольной аппаратуры, исходя из перечня выходных параметров, которые необходимо контролировать. Оценить основные составляющие погрешности контроля (σ_i), учитывая, что суммарная погрешность определяется как:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum \sigma_i^2}$$

2.5. Принципиальная схема

Расчет принципиальной схемы проводится для 1-2-х каскадов наиболее значимого функционального узла (возбудитель, оконечный каскад усилителя мощности и т.д.).

Элементы схемы должны быть выбраны по номиналу и рассеиваемой мощности в соответствии с ГОСТом. Если в качестве элементной базы используются микросхемы, то расчет выполняется для звеньев согласования, обратной связи и в цепях, обеспечивающих рабочий режим. Тип микросхемы обосновывается. Разработка принципиальной схемы включает обоснование схемных решений и элементной базы.

Известно, что один и тот же каскад (генератор, усилитель, мультивибратор и т.д.) может быть построен по разным принципиальным схемам. В данном подразделе надо дать обоснование схемных решений.

Элементная база в разрабатываемом канале (узле) должна, очевидно, в проектах, связанных с ограниченной модернизацией РНС, быть аналогичной элементной базе других каналов. Если в проекте предлагается РНС с новым методом измерения, то элементная база такой перспективной системы должна строиться на микросхемах. Тип микросхем должен быть обоснован.

Расчету подлежат достаточно сложные каскады. Таких каскадов должно быть 4,5. Рассчитывается электрически связанная часть схемы, включающая как каскады, так и элементы связи между ними.

Элементы схемы должны быть выбраны по номиналу и рассеиваемой мощности в соответствии с ГОСТом. В схеме на микросхемах это необходимо сделать для звеньев согласования, обратной связи и в цепях, обеспечивающих рабочий режим.

В процессе проектирования часто возникает задача выбора элементов из условия обеспечения требуемых характеристик методом последовательных приближений. Если использовать при расчете ЭВМ для пересчета достаточно ввести только новые исходные данные.

Так, при проектировании оконечного каскада модулятора необходимо выбрать тип транзистора и оценить необходимость применения радиатора. Заключение о возможности применения транзистора можно дать после расчета его температурного режима. Для этого находится наружное тепловое сопротивление (корпус-среда)

$$R_{t_H} = \frac{0,9T_{n\cdot\text{дон}} - T_{0\text{max}}}{P_{\kappa\text{max}}} - R_{t_B},$$

где $T_{n\cdot\text{дон}}$ - допустимое значение абсолютной температуры перехода;

$T_{0\text{max}}$ - максимальная внешняя температура;

$R_{\kappa\text{max}}$ - максимальная мощность рассеяния на коллекторе;

R_{t_B} - внутреннее тепловое сопротивление транзистора.

Необходимая полная поверхность вертикального металлического радиатора будет равна:

$$S = 1400/R_{t_H}, \text{ см}^2.$$

Если данная поверхность не превосходит внешней поверхности транзистора, то радиатор не нужен. Если же значение R_{t_H} отрицательно или много меньше R_{t_B} то транзистор непригоден.

Проверка последнего условия и ее исход могут потребовать перебора типов транзистора. Программа для ЭВМ, приведенная в [32], поможет быстро решить данную задачу.

Выбор элементов по ГОСТу связан с определением допусков на параметры. Требования к допускам должны быть обоснованы. Если требования завышены, то возрастает стоимость устройства.

Расчет допусков ведется методом последовательных приближений [32]. При этом находятся коэффициенты влияния, необходимые при исследовании или построении систем. Исследование позволяет рассчитать, например,

производственный допуск на амплитуду выходного напряжения. В задаче синтеза, решаемой при построении, например, мультивибратора с заданным допуском на длительность импульса, рассчитываются допуски на параметры элементов и нестабильность питающих напряжений. Расчет принципиальной схемы не требуется в курсовых проектах, решающих поставленную задачу методами математического моделирования РНС на ЭВМ. При цифровом моделировании на ЭВМ строится алгоритм преобразования входного сигнала в выходной. Учитывая, что РНС представляет собой нелинейную систему, функциональную схему разбивают на совокупность линейных инерционных звеньев и нелинейных безынерционных.

2.6. Конструкция. Эксплуатационная часть

Конструктивное оформление разрабатываемой РНС (РНУ) должно отвечать на вопросы, в какой степени разработанная аппаратура может быть реализована «в железе» и в каком виде (габариты) она может быть выполнена. Особое внимание следует уделить требованиям к схеме размещения аппаратуры на местности. Вопросы размещения необходимо рассматривать с учетом удобства технического обслуживания и эксплуатации.

3. Указания по оформлению

Общие требования к оформлению расчетно-пояснительной записки изложены в ЕСКД. Основные необходимые при оформлении курсового проекта ГОСТы следующие:

ГОСТ 2.102-68. Виды и комплектность конструкторских документов – ГОСТ позволяет дать правильные названия чертежам и документам;

ГОСТ 2.104-68. Основные надписи (дает правильное толкование графам «штампа»);

ГОСТ 2.105-68. Общие требования к текстовым документам;

ГОСТ 2.106-68. Текстовые документы (дают формы листа текста, принцип разбиения на разделы и подразделы, требования к заполнению (нумерации формул и рисунков, форма ссылки и т.д.));

ГОСТ 2.301-68. Форматы (дает схему построения форматов чертежей);

ГОСТ 2.304-68. Шрифты чертежные (включает шрифты как букв, так и знаков формул);

Графическая часть проекта, выносимая в приложение к пояснительной записке, включает схемы, имеющие следующие шифры и наименования (ГОСТ 2.701-68);

Э1 – схема электрическая структурная;

Э2 – схема электрическая функциональная ;

Э3 – схема электрическая принципиальная. Правила выполнения электрических схем даны в ГОСТе 2.702-69.

4. Защита курсового проекта

Защита производится в форме доклада (7–10 минут) с использованием графической части, который должен быть подготовлен, ясен по содержанию и четок по форме. Содержание доклада должно сжато отражать проделанную работу – от постановки задачи до выводов. Графическая часть должна использоваться продуманно, без описания полного прохождения сигналов через все каскады. Доклад должен характеризовать уровень проделанной работы – рассмотренные варианты, предложенные методы, встречающиеся при технической реализации трудности и пути их преодоления. Необходимо подчеркнуть эксплуатационную направленность проекта.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

Кафедра РТУ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ
по дисциплине «Радионавигационные системы ВС и АП»

Вариант № _____
Тема: _____

Выполнил студент _____
Номер зачетной книжки _____
Руководитель: _____

« К защите »

Роспись руководителя проекта _____
Проект защищен с оценкой _____
Роспись членов комиссии _____

Москва 20__ г.

1. Перечень заданий к курсовому проектированию (комплексные темы)

1.1. Разработать радиотехническую систему ближней навигации на базе 3-х пеленгаторов типа АРП-75 с автоматическим расчетом места (координат) самолета (МС), обеспечив максимально возможную рабочую зону на высоте 1000 м в районе аэропорта со среднеквадратической погрешностью определения МС не более 3,5 км ($\sigma_{\text{МС}} \leq 3,5$ км).

В основе разработки системы лежит выбор ее базы, разработка алгоритмов расчета МС, реализуемых при вторичной обработке пеленгационной информации на микро ЭВМ, и отображение ее на индикаторе в местном диспетчерском пункте (МДП).

Среднеквадратическая погрешность УКВ пеленгаторов $\sigma_A = 1,5^\circ$ [6, 7, 8, 10,23].

1.2. Разработать радиотехническую систему ближней навигация на базе 3-х пеленгаторов с автоматическим расчетом места самолета и передачи рассчитанных данных на борт с помощью канала передачи данных (УКВ связь)

В проекте необходимо:

- дать предложения по наиболее целесообразному расположению радиопеленгаторов на местности (база, взаимное расположение), которое обеспечивает максимальную рабочую зону;
- привести алгоритмы обработки сигналов.

В качестве специальной части выполнить эскизный проект (с разработкой структурной схемы) системы связи между пеленгаторами с микропроцессорным центром расчета или аппаратуры передачи данных о месте самолета (МС) на борт.

Оценить надежность системы.

Исходные данные:

Дальность действия пеленгаторов: 100–200 км на высотах полета 1000-5000 м.

Погрешность УКВ пеленгаторов: $\sigma_A = 1^\circ$.

Требуемая точность системы: $\sigma_{\text{МС}} \leq 1,5$ км [6,7,8,10,17,23].

1.3. Разработать радионавигационную систему определения координат (места) самолета (МС) в зоне аэродрома на базе трех радиодальномерных маяков ответчиков (РМД) системы ДМЕ. Исходные данные:

- зона действия РМД: не менее 200 км. На высоте 6000 м., в вертикальной плоскости не менее 40 град.;
- погрешность, вносимая РМД в измерение дальности, $\Delta D = \pm 75$ м;
- требуемая точность определения МС на борту: $\sigma_{\text{МС}} \leq 500$ м.

В проекте необходимо:

разработать структурную схему системы, рассчитать технические параметры, расположение на местности (базу системы), взаимодействие «земли» и «борта»; предложить алгоритмы обработки ответных сигналов на борту ВС; разработать функциональную схему наземной системы, форматы сигналов [6,7,25,27,29].

1.4. Разработать РНС определения координат самолета для местных воздушных линий (МВЛ) разностно-дальномерным методом на основе 3-х маяков-ответчиков РМД радиодальномерной системы ДМЕ, расположенных на углах прямоугольного равнобедренного треугольника с длиной катета $d = 1$ км. Предложить алгоритмы бортовой обработки ответных сигналов. Оценить реализуемые точности в зоне действия системы.

Исходные данные:

- зона действия РМД: не менее 200 км. На высоте 6000 м., в вертикальной плоскости не менее 40 град.

- погрешность, вносимая РМД в измерение дальности, $\Delta D = \pm 75$ м [6,7,25, 27,29].

1.5. Разработать радионавигационную систему определения координат (места) самолета (МС) «на земле» на основе радиопеленгатора типа АРП-75 и наземного маяка-ответчика РМД радиодальномерной системы ДМЕ. Допустимая погрешность измерения МС $\sigma_r = 500$ м. Среднеквадратические погрешности АРП $\sigma_A = 1^\circ$, ДМЕ $\sigma_D = 200$ м. Зона действия АРП и РМД: не менее 100 км. На высоте 6000 м в вертикальной плоскости не менее 40 град.

Требуемая рабочая область системы – зона аэродрома. Предусмотреть трансляцию измеренной дальности по УКВ каналу «на землю» и возможность отображения воздушной обстановки в зоне аэродрома на индикаторе КДП [6,7,17,26].

1.6. Разработать радионавигационную систему определения координат (места) самолета (МС) «на борту» на базе отечественной системы VOR/DME. Допустимая погрешность измерения МС $\sigma_r = 500$ м. Среднеквадратические погрешности: измерения азимута при использовании азимутального маяка РМА $\sigma_A = 1^\circ$, измерения дальности при использовании дальномерного маяка РМД $\sigma_D = 100$ м. Оценить зону действия системы, если рабочая зона действия РМД в горизонтальной плоскости $0-360^\circ$, в вертикальной плоскости $0-40^\circ$. Дальность действия 200 км на высоте 6000 м.

Рабочая зона действия РМА в горизонтальной плоскости $0-360^\circ$, в вертикальной плоскости $3^\circ-40^\circ$. Дальность действия 100 км на высоте 6000 м.

Разработать эскизный проект наземной аппаратуры РМД с детальным расчетом основных технических характеристик (мощность передатчиков (средней, импульсной), чувствительность приемника, параметры сигналов,

стабильность характеристик, определяющих точность измерения, вида антенны и т.д.).

Функциональная схема должна содержать тракт ВЧ, приемо-передающую аппаратуру, аппаратуру контроля и обработки сигналов, аппаратуру управления, аппаратуру формирования импульсов (ХИП, СО) в соответствии с принципом работы DME.

В случае эскизного проекта приемного устройства, работающего в диапазоне 1025-1150 МГц (126 каналов), предусмотреть его пороговую чувствительность не более 136 дБ·Вт и амплитуду выходного сигнала $U_{\text{вых}} \geq 4.5 \text{ В}$ [3,4,5,6,11,12,14,25,27,29].

1.7. Разработать радионавигационную систему определения координат (места) самолета (МС) «на борту» на базе отечественной системы VOR/DME. Допустимая погрешность измерения МС $\sigma_r = 500 \text{ м}$. Среднеквадратические погрешности: измерения азимута при использовании азимутального маяка РМА $\sigma_A = 1^\circ$, измерения дальности при использовании дальномерного маяка РМД $\sigma_D = 100 \text{ м}$. Оценить зону действия системы, если рабочая зона действия РМД в горизонтальной плоскости $0-360^\circ$, в вертикальной плоскости $0-40^\circ$. Дальность действия 200 км на высоте 6000 м. Рабочая зона действия РМА в горизонтальной плоскости $0-360^\circ$, в вертикальной плоскости $3^\circ-40^\circ$. Дальность действия 100 км на высоте 6000 м.

Разработать эскизный проект наземной аппаратуры РМА с детальным расчетом основных технических характеристик (мощность передатчика, параметры сигналов, стабильность характеристик, определяющих точность измерения, вида антенны и т.д.).

Функциональная схема РМА должна содержать тракт ВЧ, аппаратуру контроля и обработки сигналов, аппаратуру управления, аппаратуру формирования сигналов модуляции в соответствии с принципом работы VOR [3,4,5,6,11,12,14,25,27,29].

2. Перечень заданий к курсовому проектированию (бортовая тематика)

2.1. Модернизация радиокompаса АРК-15М с целью обеспечения встроенного контроля

Исследуется возможность встроенного контроля с использованием подачи сигнала на контрольный виток рамочной антенны. Проектируются генератор сигнала и схема контроля [15,24,25,27,29,30].

2.2. Разработка малогабаритного прибора для контроля работоспособности радиокompаса АРК-15М

Анализируется система контроля прибора типа ИРК-3 с подачей тестового сигнала на контрольный виток рамочной антенны. Проектируется

прибор, производящий расширенную проверку технических параметров АРК [15,24,25,27,29,30].

2.3. Модернизация АРК-15М с целью повышения точности установки частоты

Анализируются возможный шаг дискретности сетки частот и точность настройки. Проектируется счетно-логическая схема блока сетки частот [15,24,25,27,29,30].

2.4. Модернизация тракта выделения сигнала разностной частоты приемника радиовысотомера РВ-5

Анализируется схема фильтрации сигнала разностной частоты радиовысотомера РВ-5. Проектируется узкополосная схема фильтрации. Возможные решения – перестраиваемый узкополосный фильтр (РВ типа А-031), схема с фиксированной разностной частотой (РВ типа А-037) [24,25,27,29,30].

2.5. Разработка радиовысотомера с цифровой индикацией высоты и технического состояния (в режиме «Контроль»).

Анализируется схема радиовысотомера РВ-5. Канал индикации высоты модернизируется путем использования аналого-цифрового преобразователя. Дополнительно рассматривается режим контроля с цифровой электронной индикацией результатов проверки РВ в режиме «Контроль» [24,25,27,29,30].

2.6. Разработка модели радиовысотомера с измерением высоты путем определения значения разностной частоты в приемном тракте

Анализируется схема построения радиовысотомера РВ-5 с целью математического моделирования процессов в схеме. Выбирается среда программирования, разрабатывается и отлаживается программа. Результаты моделирования при изменении параметров схемы приводятся в виде графиков [24,25,27,29,30,31].

2.7. Модернизация модулятора доплеровского измерителя скорости и угла сноса ДИСС- 013

Анализируется передающий канал. Детально разрабатываются схемы возбуждения частоты и стабилизации индекса частотной модуляции [24,25,27,29,30].

2.8. Разработка доплеровского измерителя скорости и угла сноса с дискретным вычислительным устройством.

Анализируются недостатки вычислителя доплеровского измерителя скорости и угла сноса ДИСС-013 со следящими аналоговыми системами. Проектируется импульсный (дискретный) вычислитель [24,25,27,29,30,32].

2.9. Модернизация ДИСС-013 с целью сопряжения с бортовой ЦВМ

Исследуется работа ДИСС в составе бортового пилотажно-навигационного комплекса. Проектируется схема выдачи в бортовой вычислитель информации в цифровой форме [24,25,27,29,30].

2.10. Разработка имитатора сигналов канала VOR для лабораторной проверки аппаратуры навигации и посадки КУРС-МП

Анализируются требования, предъявляемые к имитатору. Детально разрабатывается тракт формирования НЧ сигналов. Учитываются требования автоматизации контроля [24,25,27,29,30].

2.11. Имитатор сигналов канала ИЛС для лабораторной проверки аппаратуры КУРС-МП

Анализируются требования, предъявляемые к имитатору. Детально разрабатывается тракт формирования НЧ сигналов. Учитываются требования автоматизации контроля [24,25,27,29,30].

2.12. Разработка модели самолетного дальномера

Исследуется система самолетного дальномера и разрабатывается программа для моделирования бортовой аппаратуры измерения дальности с использованием радиомаяков DME [24,25,27,29,30,31].

3. Перечень заданий к курсовому проектированию (наземная тематика)

3.1. Разработать амплитудный УКВ радиопеленгатор, реализующий измерение азимута и угла места в диапазоне частот $f=118-136$ МГц, на основе малобазовой антенной системы.

Разработать алгоритмы программной обработки низкочастотного сигнала на встроенном процессоре. Обеспечить среднеквадратическую погрешность измерения углов не хуже $\sigma \leq 3^{\circ}$, длительность пеленгуемого сигнала $T_0 \geq 1$ с. Дальность пеленгования на высоте $H=1000$ м, $D_{\max}=100$ км [5,6,7,15,17].

3.2. Разработать наземный пеленгатор сигналов самолетного запросчика ДМЕ ($f = 1000$ МГц). Допустимое значение среднеквадратической погрешности определения азимута ВС $\sigma_A = 0,02^{\circ}$. Длительность импульса запроса ДМЕ $t = 3$ мкс. Пеленгатор в виде фазового интерферометра с моноимпульсным приемником (многоканальная схема построения). Требуемая дальность действия $D = 50$ км. В проекте выбрать конфигурацию антенной системы (круг, «крест Миллса»), число приемных каналов. Разработать структурную схему, показать реализуемость требуемых исходных данных. Предусмотреть индикацию пеленга на цифровом табло КДП [6,7,12,14].

3.3. Разработать глиссадный радиомаяк инструментальной системы посадки, основанный на принципе «опорного нуля», для работы в условиях изменения снежного покрова в зоне аэродрома в пределах $\Delta h=0 \sim 1$ м. ГРМ должен удовлетворять радиомаякам 1-й категории ИКАО. Обеспечить номинальный угол глиссады $\Theta_0=2^{\circ}40'$. Рассчитать параметры антенной системы, мощность передатчика, допустимый уровень фазовых и амплитудных искажений. Рассчитать основные технические параметры маяка, обеспечивающие требуемые эксплуатационные характеристики излучаемого электромагнитного поля (напряженность, крутизну зоны и т.д.), для ГРМ 1-ой категории ИКАО [13,17,18,22].

3.4. Разработать одноканальный курсовой радиомаяк инструментальной системы посадки, основанный на принципе «опорного нуля» с передатчиком на твердотельных элементах, удовлетворяющий 2-й категории ИКАО. Дальность действия $D_{\max} = 46$ км. Ширина сектора курса $\varphi_0=4^{\circ}$. Рассчитать технические характеристики КРМ (мощность ПРД, параметры антенной системы, допустимый уровень фазовых и амплитудных искажений за счет внутренних факторов), исходя из требуемых эксплуатационных характеристик КРМ 2-ой категории (стабильность линии курса, крутизна зоны, стабильность крутизны зоны и т.д.) [13,17,18, 9,20].

3.5. Спроектировать наземную аппаратуру азимутального канала системы посадки сантиметрового диапазона ($\lambda=6$ см) (курсовой радиомаяк). Метод формирования угловой информации – временной со сканирующей ДНА. Зона действия: по азимуту $\pm 40^{\circ}$, по дальности 37 км. Допустимая погрешность угловых измерений $\sigma_{\varphi} = 0.05^{\circ}$. Затухание на максимальной дальности $L=-139$ дБ. Нарботка на отказ наземной аппаратуры $T_0 = 1500$ ч. Коэффициент усиления бортовой антенны $G_2 = 10$ дБ. Чувствительность бортового приемника $P_{\text{бр прм}} = 123$ дБ. В ходе выполнения проекта рассчитать основные параметры ФАР с коэффициентом усиления $G_1 = 30$ дБ. В передатчике предусмотреть фазовый манипулятор, амплитудный модулятор, преселектор, СВЧ ограничитель, аттенюатор, ферритовые вентили. Суммарные потери ПРД $\eta \approx 12$ дБ [12,16,21].

3.6. Разработать комплект наземной аппаратуры радиодальномера ДМЕ/Р диапазона (960-1215 кГц) для системы посадки самолетов 3-й категории. Допустимая погрешность измерения дальности за счет ответчика $3\sigma = 30$ м. Зона действия – по азимуту 360° , по дальности 60 км. При выполнении проекта предусмотреть: уменьшение допусков на время нарастания импульса ответа; автоматическую подстройку задержки тракта ответчика по контрольному сигналу с точностью (0,05-0,02) Мкс; использование малошумящих приемников [2,3,4,9].

3.7. Спроектировать курсовой радиомаяк СП и его расположение на местности для обеспечения допустимого искривления линии курса, вызванного отражением сигнала КРМ от стены ангара (модель плоской пластины), расположенного параллельно ВПП при удалении от нее на расстояние 500 м и при удалении от торца ВПП со стороны КРМ на 800м. Длина ангара 50 м, высота 12.5 м [19,20,22].

3.8. Спроектировать фазовый (квазидоплеровский) радиопеленгатор, обеспечивающий измерение азимута ВС в диапазоне частот 220-400 МГц с инструментальной погрешностью при пеленговании КИГ – 3^0 [7,8,23].

3.9. Разработать подсистему, обеспечивающую дифференциальный режим работы спутниковой системы навигации «ГЛОНАСС» (дифференциальные подсистемы) с оценкой её точностных характеристик, разработкой структурной схемы и режимов функционирования [1,2,28] .

НЕКОТОРЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ

1. Глиссадные радиомаяки

1.1. Общие формулы [17,18,20]

Нормированная диаграмма направленности антенны ГРМ с учетом влияния земли имеет вид:

$$f(\theta) = \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{h}{\lambda} \cdot \sin(\theta)\right). \quad (\text{П.1})$$

Участок земной поверхности, существенный для формирования поля антенны, определяется длиной волны λ , высотой точки приема H , высотой подвеса антенны h и зависит от угла θ (рис. П.1.).

Продольные размеры этого участка можно определить из выражений (при $H \gg h$):

$$x = h \cdot \text{ctg}(\theta),$$

$$x_0 = x \cdot \left(1 + \frac{1}{2 \cdot h \cdot \sin(\theta)}\right),$$

$$a_x = \frac{1}{\sin(\theta)} \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot h}{\sin(\theta)} \cdot \left(1 + \frac{\lambda}{4 \cdot h \cdot \sin(\theta)}\right)},$$

$$b_y = a \cdot \sin(\theta),$$

- где x - расстояние от проекции точки O , в которой находится антенна радиомаяка, до точки отражения C ;
 x_0 - расстояние от проекции точки O на земную поверхность до центра участка O' ;
 a_x - большая продольная полуось существенного участка;
 b_x - малая ось существенного участка.

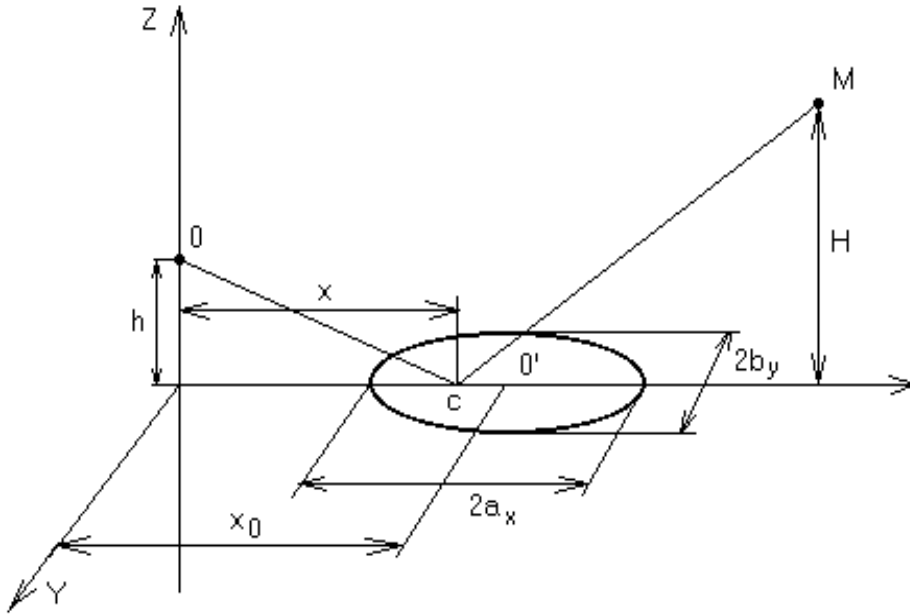


Рис. П.1. К определению размеров участка земной поверхности, существенного для формирования ДН антенной системы ГРМ

ГРМ с "Опорным нулем"

Разность глубин модуляции определяется формулой:

$$P_{ГМ} = (M_1 - M_2) = \frac{E_{mB} f_B(\theta)}{E_{mH} f_H(\theta)}. \quad (\text{П.2})$$

Угол наклона глассада:

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{2 \cdot h_B}. \quad (\text{П.3})$$

Крутизна зоны:

$$S_0 = m \cdot \frac{E_{mB}}{E_{mH}} \cdot f_B'(\theta_0) = 2 \cdot \pi \cdot m \cdot \frac{E_{mB}}{E_{mH}} \cdot \frac{h_B}{\lambda}. \quad (\text{П.4})$$

Изменение угла глассада и крутизны зоны за счет изменения уровня подстилающей поверхности выразятся соответственно:

$$\Delta \theta_0 = -\frac{\theta_0}{h_B} \cdot \Delta h, \quad (\text{П.5})$$

$$\Delta S_0 = \pm \frac{S_0}{h_B} \cdot \Delta h. \quad (\text{П.6})$$

Влияние внутренних дестабилизирующих факторов аналогично равносильному маяку.

Выражение для изменения угла глассады $\Delta \theta$ при изменении глубин модуляции (Δm) и амплитуды токов (ΔI) в антеннах радиомаяка имеет вид:

$$\Delta\theta_0 = \frac{m}{S_0} \cdot \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta I}{I} \right). \quad (\text{П.7})$$

Зависимость (П. 9) позволяет подсчитать требуемую стабильность амплитуд токов и глубин модуляции, необходимую для обеспечения требуемой стабильности угла глиссады. Нестабильность угла глиссады от нестабильности коэффициентов перекрестной модуляции (m_{ki}) записывается в

виде:
$$\Delta\theta_0 = \frac{\Delta(m_1 - m_1) - \Delta(m_{K1} - m_{K2})}{\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (h_H \cdot I_H \cdot \text{ctg}(Z_{H0}) - h_B \cdot I_B \cdot \text{ctg}(Z_{B0})) \cdot (m_2 - m_1)}, \quad (\text{П.8})$$

где I_H, I_B - токи в нижней и верхней антеннах,
 m_1, m_2 - коэффициенты модуляции по двум частотам.

В формуле (П.8) принято:

$$\frac{\Delta m_1}{m_1} = \frac{\Delta m_2}{m_2} = \frac{\Delta m}{m}, \quad \frac{\Delta I_H}{I_H} = \frac{\Delta I_B}{I_B} = \frac{\Delta I}{I},$$

$$Z_{B0} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h_B \cdot \theta_0}{\lambda}, \quad Z_{H0} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h_H \cdot \theta_0}{\lambda}.$$

1.2. Двухканальный ГРМ с "Опорным нулем" и компенсацией излучения на малых углах

Для маяков такого типа имеем:

$$P_{ГМ} = P_{ГМ_{OK}} + \frac{(U_{KK})^2}{2 \cdot (U_{OK})^2} \cdot P_{ГМ_{KK}},$$

где индексы OK, KK соответствуют основному каналу и каналу клиренса. Выражение для $P_{ГМ_{OK}}$ вблизи угла θ_0 имеет вид аналогичный формуле (П.2).

Высоты подвеса антенн выбирают из условий:

$$h_B = 3 \cdot h_H, \quad h_C = 2 \cdot h_H, \quad h_H = \frac{\lambda}{4 \cdot \sin(\theta_0 \pm \alpha)}, \quad (\text{П.9})$$

где $+\alpha$ - угол продольного уклона;

$-\alpha$ - угол при продольном подъеме.

При этом, очевидно, угол глиссады:

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{2 \cdot h_C}, \quad (\text{П.10})$$

а крутизна:
$$S_0 = 4 \cdot \pi \cdot m \cdot \frac{E_{mC}}{E_{mH}} \cdot \frac{h_C}{\lambda}. \quad (\text{П.11})$$

2. Курсовые радиомаяки

2.1. Общие положения

Диаграмму направленности одиночной антенны можно аппроксимировать функцией:

$$f(\varphi) = \cos(n\varphi), \quad (\text{П.12})$$

где

$$n=1,2,3\dots$$

φ - угол, отсчитываемый от линии курса.

Диаграмму с острым минимумом получают, используя две разнесенные на расстояние d антенны:

$$f(\varphi) = \cos\left(\frac{\pi \cdot d}{\lambda} \cdot \sin(\varphi) + \frac{\psi}{2}\right), \quad (\text{П.13})$$

где ψ - относительный сдвиг фаз токов, питающих разнесенные антенны.

2.2. КРМ с "Опорным нулем"

Положение линии курса соответствует первому минимуму ДНА (П.13),

$$\text{т.е.} \quad \varphi = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d}\right), \quad (\text{П.14})$$

так как обычно $\psi = \pi$.

Крутизна зоны курса:

$$S_0 = m \cdot \frac{E_{m2}}{E_{m1}} \cdot f_2'(\varphi_0) = m \cdot \frac{E_{m2}}{E_{m1}} \cdot \frac{\Delta f_2(\varphi)}{\Delta \varphi}. \quad (\text{П.15})$$

Искривление линии курса (δ), т.е. угловое отклонение от линии курса за счет интерференции прямой волны и отраженной от объекта, расположенного под углом β от линии курса и имеющего коэффициент отражения $K_{\text{отр}}$, при условии, что фазовый сдвиг между прямым и отраженным колебанием равен ψ , можно выразить в виде:

$$\delta = -K'_{\text{отр}} \cdot \frac{f_2(\beta)}{f_2'(0)} \cdot \cos(\psi), \quad (\text{П.16})$$

где $K'_{\text{отр}} = K_{\text{отр}} f_{\text{о.р.}}(\varphi)$

$f_{\text{о.р.}}(\varphi)$ - диаграмма обратного рассеяния объекта.

Влияние нестабильности перекрестной модуляции $\Delta(m_{k1}-m_{k2})$ и нестабильности глубин модуляции $\Delta(m_1-m_2)$ на отклонение линии курса ($\Delta\varphi$) можно описать выражением:

$$\Delta\theta_0 = (K_I)^{-1} \cdot \Phi^{-1} \cdot \frac{\Delta(m_1-m_1) - \Delta(m_{k2}-m_{k1})}{m_2-m_1}, \quad (\text{П.17})$$

где $K_I = I_{\text{БМ}}/I_{\text{АМ}}$ - отношение токов балансно-модулированных (БМ) и амплитудно-модулированных (АМ) колебаний;

$$\Phi = \frac{2 \cdot \sum_{m=1}^n k_m \cdot d_m \cdot \frac{2\pi}{\lambda}}{1 + 2 \cdot \sum_{i=1}^p k_i \cdot d_i \cdot \frac{2\pi}{\lambda}} \quad \text{- коэффициент, определяемый ДН КРМ типа "линейный ряд";}$$

где n, p - число излучателей питаемых БМ и АМ сигналами;

$d_{i,m}$ - расстояние между излучателями.

Пример использования среды программирования Mathcad в курсовом проекте

Расчёт флуктуационной погрешности АРК

Параметры:

- Δf - эффективная полоса приёмника;
- ΔF - эффективная полоса эквивалентной следящей системы АРК (в системе с астатизмом 1-го порядка $\Delta F = K_{АРК} / 4$);
- $K_{АРК}$ - добротность АРК (коэффициент усиления разомкнутой эквивалентной следящей системы);
- q - отношение сигнал/шум на входе детектора;
- m - глубина модуляции сигналом звукового генератора АРК при положении рамки в максимуме ДНА;
- σ_{θ} - средняя квадратическая (флуктуационная) погрешность измерения угла.

Расчётные формулы для флуктуационной погрешности:

1. Случай сильного сигнала -

$$\sigma_{\theta 1}(q, \Delta f, \Delta F, m) := \frac{\sqrt{2} \cdot (1 + m)}{q \cdot m} \cdot \frac{\sqrt{\Delta F}}{\sqrt{\Delta f}} \quad \text{рад} \quad .$$

2. Случай слабого сигнала -

$$\sigma_{\theta 2}(q, \Delta f, \Delta F, m) := \frac{(1 + m)^2}{q^2 \cdot m} \cdot \frac{\sqrt{\Delta F}}{\sqrt{\Delta f}} \quad \text{рад} \quad .$$

С вероятностью $P = 0,95$ погрешность не превосходит значения $2\sigma_{\theta}$.

Примечание. Приёмник, рассматриваемый при определении приведённого к входу шума, имеет УПЧ с прямоугольной АЧХ и детектор с квадратичной характеристикой.

Пример расчёта

Дано:

$$\Delta f := 2700 \quad \text{Гц};$$

$$K_{АРК} := 8 \quad \text{1/сек}$$

$$\Delta F := \frac{K_{АРК}}{4}$$

$$\Delta F = 2 \quad \text{Гц};$$

$$q := 2 \quad (\text{случай слабого сигнала});$$

$$m := 0.3$$

Результат расчёта:

$$\sigma_{\theta 2}(q, \Delta f, \Delta F, m) = 0.038 \quad \text{рад} ,$$

или

$$\sigma_{\theta 2}(q, \Delta f, \Delta F, m) \cdot 57.3 = 2.196 \quad \text{град} .$$

Если

$$q := 15 \quad (\text{случай сильного сигнала}),$$

то

$$\sigma_{\theta 1}(q, \Delta f, \Delta F, m) \cdot 57.3 = 0.637 \quad \text{град} .$$

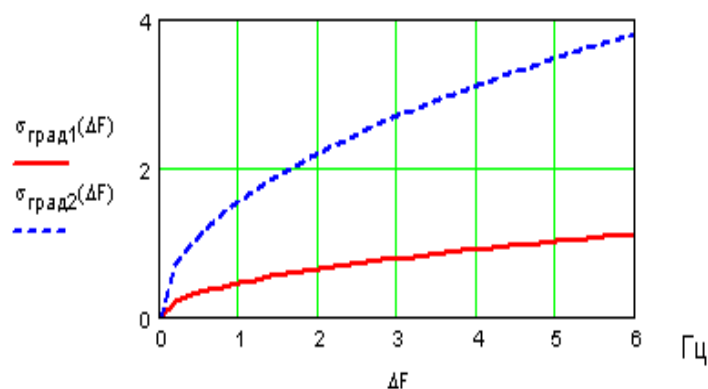
Построение графиков

$$\Delta F := 0, 0.2 \dots 6 \quad \text{Гц}; \quad \Delta f := 2700 \quad \text{Гц}; \quad m := 0.3 ;$$

$$q_1 := 15 \quad (\text{случай сильного сигнала}); \quad q_2 := 2 \quad (\text{случай слабого сигнала});$$

$$\sigma_{\text{град}1}(\Delta F) := 57.3 \cdot \sigma_{\theta 1}(q_1, \Delta f, \Delta F, m) \quad \sigma_{\text{град}2}(\Delta F) := 57.3 \cdot \sigma_{\theta 2}(q_2, \Delta f, \Delta F, m)$$

Зависимость σ_{ξ}
от эффективной
полосы АРК



Расчет фазированных антенных решеток (ФАР) МСП

Обосновав использование в качестве антенны линейную фазированную антенную решетку (ФАР), определяют основные ее параметры [12,21].

Так, длина фазированной линейной антенной решетки (ФАР) (L) будет равна:

$$L = \frac{\lambda}{\theta_{0.5} \cdot \cos(\theta_{\max})}, \quad (\text{П.18})$$

где θ_{\max} - максимальный угол отклонения лепестка ДНА от нормали к плоскости ФАР.

Шаг линейной решетки (расстояние между излучающими элементами) выбирается из условия заданного сектора сканирования:

$$d \leq \frac{\lambda}{1 + \sin(\theta_{\max})}. \quad (\text{П.19})$$

Расчет ДНА ФАР целесообразно провести на ЭВМ, используя формулу:

$$f(\theta, \theta_0) = \sum_{n=1}^N X_n \cdot e^{j \cdot k \cdot (n-1) \cdot 0,6 \cdot \lambda \cdot (\sin(\theta) - \sin(\theta_0))} \quad (\text{П.20})$$

где $N = L/d$;

X_n - аппроксимированное амплитудное распределение в раскрыве антенны;

$k = 2\pi/\lambda$ - волновое число;

θ_0 - угол относительно нормали к раскрыву антенны, на котором расположен максимум ДНА;

θ - текущая координата.

Формула (П.20) справедлива в случае симметричного питания ФАР, начиная с середины.

Для удобства расчета формулу (П.20) преобразуем к виду:

$$f(\theta, \theta_0) = \sqrt{\left[\sum_{n=1}^N X_n \cdot \cos(1.2 \cdot \pi \cdot (n-1) \cdot (\sin(\theta) - \sin(\theta_0))) \right]^2 + \left[\sum_{n=1}^N X_n \cdot \sin(1.2 \cdot \pi \cdot (n-1) \cdot (\sin(\theta) - \sin(\theta_0))) \right]^2} \quad (\text{П.21})$$

Расчет и построение диаграммы направленности $f(\theta, \theta_0)$ удобно провести с

помощью системы математического моделирования MathCAD PLUS 7.0 PRO [33]. Система позволяет проводить вычисления как элементарных формул, так и сложнейших аналитических и символьных выражений (интегралы, дифференциальные уравнения, преобразования Лапласа, Фурье, различные распределения, работа со случайными величинами, операции с матрицами, пределы, простейшее программирование), построение одно-, двух- и трехмерных графиков в разных системах координат, гистограмм и т.д. На рис. П.2 представлен образец программы, написанной в этой системе – результат расчета ДНА ФАР по формуле (П.21) для 3-х значений θ_0 ($0^0, 20^0, 40^0$).

```

x := (0.31 0.57 0.86 1 1 0.86 0.57 0.31)T      X := | 1 ← 0
                                                    | for i ∈ 0..7
                                                    |   for j ∈ 0..15
                                                    |     | k1 ← xi
                                                    |     | 1 ← 1 + 1
                                                    | k

θmax := [ 0·deg
          20·deg
          40·deg ]      N := 127
                    p1 := 1.2·π
                    i := 0..2
                    p3i := sin(θmaxi)

f(u) := | for θ ∈ 0..360
        |   p2 ← (sin(θ·deg) - p3u)·p1
        |   fθ ← √ [ [ ∑n=1N [ Xn·cos((n-1)·p2) ] ]2 + [ [ ∑n=1N [ Xn·sin((n-1)·p2) ] ] ]2 ]
        | f

f1 := f(0)   f2 := f(1)   f3 := f(2)   θ := 0..360

```

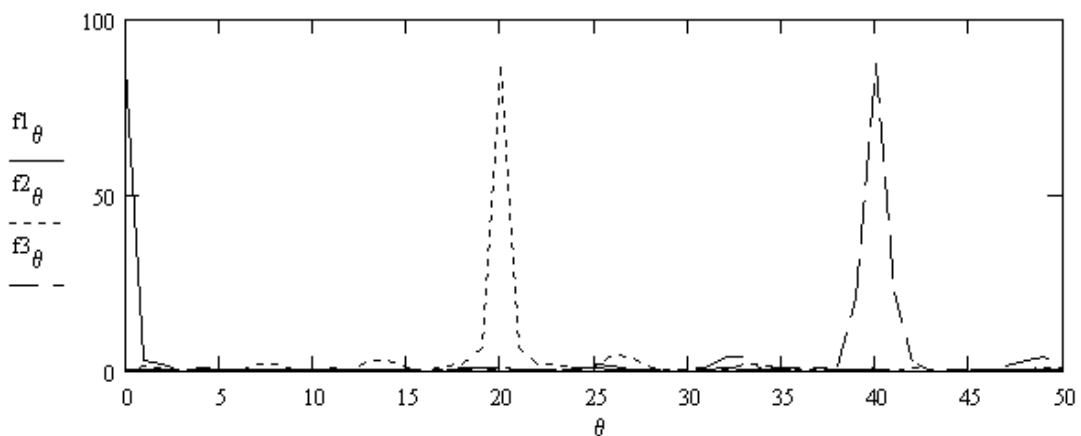


Рис. П. 2 ДНА ФАР

Литература

1. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС (глобальная спутниковая радионавигационная система). - М.: ИПРЖА, 2010. – Ч. 1,2,3,4.
2. Баженов А.В. и др. Радионавигационные системы: учебное пособие. - Ставрополь: САУ, 2007.
3. Бакулев П.А., Сосновский А.А. Радионавигационные системы. - М: Радиотехника, 2005.
4. Авиационная электросвязь. Международные стандарты и рекомендации. Приложение 10 к конвенции о международной гражданской авиации. Т.1, ч.1 ИКАО, 1972.
5. Сосновский С.А., Хаймович И.А. Авиационная радионавигация: справочник. - М.: Транспорт, 1980.
6. Монаков А.А Теоретические основы радионавигации: учебное пособие, СПб ГУАП. - СПб, 2002.
7. Беляевский Л.С., Новиков В.С., Олянюк П.В. Основы радионавигации. – М.: Транспорт, 1992.
8. Саидов А.С. и др. Проектирование фазовых автоматических радиопеленгаторов. – М.: Радио и связь, 1997.
9. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. - М.: Радио и связь, 1991.
10. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. - М.: Высшая школа, 1967.
11. Войнич Б.А. Дальность действия радиотехнических систем. - М.: МАИ, 1988.
12. Нечаев Е.Е., Будыкин Ю.А. Антенные устройства в гражданской авиации. - Курск: КИИА «Пресс-факт», 2005.
13. Ильницкий Л.П., Болтов А.А. Антенные устройства аэропортов ГА. - М.: Транспорт, 1983.
14. Екимов В.В. Проектирование радиоприемных устройств. - М.: Связь, 1968.
15. Проектирование радиоэлектронных устройств на интегральных микросхемах /под ред. С.Я. Шаца. - М.: Сов. радио, 1976.
16. Бабаев В.Г. Комплексные показатели надежности и резервирования авиационного РЭО: учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 1997.
17. Макаров К.В., Червецов В.В. и др. Радионавигационные системы аэропортов. - М.: Транспорт, 1978.
18. Сосновский А.А., Хаймович И.А. Радиотехнические средства ближней навигации и посадки летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1975.
19. Пахолков Г.А., Кашинов В.В., Соломник М.Е. и др. Угломерные радиотехнические системы посадки. - М.: Транспорт, 1982.
20. Сосновский А.А., Хаймович И.А., Шолупов Е.И. Радиомаячные

системы посадки самолетов. - М.: Машиностроение, 1974.

21. Сантиметровые системы посадки самолетов. - М.: Машиностроение, 1985.

22. Кожухарь Е.А., Сосновский А.А., Хаймович И.А. Основы эксплуатации радиомаячных систем посадки самолетов. - М.: Транспорт, 1982.

23. Логачев В.П. Фазовые радиопеленгаторы гражданской авиации. – М.: МГТУ ГА, 1991.

24. Радионавигационные системы летательных аппаратов: учебник для вузов /под ред. П.С. Давыдова. – М.: Транспорт, 1990.

25. Алешечкин А.М. и др. Радионавигационные системы: учебное пособие в 2-х частях. - Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003.

26. Астафьев Г.П., Шебшаевич В.С. Радиотехнические средства навигации летательных аппаратов. - М.: Сов. радио, 1962.

27. Дудко Б. П. Радионавигация: учебное пособие. - Томск: ТУСУР, 2003.

28. Алешин Б.С. Ориентация и навигация подвижных объектов. Библиотека технической литературы (umir.narod.ru), 2006. - Ч. 1,2.

29. Скрыпник О.Н., Горбачев О.А. Радионавигационные системы: учебное пособие. - М.: МГТУ ГА, 2004.

30. Хресин И.Н. Расчет тактико-технических характеристик бортовых радионавигационных систем. Расчет точностных характеристик. – М.: МИИГА, 1991. – Ч. 1.

31. Криницин В.В., Хресин И.Н. Математические модели и методы в расчетах на ЭВМ. – М.: МИИГА, 1992. – Ч. 1.

32. Математическое моделирование и оптимизация авиационных радиоустройств на ЭВМ: учебное пособие. – М.: МИИГА, 1991.

33. Лукьяненко В.И., Хресин И.Н. Применение ЭВМ в курсовом проектировании радионавигационных систем летательных аппаратов. - М.: МИИГА, 1981.

34. Дьяконов В.П. Справочник по MathCAD PLUS 7.0 PRO. – М.: «СК-пресс», 1998.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
1. Структура пояснительной записки курсового проекта.....	4
2. Методические указания к выполнению основных разделов проекта.....	5
3. Указания по оформлению.....	15
4. Защита курсового проекта.....	16
Приложение 1.....	17
Приложение 2.....	18
Приложение 3.....	25
Приложение 4.....	29
Приложение 5 Расчет фазированных антенных решеток (ФАР) МСП.....	31
Литература.....	33