

УДК 621.37:929

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ВЫСОКОНАДЕЖНЫХ КОМПЛЕКСОВ СИСТЕМЫ ЕДИНОГО ВРЕМЕНИ И СИНХРОНИЗАЦИИ ДЛЯ ЦЕНТРА КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

д.т.н. проф. Балясников Б.Н.

Приведен анализ исторических предпосылок создания и траектории развития аппаратных средств системы единого времени. Отмечена роль отечественных предприятий и конкретных исполнителей в достижении высоких требований к качеству синхронизации автономных и разнесенных комплексов и систем различного назначения.

В начале 1974 г. в рамках модернизации системы контроля космического пространства (СККП) Главнокомандующий Войсками ПВО страны Маршал Советского Союза П.Ф.Батицкий внес предложение в Правительство СССР – возложить дальнейшее совершенствование СККП на главного конструктора системы предупреждения о ракетном нападении (СПРН) В.Г.Репина (ЦНПО «Вымпел»), за плечами которого был положительный опыт сопряжения радиолокационных станций дальнего обнаружения «Дунай-3» и «Дунай-3у» системы противоракетной обороны с командными пунктами СПРН [1].

К концу 1974 г. после выхода Постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 21.11.1974 г. № 896-306 главный конструктор В.Г.Репин приступил к созданию первой в мире автоматизированной СККП с Центром контроля космического пространства (ЦККП) в районе г. Ногинска и запасным командным пунктом (ЗКП) в районе г. Коломна.

Этим же постановлением была утверждена кооперация предприятий, которым предписывалось непосредственное участие в создании ЦККП и СККП в целом.

Среди предприятий, привлеченных к кооперации, были:

- Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи, Москва;
- Радиотехнический институт (РТИ), Москва;
- Научно-исследовательский институт радиоприборостроения (НИИРП), Москва;
- Красногорский оптико-механический завод им. С.А. Зверева (КМЗ);
- Центральный научно-исследовательский институт электрорадиосвязи (радиоэлектронных систем) (ЦНИИРЭС), Москва;



Главный конструктор
Репин В.Г.

- Научно-производственное объединение «Астрофизика», Ленинград;
- Институт точной механики и вычислительной техники (ИТМиВТ), Москва;
- Главное производственно-техническое предприятие (ГПТП) «Гранит», Ленинград;
- Ленинградский научно-исследовательский радиотехнический институт (ЛНИРТИ), ныне АО «РИРВ».

ЛНИРТИ был определен головным предприятием по разработке, изготовлению и поставке комплексов единого времени и синхронизации 73А6-1 и 73А6-2 («Айва») для ЦККП и запасного командного пункта (ЗКП), а также поставке технологического комплекта 73А6-1 для КМЗ.



*Балясников
Борис
Николаевич*

*Начальник лаборатории, высококвалифицированный специалист и организатор в радиоаппаратурыстроении.
Является главным и зам. главного конструктора разработках.
Работает на предприятии с 1963 года. За успешное выполнение государственных планов награжден медалью „За трудовую доблесть“. Активно участвует в общественной жизни, неоднократно избирается членом партбюро отделения и института. За победу в социалистическом соревновании в 1974 определяющем году IX пятилетки занесен в книгу Почетная.*

Главным конструктором комплексов 73А6-1 и 73А6-2 был назначен Б.Н. Балясников, первым заместителем главного конструктора – Я.Б. Свердлов, заместителями главного конструктора – М.Т. Лисин, А.Н. Никифоров, В.М. Лейко, Ю.М. Молочников, Э.С. Кирицев.

Необходимо было учитывать особые требования ТТЗ на комплекс и требования к объектам, такие как:

- коэффициент использования изделия КПИ = 1 за 12 лет непрерывной работы;
- вероятность безотказной работы за любой час – 0,99999 в течение 12-летнего периода;
- режимы работы: автономный (АР); готов к боевой работе (ГБР); боевая работа (БР);
- блокировка доступа ко всем органам контроля, управления и монтажу в режиме БР;
- переключение комплектов должно происходить в автоматическом или ручном режиме без искажения выходной информации;
- оба комплекта должны работать на один выходной кабель;
- в случае кратковременного (в течение 15 мин) пропадания двух сетей электропитания через 15 мин комплекс должен быть работоспособен и «привязан» к единому времени страны с заданной погрешностью;
- контроль неисправности в комплексе должен быть до сменного блока;
- в течение 5 мин необходимо найти отказавший блок и заменить его на исправный из ЗИПа;
- отыскание (обнаружение) неисправности в ремонтируемом на объекте блоке должно быть до микросхемы включительно;

- комплекс должен обслуживаться одним оператором и двумя ремонтниками;

- на комплекте, который в данный момент находится в режиме АР и не работает на выход, могут проводиться учеба и тренировки личного состава.

Учитывая такие требования, комплекс решено было разрабатывать в составе двух комплектов, без сложной системы гарантированного электропитания, по передовой на тот период методологии проектирования с применением новой элементной базы – интегральных микросхем (ИМС).

В аппаратуре хранения времени и формирования сетки частот и кодов времени предусматривалось трехкратное на уровне сменных блоков мажоритарное резервирование с трехкратным резервированием самой мажоритарной логики.

Электронное переключение комплектов осуществлялось без искажений и пропадания выходных сигналов.

Блокировка в режиме БР всех органов управления и монтажа комплекса осуществлялась внешним сигналом с ЦККП.

В составе комплекса была предусмотрена ремонтная лаборатория 73Р6, а также ЗИП-А и ЗИП-С.

В состав комплекса впервые был введен малогабаритный, с собственным источником питания автономный хранитель времени с целью исключения системы гарантированного электропитания, существовавшей у ранее разработанных подобных комплексов 5Ш-11 и 5Ш-12, состоявших из автономных электрогенераторов, устройств бесперебойного электропитания всего комплекса в случае кратковременного пропадания сети электропитания объекта.

Системы автономного электропитания комплексов имели довольно низкую надежность и занимали площадь технического этажа, сравнимую с площадью комплексов 5Ш-11 и 5Ш-12.

На каждом блоке и пульте управления комплексом был предусмотрен визуальный контроль: «Исправен», «Неисправен». Также была разработана и защищена авторским свидетельством унифицированная печатная плата, исключающая паразитные наводки по цепям электропитания, в которой печатные проводники «Питание» и «Земля», имеющие значительно большую площадь, перенесены в плоскость, перпендикулярную плате.

Для исключения сбоев шкалы времени введено плавное тиристорное включение и выключение блоков питания во время их замены.

Все принципиальные схемы устройств разработаны с учетом коэффициента деградации ИМС с применением облегченных режимов эксплуатации.

Объединение в единую модель трех видов отказов (структурного, функционального, параметрического) с учетом перечисленных выше инновационных решений позволило существенно повысить надежность комплексов.

В соответствии с требованиями ТТЗ в состав каждого комплекта комплекса входили шесть видов функционально законченной аппаратуры:

- аппаратура «привязки» шкалы времени комплекса к единой шкале времени госэталоны по сигналам передающих радионавигационных и связных станций КВ, ДВ и СДВ диапазонов;

- аппаратура формирования задающей частоты (АФЗЧ), состоящая из трех кварцевых генераторов с суточной нестабильностью $1 \cdot 10^{-9}$;

- аппаратура управления (АУ);

- аппаратура формирования шкалы времени, кодов времени и сигналов синхронизации с аварийным хранителем времени (АФСВ);

- аппаратура контроля и документирования (АКД);

- аппаратура ремонтной лаборатории (АРЛ) 73Р6.

Общая структурная схема комплекса 73А6-1 показана на рисунке 1.

Для обеспечения надежных характеристик комплекса было принято решение об использовании во всей аппаратуре комплекса цифровых устройств с резервируемыми избыточными элементами, так как этот метод является одним из фундаментальных для построения отказоустойчивой аппаратуры.

Независимо от способа реализации (аппаратного или программного резервирования) в его основные задачи входит контроль состояния основной и резервной аппаратуры и управление реконфигурацией аппаратуры в случае обнаружения отказов ее элементов.

Так, еще в начале семидесятых годов прошлого столетия в цифровых схемах для повышения надежности нашло широкое применение структурное резервирование с мажоритарным элементом (МЭ) [2-9]. Обычно в структурах с мажоритарными элементами параллельно работают три одинаковых канала, блоки которых соединяются с мажоритарными элементами, как показано на рисунке 2.

Если выполнять структурное мажоритарное резервирование разбитого на равные части трехканального комплекта одним мажоритарным элементом, как показано на рисунке 2, то мажоритарный элемент будет исправлять последствия сбоев и отказов и формировать выходные сигналы «У» для каждого из последующих блоков по логике «два из трех» поразрядного мажоритарирования

$$Y = (a \& b) \wedge (b \& c) \wedge (a \& c) \wedge (a \& b \& c),$$

где a , b , c – входные сигналы МЭ, являющиеся результатами вычислений в блоках А, В, С комплекта.

Данный вариант структурного резервирования нейтрализует влияние сбоя или отказа в комплексе на результат вычислений, поступающий в систему управления.

Обозначим через p_0 вероятность безотказной работы одного комплекта комплекса, через p_m – вероятность безотказной работы мажоритарного элемента.

Перечислим вероятности допустимых состояний этого комплекта:

- все три канала и МЭ исправны (одно состояние) – $p_0^3 p_m$;

- неисправен один канал, исправны два канала и МЭ (три состояния) –

$$3(1 - p_0)p_0^2 p_m.$$

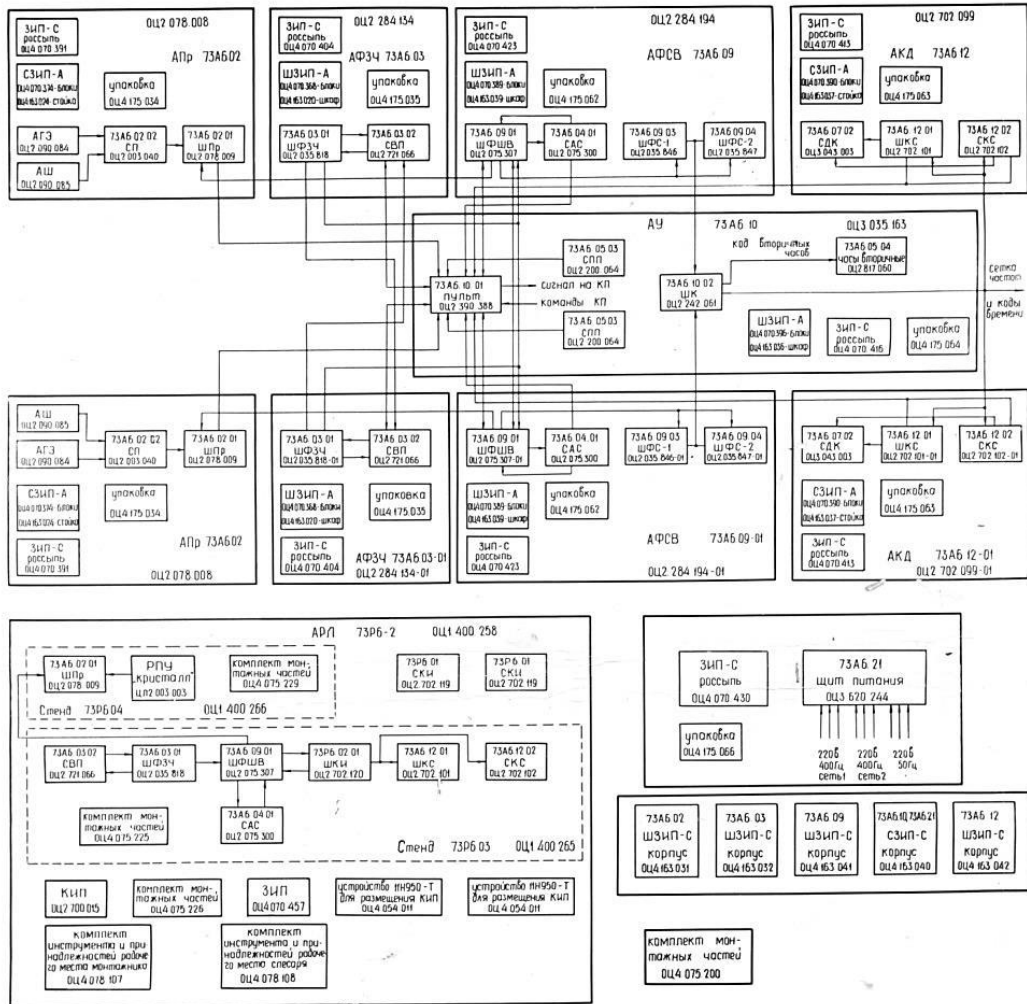


Рисунок 1 – Общая структурная схема комплекса 73А6-1

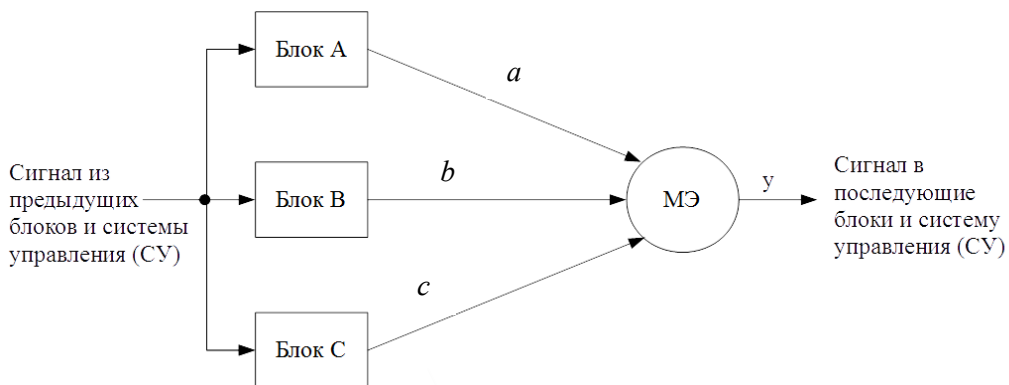


Рисунок 2 – Структурное резервирование с мажоритарным элементом

Тогда вероятность безотказной работы всего комплекта

$$p_{2/3} = [p_0^3 + 3p_0^2(1 - p_0)]p_m = (3p_0^2 - 2p_0^3)p_m. \quad (1)$$

Для идеального мажоритарного элемента ($p_m = 1$) можно записать

$$p_{2/3} = 3p_0^2 - 2p_0^3.$$

Использование утроенного оборудования будет оправдано, если

$$p_{2/3} > p_0 \quad (2)$$

или

$$3p_0 - 2p_0^2 > 1. \quad (3)$$

Поскольку корни уравнения $3p_0 - 2p_0^2 = 1$ будут равны 0,5 или 1, то для выполнения условий (2) и (3) необходимо, чтобы p_0 было больше 0,5. На практике часто используется упрощенная формула для вероятности отказа рассматриваемого троированного комплекса

$$g \cong 3g_0^2 + g_m,$$

которая получена из (1) без учета членов выше второй степени.

Выигрыш в надежности для трехканального комплекса по сравнению с одноканальным определяется коэффициентом

$$\text{Выигрыш}_{2/3} = \frac{p_{2/3}}{p_0} = (3p_0 - 2p_0^2)p_m. \quad (4)$$

Для того чтобы найти значение p_0 , при котором $\text{Выигрыш}_{2/3}$ достигает максимума, нужно решить уравнение

$$\frac{d\text{Выигрыш}_{2/3}}{dp_0} = 0. \quad (5)$$

Подставляем (4) в (5):

$$(3 - 4p_0)p_m = 0,$$

откуда $p_0 = 0,75$. При $p_0 = 0,75$

$$\text{Выигрыш}_{2/3\text{max}} = 1,125p_m. \quad (6)$$

Минимальное значение надежности МЭ определяется из условия $\text{Выигрыш}_{2/3} = 1$ при учете (6): $p_m = \frac{1}{1,125} \cong 0,89$.

Таким образом, для структуры, изображенной на рисунке 2, выигрыш в надежности ($\text{Выигрыш}_{2/3} > 1$), возможен только при одновременном выполнении условий:

$$p_0 > 0,5; p_m > 0,89; p_m > p_0.$$

Как видно, основным недостатком рассматриваемого вида резервирования являются высокие требования к надежности МЭ, поскольку его отказ приводит к потере работоспособности комплекта.

Поэтому для повышения надежности всего комплекса 73А6-1 и 73А6-2, соответственно, были использованы схемы структурного резервирования с МЭ, т.е. резервирование самого МЭ. Пример такой схемы приведен на рисунке 3.

Здесь аппаратуру (каналы АФЗЧ и АФСВ) необходимо разбить на n уровней мажоритарирования. В состав каждого i -го уровня входят три однотипных блока A_i, B_i, C_i , принадлежащих каналам A, B и C соответственно. Обозначим вероятность безотказной работы блока с мажоритарными элементами через p . Информация с выходов блоков i -го уровня мажоритарирования в каждом канале поступает на МЭ своего и двух соседних каналов. С выходного МЭ комплекта управляющий сигнал подается в следующий блок и систему управления.

Надежность комплекта определим в два этапа.

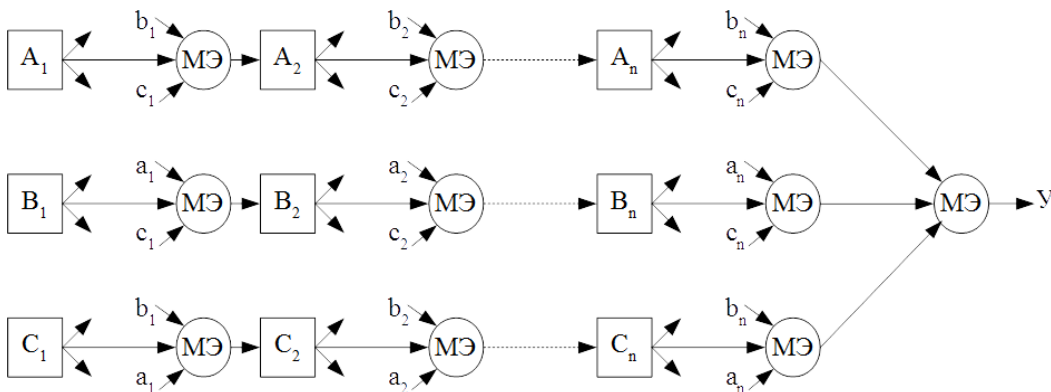


Рисунок 3 – Структура с троированным МЭ

Вначале определим вероятность безотказной работы одного мажоритарного уровня $p_{\text{уровня}}$, затем представим через нее вероятность безотказной работы всего комплекта.

Вероятность безотказной работы уровня складывается из следующих состояний его элементов, при которых уровень сохраняет свою работоспособность:

- все три блока каналов A, B, C и три МЭ исправны (одно состояние) – $p^3 p_m^3$;
- все три блока каналов A, B, C исправны, а неисправен один любой МЭ (три состояния) – $3p^3 p_m^2 (1 - p_m)$;
- все три МЭ исправны, а неисправен один (любой) блок каналов A, B, C (три состояния) – $3p^2 (1 - p) p_m^3$;
- неисправен любой блок каналов A, B, C и мажоритарный элемент в том же канале (три состояния) – $3p^2 (1 - p) p_m^2 (1 - p_m)$;
- неисправен любой блок и любой мажоритарный элемент (шесть состояний) – $6p^2 (1 - p) p_m^2 (1 - p_m)$.

Следовательно, мажоритарный уровень считается работоспособным при безотказном функционировании одного канала и отказе одного блока и МЭ в разноименных каналах.

Вероятность безотказной работы уровня

$$p_{\text{уровня}} = (3p^2 - 2p^3)(3p_m^2 - 2p_m^3).$$

При идеальных МЭ ($p_m = 1$) $p_{\text{уровня}} = p^2/3$.

При учете надежности реальных МЭ коэффициент выигрыша определяется из выражения

$$\text{Выигрыш}_{\text{уровня}} = \frac{p_{\text{уровня}}}{p} = (3p - 2p^2)(3p_m^2 - 2p_m^3).$$

Применяя уже апробированную методику, получим: максимальное значение выигрыша для уровня обеспечивается при $p = 0,75$, а минимально допустимое значение для p_m (при котором $\text{Выигрыш}_{\text{уровня}} = 1$) составляет 0,8.

Таким образом, приходим к следующим выводам:

- троирование МЭ снижает требования к его надежности (для одного МЭ $(p_m)_{\min} = 0,89$, для трех МЭ $(p_m)_{\min} = 0,8$);

- если $p_m < 1$, то при одном и том же его значении выигрыш в надежности для структуры с тремя МЭ выше.

Основным достоинством рассмотренного метода структурного резервирования являются:

- исправление ошибок без перерыва, что особенно важно для изделий, работающих в реальном масштабе времени;

- автоматическое исправление ошибок, причинами которых являются как отказы, так и сбои, благодаря чему не нужны специальные средства их различия.

При использовании данного метода нет необходимости в разработке специальных программ для обнаружения, локализации и исправления ошибок, однако увеличивается сложность оборудования.

Конструктивно и функционально весь комплекс построен по агрегатно-модульному принципу, позволяющему легко осуществлять его изготовление, настройку, сдачу заказчику, эксплуатацию и модернизацию.

В процессе создания комплекса были сформулированы стратегии и методы оптимизации структуры параметров и технического обслуживания изделий такого класса на основе многокритериального выбора альтернативных решений.

Были установлены зависимости показателей надежности от избыточности структурных элементов, способов их соединения и от влияния человеческого фактора.

На начальном этапе создания комплексов основные технические решения были направлены на реализацию рекомендаций человеко-машинного подхода. Переход от традиционного подхода к проектированию комплексов как чисто технических систем к методологии, лежащей в основе проектирования человеко-

машинных систем, позволил грамотно включить в процесс функционирования деятельность человека-оператора – одного из основных факторов, определяющих надежность комплексов [10].

Для обеспечения требуемых значений коэффициента готовности изделий необходимо было также минимизировать продолжительность процесса восстановления работоспособности комплексов на объектах. С этой целью в составе комплексов предусмотрена ремонтная лаборатория 73Р6 с комплектом ремонтной документации на комплексы.

Стенды и оборудование ремонтной лаборатории позволили оперативно обнаруживать неисправные устройства и элементы, специальный тестер мог находить отказавшую микросхему на плате.

Необходимо отметить, что в процессе создания комплексов коллективом разработчиков получено 33 авторских свидетельства на изобретения, например [11-14], 19 из которых внедрены в разработку.

Так, например, недостатком известной в то время двухслойной конструкции печатной платы с микросхемами с планарными выводами корпусов являлась малая распределенная емкость между шинами «питание» и «земля» и невысокая плотность монтажа за счет того, что сигнальные проводники и шины питания располагались в одной плоскости. Целью изобретения являлось увеличение распределенной фильтрующей емкости между шинами «питание» и «земля» при повышении плотности монтажа, механической жесткости платы и улучшении теплообмена и площади шин «питание» и «земля». Это достигалось тем, что в предложенной печатной схеме (основная печатная плата комплекса с ИМС 133 серии) с контактными металлизированными отверстиями, соединенными с выводами (контактными площадками «питание» и «земля» ИМС), упомянутые шины выполнены из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита толщиной 0,5 мм, шириной 10 мм, с выступами, равными 3 мм, и размещены перпендикулярно к поверхности печатной платы с присоединением выступов к контактному отверстию.

На рисунке 4 изображен общий вид печатной платы в двух проекциях. На плате (1) расположены микросхемы (2), шины «питание» и «земля» выполнены из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита (5) с поочередной (через один) изоляцией (травлением металла выступов (3, 4) с одной и другой стороны). Выступы шин соединены с контактными отверстиями (6) платы.

Комплекс 73А6-1 (рисунок 5) был поставлен на объект в 1983 г., а в 1984 г. - комплекс 73А6-2, отличающийся от предыдущего параметрами выходных сигналов и режимами управления. В 1985 г. на объекты поставлены ремонтные лаборатории комплексов.

Хочется с благодарностью отметить работу по созданию комплексов ведущих инженеров, руководителей групп и старших инженеров отдела, за плечами которых были разработка, изготовление, испытания на объектах и сдача заказчику космической аппаратуры синхронизации «Рябина» и «Рябина-М», самолетной аппаратуры единого времени и синхронизации «Акация-1» и

«Акация-2», самолетных и автомобильных приемных пунктов единого времени и синхронизации «Акация-1М», «Вишня», «Инжир»:

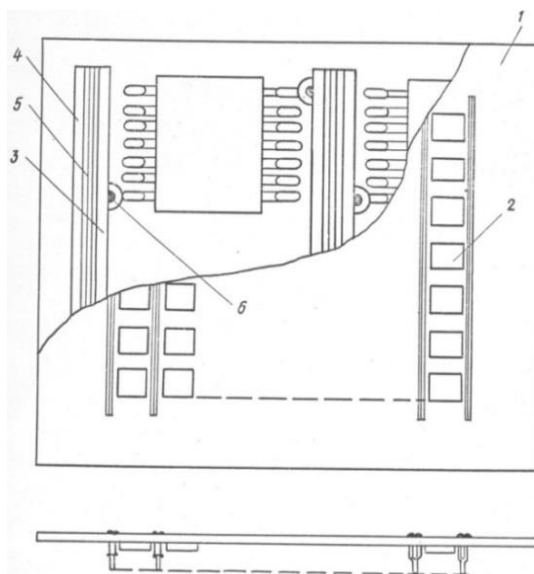


Рисунок 4 – Общий вид печатной платы

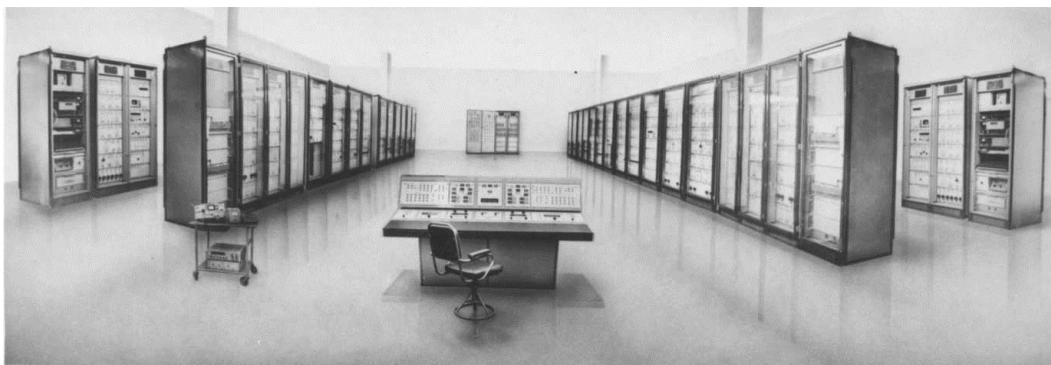


Рисунок 5 – Общий вид комплекса 73А6-1 в аппаратном зале

- А.П. Коковашина, А.М. Парфенова, С.А. Новожилова, Э.С. Афанасьевой, В.И. Погребняковой, Е.С. Сорокиной, А.Б. Королева, В.М. Зуева, Л.В. Дегтярева, В.П. Кильговатова, С.А. Лебедева, С.А. Зверева, В.П. Коненко, И.В. Кукушкина;

- инженеров и техников отдела: Л.М. Чупятовой, О.Н. Новиковой, И.М. Зайцевой, С.А. Худяева, А.А. Беляевой и др.;

- сотрудников отдела главного конструктора, экспериментального цеха, отделов соисполнителей и завода: А.Д. Пыха, Ю.С. Махнача, М.К. Смелянского, Г.П. Крыжановской, Л.Н. Ивановой, В.М. Лейко, А.К. Удалова, Ю.С. Иванова, В.В. Короткова, Ю.А. Кина, М.П. Панова и многих других.

Особую благодарность необходимо выразить сотрудникам Главного производственно-технического предприятия «Гранит» – руководителю бригады О.К. Захарову, инженерам-настройщикам: Н.И. Захаровой, А.Е. Свицерскому, Р.А. Свицерской, В.К. Сопову, Т.Н. Кабириной, Ю.И. Лисютину, Г.И. Каретниковой и др.

От имени всех разработчиков заслуживают огромной благодарности представитель военной приемки М.Г. Костин и руководитель ВП С.Д. Луговицын, а также представители главного конструктора: В.Г. Репина, Л.Н. Вихорев, Е.А. Почерникова, А.В. Волобуев, И.В. Усачева, В.С. Довченко, П.И. Цвайкбоим и др.

Литература

- 1 Воздушно-космическая оборона. – 2008. – № 4 (41).
- 2 Надежность автоматизированных систем управления / Под ред. Я.А. Хетагурова. – М.: Высшая школа, 1979.
- 3 *Букашкин С.А. и др.* Проектирование отказоустойчивого вычислительного комплекса с архитектурой 2 из 3 // Программная инженерия. – 2012. – № 3.
- 4 *Леонтьев Л.П.* Надежность технических систем. – Рига: Зинатне, 1969.
- 5 *Фролов А.Д.* Теоретические основы конструирования и надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Высшая школа, 1970.
- 6 *Бердичевский Б.Е.* Вопросы обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры при разработке. – М.: Сов. радио, 1977.
- 7 *Лонгботтом Р.* Надежность вычислительных систем. – М.: Энергоиздат, 1985.
- 8 *Садовский В.Н.* Основания общей теории систем. – М.: Наука, 1974.
- 9 *Васильев Б.В.* Прогнозирование надежности и эффективности радиоэлектронных устройств. – М.: Сов. радио, 1970.
- 10 *Мейстер Д.* Эргономические основы разработки сложных систем. – М.: Мир, 1970.
- 11 *Балясников Б.Н., Новожилов С.А., Парфенов А.М., Свердлов Я.Б.* Устройство для коррекции сигналов времени. – Авторское свидетельство СССР № 1158968. – 1982.
- 12 *Балясников Б.Н., Свердлов Я.Б., Парфенов А.М., Коковашин А.П., Королев А.Б., Зуев В.М.* Устройство для допускового контроля частоты. – Авторское свидетельство СССР № 855521. – 1981.
- 13 *Балясников Б.Н., Свердлов Я.Б., Парфенов А.М., Коковашин А.П.* Устройство для контроля микросхем, расположенных на печатной плате. Авторское свидетельство СССР № 750403. – 1978.
- 14 *Балясников Б.Н., Лебедев С.А., Новожилов С.А., Парфенов А.М., Свердлов Я.Б.* Мажоритарное устройство. – Авторское свидетельство СССР № 1119196. – 1983.