УДК 621.396.62 (045)

[1]**В. И. Кондрашов,** д-р техн. наук,
[1]**В. Ю. Форостян,**
[2]**А. А. Осипчук**

ВЛИЯНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ И ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ПОМЕХ НА ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВИАЦИОННОЙ НАВИГАЦИОННО-ПОСАДОЧНОЙ РАДИОАППАРАТУРЫ

[1]Казенное предприятие «Радиоизмеритель»
[2]Институт электроники и систем управления НАУ, e-mail: alina-osipchuk@mail.ru

Приведены методики и результаты исследований высокочастотных трактов бортового навигационно-посадочной аппаратуры метрового диапазона частот. Даны рекомендации по их построению на основе международных рекомендаций «ARINC» и Норм летной годности самолетов НЛГС-3.

Ключевые слова: бортовая радиоаппаратура, помехи, сигнал, чувствительность.

Введение. В настоящее время в эксплуатации, в том числе на международных авиалиниях, находится большое количество самолетов, оснащенных бортовой навигационно-посадочной аппаратурой (НПА) III поколения [1].

Для обеспечения эксплуатации такой аппаратуры и радиооборудования IV поколения аналогичного назначения [2] в условиях повышающихся требований международных документов «*ARINC*», Норм летной годности самолетов НЛГС-3 к помехозащищенности (ПМЗ) и электромагнитной совместимости (ЭМС) бортовых радионавигационных и посадочных средств при их использовании в современных воздушных и аэродромных пространствах необходимо:

– исследование характеристик эксплуатируемой аппаратуры III поколения, соответствующим современным требованиям ПМЗ и ЭМС, модернизации и обеспечению применения в усложненной помеховой обстановке;

– разработка принципов построения оборудования IV поколения с соответствующими характеристиками по ПМЗ и ЭМС.

Методика и результаты исследования характеристик НПА. Помехи, воздействующие на аппаратуру с указанным уровнем и диапазоном частот систематизированы в статьях [3; 4]. В настоящей работе показывается влияние на характеристики аппаратуры помех трех типов: немодулированной помехи (НМП), интермодулированной помехи (ИМП) и помехи перекрестной модуляции (ППМ) [3], которые описываются следующими аналитическими выражениями:

$\Pi_1(t)$ – немодулированная помеха:

$$\Pi_1(t) = A_1\cos\omega_1 t; \quad A_1 = \begin{cases} U_1, & |\omega_1 - \omega_0| \le \Delta\omega_1; \\ 0, & |\omega_1 - \omega_0| > \Delta\omega_1, \end{cases}$$

$\Pi_2(t)$ – помеха перекрестной модуляции:

$$\Pi_2(t) = A_2[1+M\cos(\Omega_0 t + \psi)]\cos\omega_2 t; \; A_2 = \begin{cases} U_2, & |\omega_1 - \omega_0| \le \Delta\omega_2; \\ 0, & |\omega_1 - \omega_0| > \Delta\omega_2, \end{cases}$$

$\Pi_3(t)$ – интермодулированная помеха:

$$\Pi_3(t) = A_3\cos\omega_3 t + A_4\cos\omega_4 t; \quad n\omega_3 \pm m\omega_4 \approx \omega_0; \quad n, m = 1, 2; A_3 >> A_0; A_4 >> A_0,$$

$S(t)$ – полезный сигнал:

$$S(\mathrm{t}) = A_0[1+M_0\cos(\Omega_0 t + \psi)]\cos\omega_0 t.$$

Измерения проводились на испытательном стенде, блок-схема которого представлена на рис. 1. В состав блок-схемы измерительного стенда для испытаний НПА на устойчивость

к радиопомехам входит: 1 – лабораторный иммитатор маяков ЛИМ-70; 2, 3 – генератор ВЧ сигналов Г4-151, 4 – ВЧ-тройник, 5 – пульт управления, 6 – источник постоянного напряжения Б5-13, 7 – селектор режимов, 8 – выпрямитель В-504, 9 – курсовой приемник, 10 – синтезатор частот курсовой, 11 – синтезатор частот глиссадный, 12 – глиссадный приемник, 13 – блок НЧ курсовой, 14 – блок посадки, УНП – устройство навигационно-посадочное.

Методика проведения исследования ПМЗ и ЭМС аппаратуры приведена на рис. 2, на котором: 1 – синтезатор частот курсовой; 2 – синтезатор частот глиссадный; 3 – курсовой приемник; 4 – глиссадный приемник; 5 – блок НЧ курсовой; 6 – блок посадки.

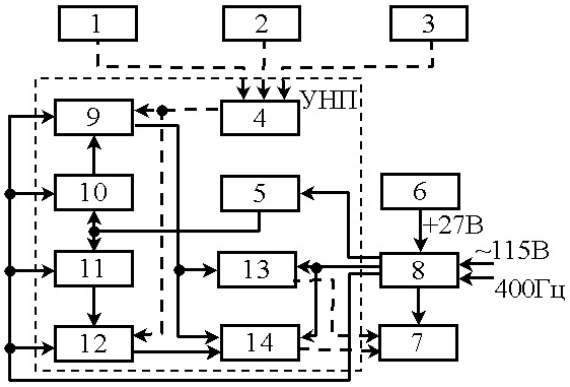

Рис. 1

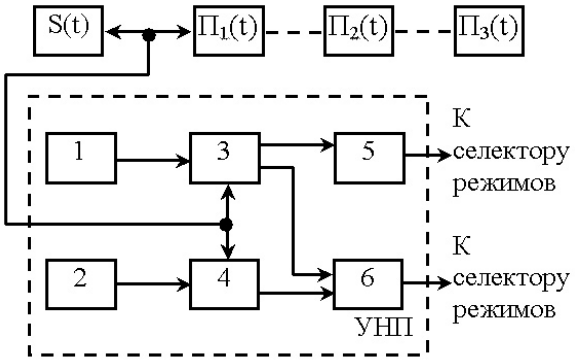

Рис. 2

На антенный вход устройства навигационного посадочного (УНП) совместно с полезным непрерывным амплитудно-модулированным сигналом от лабораторного иммитатора маяков ЛИМ-70 поочередно подавались помехи трех указанных типов: НМП, ИМП, ППМ. В соответствии с выбранной частотой и режимом работы маяка, устанавливаемых на ЛИМ-70, осуществляется выбор рабочей частоты от пульта управления (ПУ) и режима УНП от селектора режимов. На выходном разъеме УНП проводились замеры номинальных сигналов отклонения курсового и глиссадного приемников в соответствии с ГОСТ 22563 -77 и ГОСТ 22533–77. В качестве контрольного прибора использовался осциллограф С1-67. Работоспособность УНП определялась по наличию световой индикации готовности «Курс», «Глиссада» на передней панели селектора режимов. Измерялась чувствительность УНП в режимах навигации и посадки, т. е. чувствительность курсового и глиссадного приемников, по наличию индикации готовности при воздействии НМП, ИМП, ППМ заданного диапазона и уровня.

Исследование УНП изделия III поколения «Курс МП-70» в целом, как и проверка характеристик его ВЧ тракта [3], показало несоответствие (ПМЗ) аппаратуры требованиям, предъявляемым к оборудованию IV поколения.

Так, относительная чувствительность на каналах побочного приема для курсового приемника составила около 60 дБ при расстройке ± 40 кГц и 40 дБ для глиссадного приемника при расстройке свыше ± 150 кГц. Немодулированная помеха уровня 500 мВ в диапазоне 118 – 136 МГц приводила к снижению чувствительности УНП на 35 дБ. Интермодуляционные помехи, вызывающие вторую гармонику, а также вторую субгармонику рабочей частоты, снижали чувствительность УНП примерно на 10 дБ. То есть для успешной эксплуатации аппаратуры III поколения в современных помеховых обстоятельствах необходима модернизация ее высокочастотных (ВЧ) трактов, например, в соответствии с принципами, изложенными в статье [3].

Навигационно-посадочная аппаратура IV поколения [2], кроме требований на устойчивость к радиопомехам [3; 4] ЭМС и ПМЗ, должна удовлетворять жестким нормам соответствия электрических характеристик в условиях воздействия мощной индустриальной помехи. Согласно нормам ГКР415-78, НЛГС-3 и международным стандартам «*ARINC*», «*DO*-160» предъявляются следующие требования к НПА на устойчивость к индустриальной помехе:

– не должна нарушаться работоспособность аппаратуры при воздействии на нее магнитного поля звуковой частоты, создаваемого током 20 А частотой 400 Гц в прямом проволочном излучателе, расположенном на расстоянии 0,15 м от аппаратуры;

– аппаратура должна соответствовать требованиям при воздействии на соединительные (межблочные) провода магнитного поля звуковой частоты, создаваемого током 30 А в проводнике длиной 1 м при частоте 400 Гц и линейно снижаемого до 0,8 А при увеличении частоты до 15 кГц;

– аппаратура должна соответствовать требованиям при введении в «контрольный» провод межблочных жгутов напряжения 0,5 В с 80 %-й модуляцией частотой 1000 Гц в диапазоне частот 0,15 – 300 МГц, исключая рабочий диапазон частот.

С целью выяснения степени влияния помех магнитного поля звуковой частоты на НПА IV поколения и возможного заимствования технических решений проведено лабораторное исследование ПМЗ ВЧ усилительных трактов аппаратуры III поколения «Курс МП-70». Соответственно методику проведения исследования ПМЗ ВЧ трактов НПА от мощного магнитного поля звуковой частоты и методику проверки работоспособности аппаратуры при введении напряжения в «контрольный» провод межблочных жгутов иллюстрируют рис. 3 и 4. Структура сигналов и радиотехнических средств при проведении измерений в условиях воздействия магнитного поля звуковой частоты показана на рис. 3, где 1 – лабораторный иммитатор маяков ЛИМ-70; 2 – линейка питания; 3 – источник постоянного напряжения Б5-13; 4 – синтезатор частот курсовой; 5 – приемник курсовой; 6 – пульт управления; 7 – синтезатор частот глиссадный; 8 – приемник глиссадный; 9 – лабораторный автотрансформатор АРМ-8; 10 – трансформатор; 11 – проволочный излучатель l = 1м; 12 – амперметр Д-552. На вход исследуемых приемников подавались непрерывные гармонические амплитудно-модулированные стандартные сигналы от ЛИМ-70. Магнитное поле звуковой частоты создавалось током 20 А частотой 400 Гц в проволочном излучателе длиной l = 1м с помощью трансформатора. Значение тока контролировалась амперметром Д552. На рис. 4 приведена структурная схема для проведении измерений с введением напряжения в «контрольный» провод межблочных жгутов, где 1 – лабораторный иммитатор маяков ЛИМ-70; 2 –линейка питания; 3 – источник постоянного напряжения Б5-13; 4 – синтезатор частот курсовой; 5 – приемник курсовой; 6 – пульт управления; 7 – синтезатор частот глиссадный; 8 – приемник глиссадный; 9 – генератор ВЧ сигналов Г4-15. При проверке работоспособности НПА с «контрольным» проводом в межблочных жгутах напряжение 0,5 В в диапазоне частот 1 – 300 МГц, исключая рабочий диапазон частот, с амплитудной модуляцией 80 % частотой 1000 Гц, подавалось от генератора Г4-151, стандартный сигнал на вход УНП – от ЛИМ-70. Контроль за формой сигнала с выхода детектора производится по осциллографу С1-55.

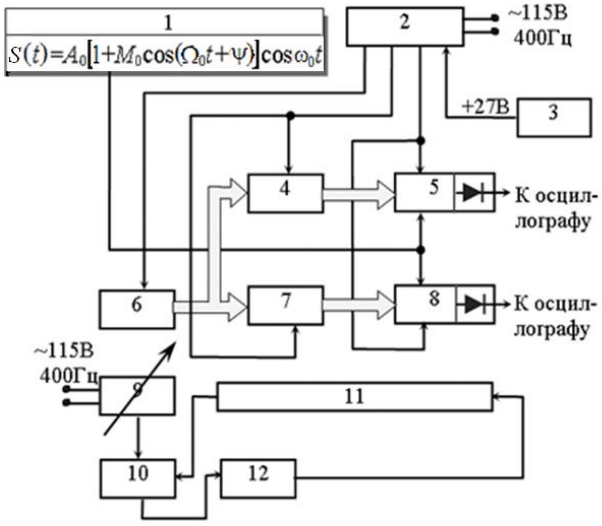

Рис. 3

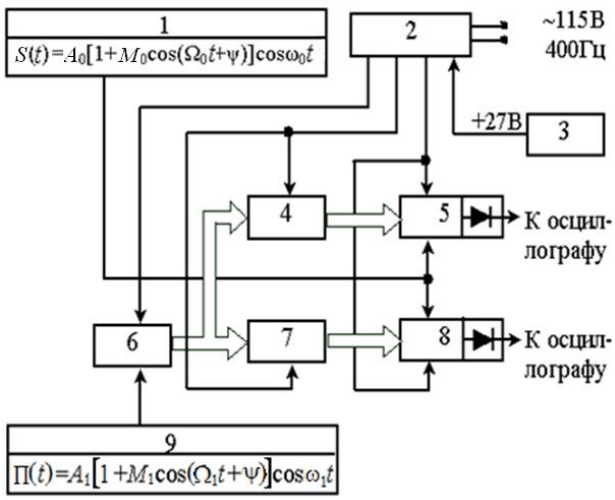

Рис. 4

Проверка аппаратуры «Курс МП-70» на воздействие индустриальной помехи показала выполнение требований помехозащищенности. Полезный сигнал, снимаемый с выхода детектора, не искажался. Повышение напряженности электромагнитного поля за счет увеличения тока в проволочном излучателе до 50 А, а также расширение частотного диапазона помехи в «контрольном» проводе до 500 МГц, не приводило к изменению формы сигнала на выходе детекторов приемников.

Следовательно, технические решения, используемые в аппаратуре III поколения с целью ее защиты от индустриальных помех, применимы и для оборудования IV поколения.

Основные направления повышения ПМЗ и ЭМС НПА. При выборе основных направлений повышения ПМЗ и ЭМС НПА IV поколения принимались во внимание следующие факторы: состав РТС на объектах-носителях аппаратуры IV поколения, помеховая обстановка, заданная требованиями на аппаратуру; характеристики сигналов наземных маяков (уровень, вид излучения, полоса частот, стабильность и др.), характеристики ПМЗ элементной базы аппаратуры.

С учетом непрерывного характера сигнала, принимаемого бортовой НПА, основные рекомендации в обеспечение ПМЗ аппаратуры направлены на повышение защищенности ВЧ тракта аппаратуры путем использования входных фильтров и фильтров сосредоточенной селекции с повышенной избирательностью, в частности, фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ), а также за счет расширения динамического диапазона усилительных элементов тракта и применение соответствующих схемных решений.

Вопросам сравнительного анализа характеристик преселектора аппаратуры III поколения и предлагаемых для аппаратуры IV поколения преселекторов на ПАВ посвящена статья [3]. Преимущества фильтров на ПАВ бесспорны [6], однако использование входных цепей с фильтрами на ПАВ в рабочем диапазоне НПА является сложной инженерно-технической задачей, поскольку в этом случае вносимые потери составляют 10 – 20 дБ, что существенно снижает чувствительность аппаратуры.

В решении проблемы расширения динамического диапазона приемников, и следовательно в вопросах обеспечения защищенности от мультипликативной помехи, важное место занимает ПМЗ активных антенн, поскольку антенна является первым звеном ВЧ тракта. Наиболее приемлемым путем улучшения характеристик аппаратуры представляется использование элементной базы с расширенным динамическим диапазоном (полевые транзисторы, биполярные транзисторы большой мощности и т. п.). Известно, что в резонансных антеннах-усилителях в тех случаях, когда согласование собственно антенны с усилительным прибором близко к согласованию по мощности, то при оптимальном режиме питания полевые транзисторы обеспечивают выигрыш по нелинейным искажениям относительно биполярных. В нерезонансных антеннах-усилителях полевые транзисторы должны обеспечивать значительно лучшую линейность по сравнению с биполярным даже без оптимизации режима питания [5].

Проблема повышения защищенности от мультипликативной помехи путем использования активных элементов ВЧ тракта с расширенным динамическим диапазоном и применение соответствующих схемных решений описана в статье [3].

Исследования аппаратуры III поколения показало выполнение требований по ПМЗ, предъявляемых к аппаратуре IV поколения в части индустриальной помехи, поэтому в НПА IV поколения могут быть приняты те же меры, которые в настоящее время реализованы в НПА III поколения: поблочное экранирование, минимизация длины проводов связи, применение витых пар, использование биполярного сигнала в межсистемном цифровом обмене, применение защитных фильтров по входам (выходам) отдельных блоков.

Использование коммутируемого преселектора на основе полосовых пьезоэлектрических фильтров на ПАВ в НПА IV поколения. Применение фильтров на ПАВ в бортовой НПА позволяет значительно уменьшить габариты и вес аппаратуры, упростить настройку,

существенно повысить избирательность и технологичность в процессе производства [6]. Одним из применений гребенки фильтров на ПАВ является многоканальное устройство разделения частот – мультиплексор. Такое устройство принимает сигналы в широком диапазоне частот и распределяет их по нескольким узкополосным каналам [4].

Для коммутации ПАВ-фильтров могут быть использованы диодные и диодно-транзисторные варианты построения коммутирующих схем.

При исследованиях пять опытных образцов фильтров ПАВ гребенки, спроектированных и изготовленных по специальным требованиям НПА, размещались на одной общей подложке. Каждый фильтр содержал два одинаковых преобразователя. Апертуры преобразователей составляли около 30 длин волн.

В результате измерений характеристик образцов фильтров на ПАВ получены следующие результаты:

1. Форма амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и ширина полосы пропускания близки к расчетным значениям.

2. Вносимое затухание (В, дБ) одиночного фильтра составляет 16 – 22 дБ в зависимости от толщины металлизации.

3. При соединении со схемой коммутации, вносимое затухание канала увеличивается на 6 – 10 дБ.

4. Наблюдается искажения формы АЧХ в полосе пропускания, возрастающие с ростом толщины металлизации, вызванные масс-электрическими отражениями ПАВ от электродов.

5. Подавление ближних боковых лепестков АЧХ составляет 40 – 45 дБ, но имеются ангармоники при расстройке на несколько Δf.

Экспериментальные характеристики одного из каналов показаны на рис. 5 вместе с результатами расчета.

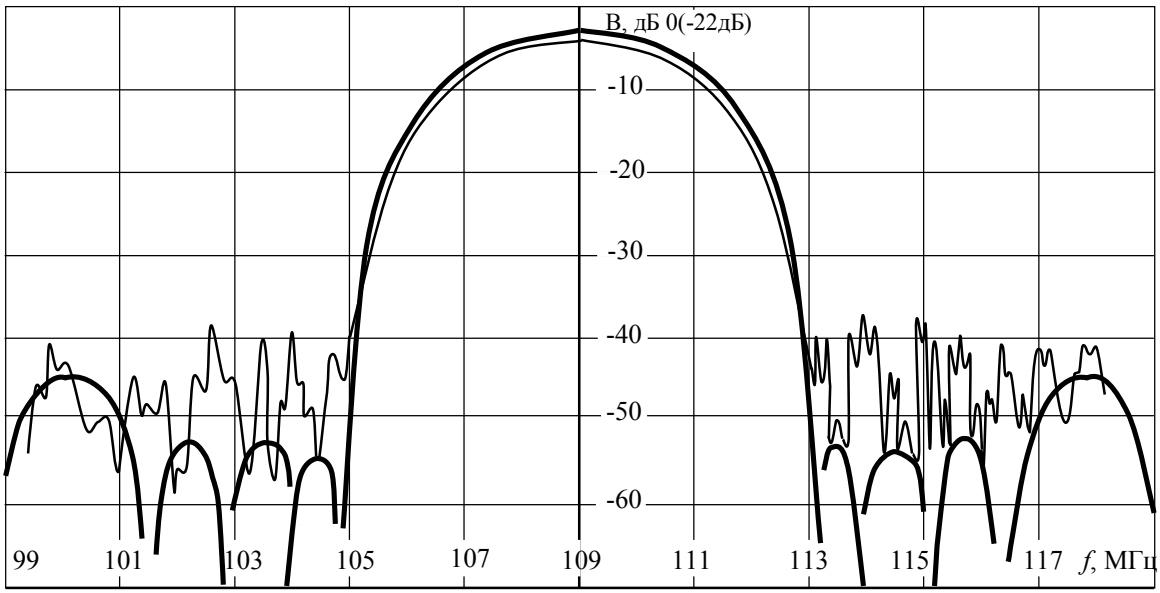

Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики канала мультиплексора, полученные:

—— – экспериментально; ▬ – теоретически

Выводы.

1. Показана принципиальная возможность обеспечения требований по ПМЗ и ЭМС, предъявляемых отечественными и международными стандартами к НПА IV поколения.

2. Рассмотренные технические решения по реализации аппаратуры IV поколения, в основном, удовлетворяют требованиям. При использовании входных цепей на фильтрах ПАВ, с потерями в полосе пропускания 15 дБ, максимальная чувствительность устройства высокой частоты курсового составляет 3 мкВ, при снижении потерь во входном фильтре до

10 дБ чувствительность повышается до 2 мкВ при отношении сигнал/шум на выходе приемника не менее 10 дБ и заданной помеховой обстановке. Для обеспечения защиты от перекрестной и интермодуляционной помехи предпочтителен вариант построения смесителя на полевых транзисторах.

3.Измерение электрических характеристик ВЧ трактов и точностных характеристик аппаратуры, при воздействии радиопомех, заданных помеховой обстановкой в зонах современных аэропортов, выявило недостаточность мер по ПМЗ в эксплуатируемых изделиях III поколения. Даны рекомендации по модернизации ВЧ трактов аппаратуры «Курс МП-70».

4. На основании анализа характеристик полезного сигнала при заданной помеховой обстановке, технических характеристик существующей и перспективной элементной базы, основными мерами обеспечения ПМЗ для НПА III-IV поколения являются: повышение избирательности входных цепей и цепей фильтров сосредоточенной селекции фильтров сосредоточенной селекции ВЧ тракта за счет использования преселекторов на базе фильтров на ПАВ и полосовых кварцевых фильтров на объемной волне с улучшенными характеристиками, а также расширение динамического диапазона усилительного ВЧ тракта за счет использования соответствующих схемных решений и элементной базы в части активных элементов для аппаратуры и антенн-усилителей.

Список литературы

1. *Бортовые* радиоустройства посадки самолетов / [И. А. Хаймович, П. А. Иванов, Ю. Е. Устроев и др.] – М.: Машиностроение, 1980. – 382 с.
2 *Кондрашов В. И.* Бортовые радиотехнические средства ближней навигации и инструментальной посадки летательных аппаратов / В. И. Кондрашов, В. Н. Федоренко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2002. – №1. – С. 3 – 9.
3. *Кондрашов В. И.* Характеристики радиочастотных трактов бортового навигационно-посадочного оборудования / В. И. Кондрашов, В. Ю. Форостян, А. А. Осипчук // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2009. – № 8 – С. 18 – 26.
4. *Кондрашов В. И.* Исследование влияния внешних физических полей на премники бортовой самолетной навигационно-посадочной аппаратуры / В. И. Кондрашов, В. Ю. Форостян // Сб. статей ТНС «Проблемы ЭМС радиоэлектронных средств». – М.: Радио и связь, 1982. – С. 88 – 91.
5. *Цыбаев Б. Г.* Антенны-усилители / Б. Г. Цыбаев, Б. Н. Романов – М.: Сов. радио, 1980. – 240 с.
6. *Фильтры* на поверхностно-акустических волнах / [Под ред. Г. Мэттьюза] – М.: Радио и связь, 1981. – 472 с.

В. І. Кондрашов, В. Ю. Форостян, А. О. Осіпчук

Вплив радіотехнічних та індустріальних завад на точнісні характеристики авіаційної навігаційно-посадкової радіоапаратури

Наведено методики та результати досліджень високочастотних трактів бортової навігаційно-посадкової апаратури метрового діапазону частот. Подано рекомендації щодо їх побудови на основі міжнародних рекомендацій «*ARINC*» та Норм летной годности самолетов НЛГС-3.

V. I. Kondrashov, V. Y. Forostjan, A. A. Osiphuk

Radio and industrial noise effect on accuracy characteristics of aviation navigation-landing radio equipment

In the article the techniques the techniques and researches results of high-frequency channel circuits of onboard aircraft navigation-landing metre-frequency range radio-apparatuses are represented. The recommendations on their construction with requirement of international documents ARINC and aircraft airworthiness standards NLGS-3 are given in the article.