

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОПИЛОТЕ

1.1. Назначение, основные характеристики и комплектность автопилота

Автопилот "Кремень-40" (АП-40) предназначен для автоматического пилотирования самолета ЯК-40.

Автопилот обеспечивает:

- автоматическую стабилизацию углов крена, курса и тангажа;
- демпфирование угловых колебаний самолета;
- автоматическую стабилизацию барометрической высоты полета;
- автоматическую стабилизацию заданного гиромагнитного курса;
- управление самолетом по крену с помощью рукоятки "Разворот";
- управление самолетом по тангажу с помощью рукоятки "Спуск-подъем";
- автоматическое триммирование руля высоты с помощью управляемого стабилизатора;
- совмещенное управление самолетом с помощью рычагов управления с переводом автопилота в режим согласования;
- автоматический предполетный контроль и контроль в полете с отключением автопилота при возникновении отказа и сигнализацией об этом летчику.

Автопилот в своей работе использует:

- авиагоризонты АГБ-3К или АГД-1 как датчики текущих значений углов крена и тангажа,
- гиромагнитный компас ГМК как датчик гиромагнитного курса,
- гидрокран стабилизатора ГА, как исполнительное устройство системы автоматического триммирования, самолетную систему световой и звуковой сигнализации об отказах.

Включение автопилота не требует предварительной настройки и может производиться на любом курсе и при любом крене, а по тангажу в зоне углов $\pm 15^\circ$. При включении сохраняется текущий угол тангажа, а по крену самолет выводится в горизонт. В автопилоте предусмотрена возможность отключения канала тангажа.

Для работы автопилота требуется напряжения питания постоянного тока $27 \pm 2,7В$ и переменного тока $36 \pm 1,8В$ $400 \pm 8Гц$.

Автопилот потребляет не более 3А по постоянному току и 4А (в каждой фазе) по переменному току,

Время готовности автопилота к включению не превышает 100с.

Автопилот обеспечивает следующую точность стабилизации в невозмущенной атмосфере при постоянной скорости полета:

- по курсу $\pm 1^\circ$;
- по тангажу и крену $\pm 0,5^\circ$;
- по высоте $\pm 20м$.

Зона рабочих углов автопилота по курсу не ограничена, по крену $\pm 30^\circ$; по тангажу $\pm 15^\circ$.

Скорость управления по тангажу от рукоятки "Спуск-подъем" не менее 0,7 град/с и не более 1,9 град/с.

Величины усилий, необходимые для пересиливания рулевых машин летчиком, составляют: на штурвал - 11 кГ, на колонку - 12 кГ, на педали - 30 кГ.

Минимальная высота использования автопилота - 300 м.

Масса автопилота - 24 кГ.

В комплект автопилота входят:

- пульт управления (ПУ);
- вычислитель крена (ВК);
- вычислитель тангажа (ВТ);
- рулевые машины крена (РД7А-К), тангажа (РД7А-Т), направления (РД7А-Н);
- корректор высоты КВ;
- датчик обратной связи стабилизатора (ДОС);
- пульт проверки автопилота (ПП);
- два реле включения гидрокранов стабилизатора (ТКЕ-52);
- две кнопки совмещенного управления (КНЗ);
- две кнопки отключения автопилота (КНЗ).

Вычислители ВК и ВТ установлены на собственном амортизированном основании.

1.2. Принцип действия автопилота

Автопилот является астатическим. Это достигается применением изомдромной обратной связи в сервоприводах элеронов, руля высоты, стабилизатора и в цепи сигнала угла тангажа в режиме стабилизации высоты. В канале направления используется жесткая обратная связь.

Сигналы угловых скоростей, используемые для демпфирования угловых колебаний самолета, формируются путем дифференцирования сигналов угла.

Для снятия в проводке рулей высоты усилий, возникающих при изменении балансировки самолета, служит система автоматического управления стабилизатором. Эта система измеряет установившееся напряжение на обмотке управления двигателя рулевой машины высоты. Наличие установившегося напряжения свидетельствует о нагружении рулевой машины шарнирным моментом. В этом случае вырабатывается команда на отклонение стабилизатора разгрузки рулей высоты.

Система контроля автопилота построена по принципу непрерывного пропускания контрольного сигнала через тракт усиления сигнала угла.

Управление боковым движением самолета осуществляется через каналы крена и направления, а продольным - через канал тангажа. Структурная схема автопилота представлена на рис. 1.

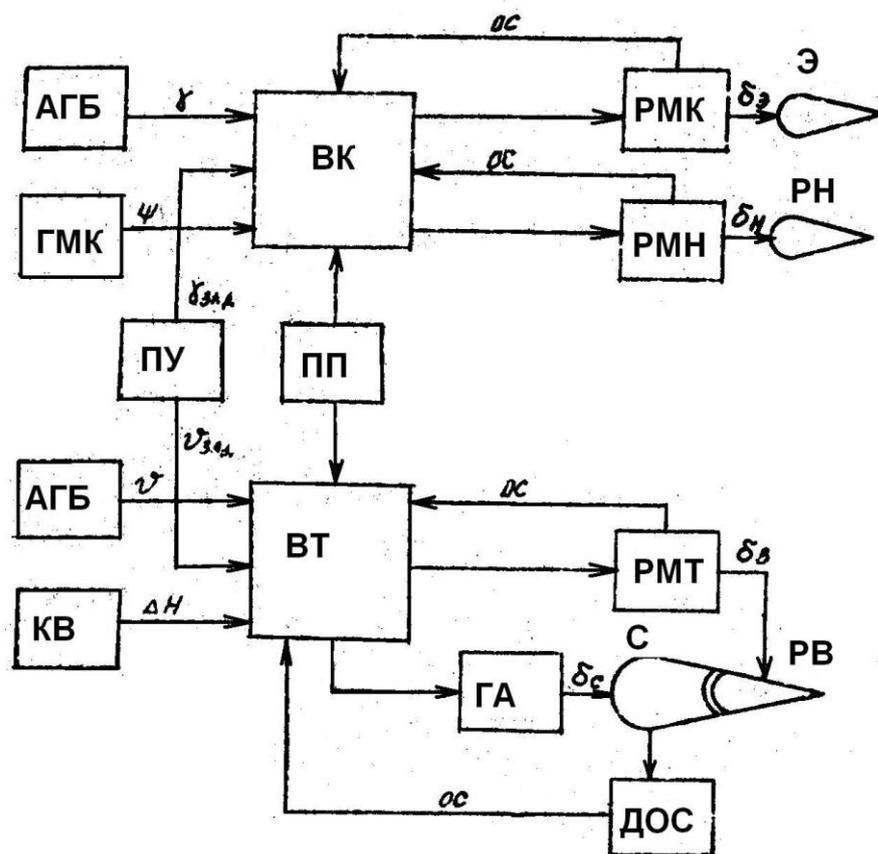


Рис.1. Структурная схема автопилота АП-40

Канал крена состоит из вычислителя крена ВК и рулевой машины крена РМК. Канал направления состоит из вычислительной части, расположенной в ВК, и рулевой машины направления РМН. Канал тангажа состоит из вычислителя тангажа ВТ и рулевой машины тангажа РМТ. Система автоматического триммирования состоит из вычислительной части, расположенной в ВТ, гидрокрана стабилизатора ГА и датчика обратной связи ДОС.

В вычислителях, автопилота сосредоточены усилительные блоки сервопривода, преобразующие, суммирующие и усилительные блоки управляющих сигналов, а также блоки контроля и коммутационные элементы.

Рулевые машины автопилота являются исполнительными органами сервопривода и представляют собой электромеханические устройства, служащие для управления рулевыми поверхностями самолета. Рулевая машина состоит из электродвигателя с редуктором, датчика позиционной обратной связи, датчика, скоростной обратной связи, муфты сцепления и муфты пересиливания. Выходной вал рулевой машины механически связан с органами управления самолета параллельным способом включения в проводку управления.

Пульт управления ПУ автопилота представляет собой электромеханическое устройство, имеющее комбинированную рукоятку управления по крену и тангажу, выключатели и кнопки-лампочки, обеспечивающие питание автопилота, переключение режимов его работы и сигнализацию летчику.

2. РАБОТА АВТОПИЛОТА

2.1. Работа сервопривода

Сервопривод автопилота предназначен для приведения в движение (перекладки) рулей и элеронов при появлении управляющего сигнала на его входе. Он представляет собой электромеханическую следящую систему, состоящую из усилительной части и рулевой машины, охваченных обратной связью. Структурная схема сервопривода представлена на рис.2.

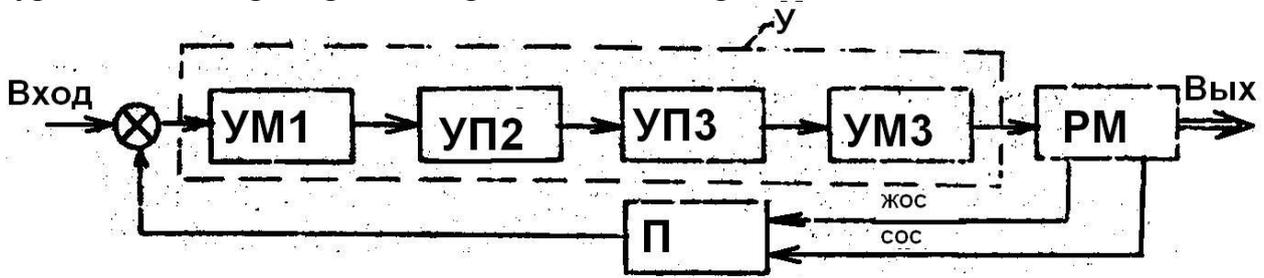


Рис.2. Структурная схема сервопривода

Усилительная часть сервопривода (У) предназначена для усиления и преобразования управляющего сигнала постоянного тока в сигнал переменного тока частотой 400Гц, который поступает в управляющую обмотку двигателя, являющегося силовым элементом рулевой машины. Усилительная часть сервопривода - многокаскадная. Она состоит из следующих усилителей:

УМ1 - магнитный усилитель для частичного усиления и преобразования сигнала постоянного тока в сигнал переменного тока;

УП2 - усилитель низкой частоты сигналов переменного тока с большим коэффициентом усиления;

УП3 - усилитель фазочувствительный для частичного усиления и преобразования сигнала переменного тока в сигнал постоянного тока;

УМ3 - магнитный усилитель мощности, преобразующий сигнал постоянного тока в сигнал переменного тока и являющийся выходным каскадом мощности.

Рулевая машина отклоняет рули или элероны в сторону, определяемую фазой поступающего на рулевую машину напряжения. Основным силовым элементом рулевой машины является электродвигатель, вращение которого через понижающий редуктор передается на выходной вал.

Для обеспечения отрицательной обратной связи сигнал переменного тока с индукционного датчика обратной связи, пропорциональный углу отклонения вала рулевой машины, пропускается через преобразователь (П), где он преобразуется в сигнал постоянного тока, и подается на вход сумматора сервопривода.

С помощью тахогенератора осуществляется внутренняя скоростная обратная связь, которая устраняет колебания в сервоприводе.

В каналах, крена и тангажа применен сервопривод с изодромной обратной связью, которая осуществляется введением изодромного звена в цепь об-

ратной связи. При ступенчатой подаче напряжения определенной величины на вход изодромного звена, состоящего из последовательно включенных конденсатора и резистора, сила тока в цепи в первый момент определяется только резистором, а конденсатор как бы закорочен. Затем ток начинает уменьшаться со скоростью, определяемой произведением емкости на сопротивление резистора.

Поэтому отклонение рулевой машины сервопривода с изодромной обратной связью сначала будет соответствовать отклонению привода с жесткой обратной связью, а затем, при длительном воздействии входного сигнала, начнет увеличиваться, так как ток в обратной связи может удерживаться на определенном уровне, необходимом для компенсации входного сигнала, только при непрерывном изменении напряжения обратной связи, то есть при движении рулевой машины,

Отклонение рулей приводом с изодромной обратной связью при кратковременном действующем входном сигнале и при длительно действующем входном сигнале и снятии его показаны на рис.3а и рис.3б.

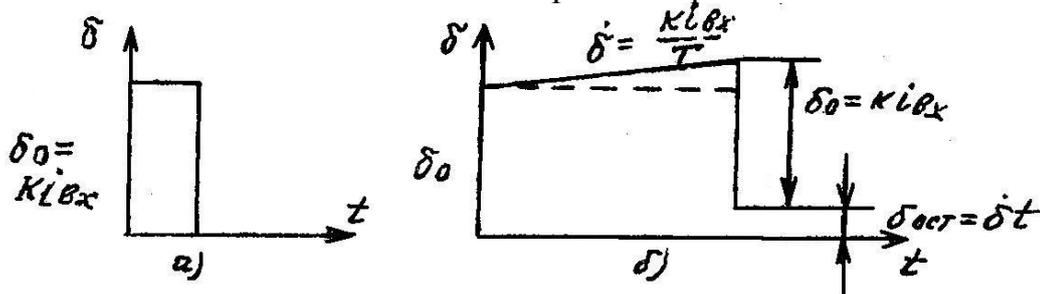


Рис.3. Отклонения рулей приводом

При ступенчатом снятии входного сигнала рулевая машина привода отклонится в противоположном направлении на величину, равную первоначальному ступенчатому отклонению. При этом новое положение рулевой машины будет отличаться от первоначального отклонения на некоторую величину $\delta_{ост}$.

Таким образом, при жесткой обратной связи руль может находиться в отклоненном положении только при наличии сигнала на входе, а при изодромной - и при отсутствии входного сигнала (после снятия длительно действующего сигнала). Этим достигается астатизм управления в каналах крена и тангажа. Это свойство привода с изодромной обратной связью позволяет задерживать регулируемый параметр (угол крена или угол тангажа) при постоянно действующем внешнем моменте. Тогда сигнал ошибки будет отклонять руль до тех пор, пока момент от руля не станет больше возмущающего момента, и самолет начнет возвращаться к исходному положению. Руль перестанет отклоняться только тогда, когда сигнал ошибки станет равным нулю, т.е. когда самолет вернется в исходное положение.

Принципиальная электрическая схема сервопривода канала элеронов представлена на рис.4. Сервопривод запитывается напряжением постоянного тока 27В, которое подается на вход 12 усилителя УМ1, входы А1 и А2 усилителя УП2, а также на электромагнитную муфту рулевой машины РМ через входы 16 и 18. Питаящим напряжением переменного тока является напряжение 36В,

400Гц, которым запитывается усилитель УМ1 через входы 1 и 2, трансформатор Тр3 через входы 1 и 2, усилитель мощности УМ2 через входы 1 и 2, рулевая машина РМ через входы 2, 4, 15, 17 и однополупериодный выпрямитель Ф3 через входы 1 и 2.

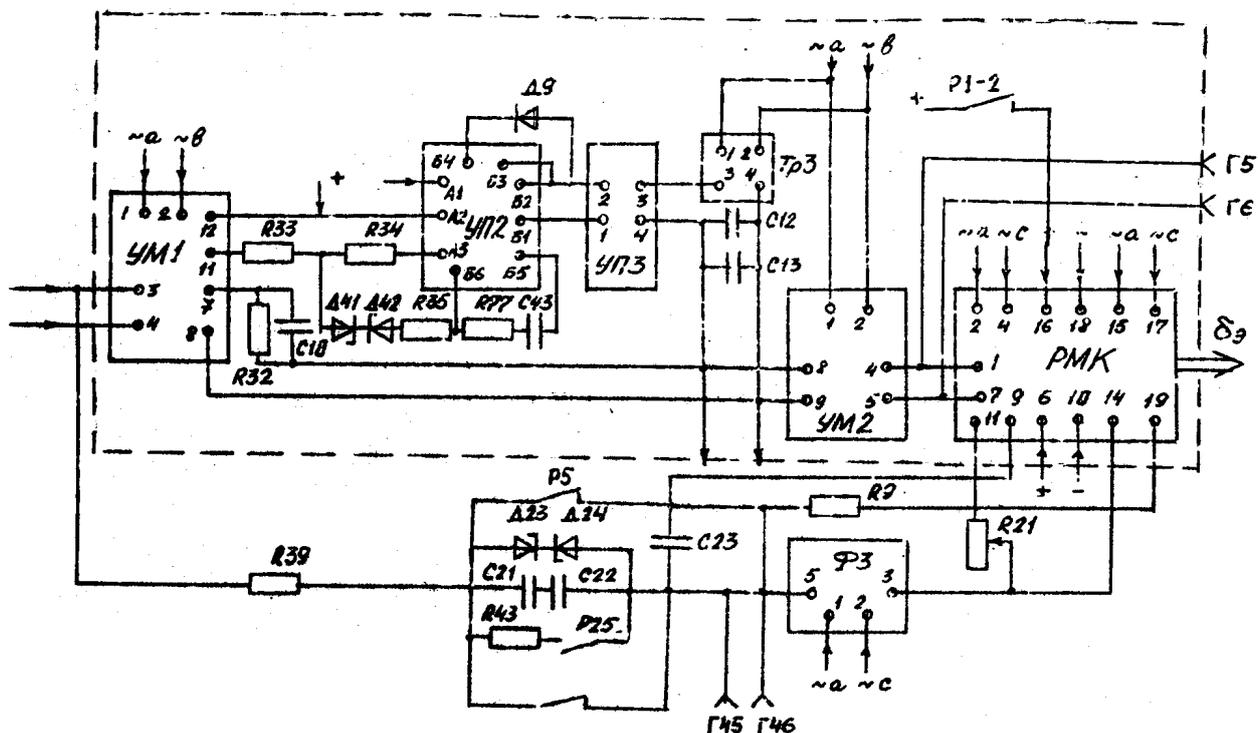


Рис.4. Принципиальная электрическая схема сервопривода канала элеронов

Все элементы сервопривода за исключением рулевой машины находятся в одном конструктивном блоке автопилота - вычислителе крена (ВК). Управляющий сигнал поступает на входы 3 и 4 усилителя УМ1 и последовательно проходит до цепочки: выход 11 усилителя УМ1 - вход А3 усилителя УП2, выходы Б1 и Б2 усилителя УП2 - входы 1 и 2 усилителя УП3, выходы 3 и 4 усилителя УП3 - развязывающий трансформатор Тр3 - входы 8 и 9 усилителя УМ4, выходы 4 и 5 усилителя УМ2 - входы 1 и 7 рулевой машины РМ, в результате чего двигатель рулевой машины приходит в движение и через механическую систему управления отклоняет элероны.

Прямая цепь прохождения управляющего сигнала является аналогичной для всех каналов сервопривода автопилота и на рис.4 она обведена пунктирной линией. Прямая цепь охвачена двумя внутренними и одной внешней обратными связями. Первая внутренняя обратная связь охватывает усилитель УП2, и включает конденсатор С43, сопротивления R77, R35 и R34 и стабилитроны Д41 и Д42. Она обеспечивает фильтрацию и линеаризацию характеристики усилительной части. Вторая внутренняя обратная связь охватывает всю усилительную часть с выходов 8 и 9 усилителя УМ2 на входы 7 и 8 усилителя УМ1, и включает конденсатор С10 и сопротивление R32. Эта связь обеспечивает стабильность общего коэффициента усиления сервопривода. Сопротивление R33 обеспечивает необходимую нагрузку на усилитель УМ1. Диод Д9 служит для подмагничивания усилителя УП2 в полупериод, когда усилитель УП3 не рабо-

тает. Трансформатор Тр3 подает опорное напряжение на усилитель УПЗ. Конденсаторы С12 и С13 образуют фильтр, уменьшающий пульсации выходного напряжения с усилителя УПЗ.

Внешняя отрицательная обратная связь сервопривода снимается с индукционного потенциометра рулевой машины (выходы 14 и 19), и также - с тахогенератора (выходы 9 и 11). Сигнал переменного тока выпрямляется на однополупериодном выпрямителе Ф3 и через изодромное звено, образованное конденсаторами С21, С22 и сопротивлением R39, поступает на вход сервопривода. Стабилитроны Д23 и Д24 ограничивают напряжение на конденсаторах С21 и С22. Сопротивление R43 служит для ограничения тока разряда конденсаторов через контакт реле Р25, которое срабатывает при наземной проверке. Сигнал жесткой обратной связи снимается через регулировочный потенциометр R21, который обеспечивает требуемую крутизну сигнала датчика обратной связи. Шлиц этого потенциометра выведен на лицевую панель вычислителя ВК. Сопротивление R9 служит для снятия сигнала скоростной обратной связью и суммирования с сигналом жесткой обратной связи. Конденсатор С23 уменьшает пульсации выпрямителя Ф3. На гнезда Г5 и Г6 выведен выходной управляющий сигнал вычислителя ВК. На гнезда Г45 и Г46 выведен сигнал обратной связи.

Электрическая принципиальная схема сервопривода канала рулей направления автопилота изображена на рис.5.

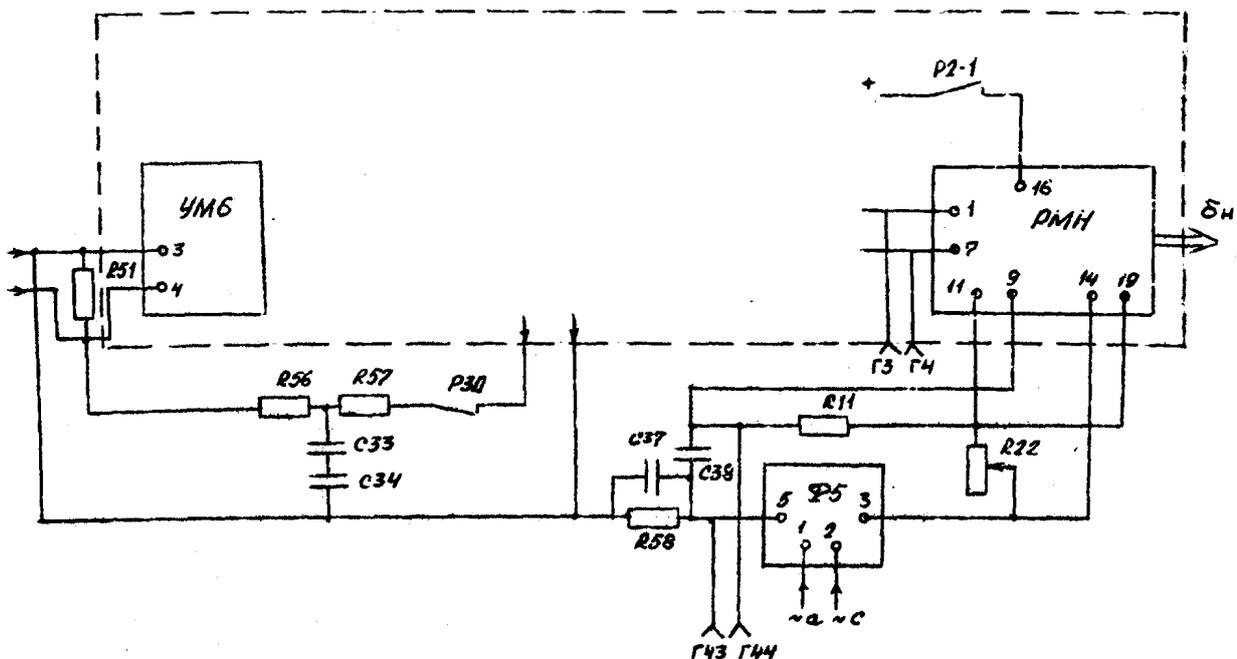


Рис.5. Принципиальная электрическая схема сервопривода канала направления

Ее отличительной особенностью является применение жесткой обратной связи. Сигнал с выхода 5 выпрямителя Ф3 через сопротивление R58 поступает на вход сервопривода. Назначение сопротивлений R11, R22 и конденсатора С38 аналогично таким же элементам в канале элеронов. Конденсатор С37 улучшает динамику работы сервопривода. В канале рулей направления используется еще одна отрицательная обратная связь, необходимая для установления руля

направления по потоку при действии на него постоянного внешнего момента. Эта обратная связь реализуется с помощью сопротивлений R56, R57 и конденсаторов C33 и C34. Контакт P30 разрывает цепь автоматической центровки руля направления при наземных проверках. Сопротивление R51 служит для увеличения затухания.

Принцип действия автоматической центровки заключается в том, что под действием внешнего момента руль направления отклоняется, и рулевая машина направления выдает сигнал с датчика обратной связи на усилительную часть сервопривода. На выходе усилительной части появляется напряжение, которое развивает момент рулевой машины, препятствующий внешнему моменту.

Под действием глубокой отрицательной обратной связи напряжение на выходе усилительной части начинает уменьшаться. При этом начинает уменьшаться момент рулевой машины и руль направления под действием постоянного внешнего момента ещё более отклоняется. Таким образом, руль переместится к положению, где на него действует меньший аэродинамический момент, то есть он установится по потоку. Так будет до тех пор, пока оставшийся внешний момент не уравновесится установившимся напряжением усилителя с малым коэффициентом усиления. При появлении знакопеременных сигналов производной курса руль направления будет отклоняться уже от нового положения. На гнезда Г3 и Г4 выведен выходной управляющий сигнал канала направления. На гнезда Г43 и Г44 выведен сигнал обратной связи.

Электрическая принципиальная схема сервопривода канала рулей высоты автопилота изображена на рис.6.

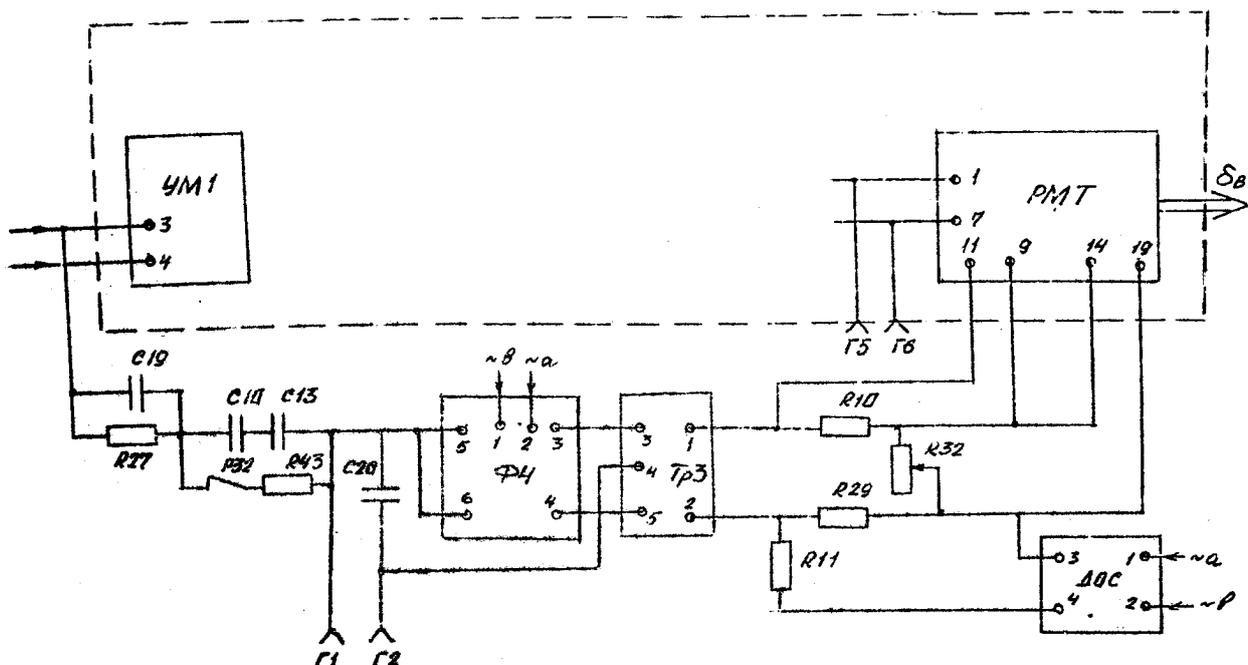


Рис.6. Принципиальная электрическая схема сервопривода канала рулей высоты

Здесь, так же как и в канале элеронов, применена изодромная обратная связь, реализованная конденсаторами C10, C13 и сопротивлением R27. Особен-

ностью этой схемы является наличие дополнительного сигнала с датчика обратной связи (ДОС) положения стабилизатора, который через сопротивление R11 складывается с сигналом обратной связи рулевой машины. Трансформатор Tr3 служит для обеспечения работы фазочувствительного выпрямителя Ф4 в режиме двухполупериодного выпрямления. Конденсатор С19 улучшает динамику работы схемы. Сопротивление R43 служит для ограничения тока разряда конденсаторов через контакт реле Р32 при наземной проверке.

На гнезда Г5и Г6 выведен выходной управляющий сигнал вычислителя ВТ. На гнезда Г1 и Г2 выведен сигнал обратной связи. Все гнезда расположены на лицевой панели вычислителей связи, датчика скоростной обратной связи, муфты сцепления и муфты пересиливания. Выходной вал рулевой машины механически связан с органами управления самолета параллельным способом включения в проводку управления.

2.2. Боковой канал автопилота

2.2.1. Режимы и законы управления в боковом канале

Боковой канал автопилота включает в себя каналы крена и направления, которые работают в режимах:

- автоматическая подготовка к включению;
- стабилизации курса;
- управление по крену;
- совмещенное управление.

Структурная схема режима стабилизации курса представлена на рис.7а.

Законы управления имеют вид:

$$\frac{T_{иp}}{T_{иp} + 1} \delta_{\gamma} = (k_{\gamma} \gamma + k_{\psi\gamma} \Delta\psi)(T_{\gamma} p + 1), \quad (1)$$

$$\delta_{н} = k_{\Delta\psi} \frac{T_{\psi 1} p + 1}{T_{\psi 2} p + 1} [p \Delta\psi + k_{\gamma\psi} (k_{\gamma} \gamma + k_{\psi\gamma} \Delta\psi)(T_{\gamma} p + 1)], \quad (2)$$

где δ_{γ} , $\delta_{н}$ - углы отклонения элеронов и рулей направления;

γ - угол крена;

$\Delta\psi$ - рассогласование по курсу.

$T_{и}$ - постоянная времени изодромной обратной связи;

k_{γ} , $k_{\Delta\psi}$ - передаточные коэффициенты по углам крена и рассогласования по курсу;

$k_{\psi\gamma}$, $k_{\gamma\psi}$ - передаточные коэффициенты из канала курса в канал крена и из канала крена в канал курса;

T_{γ} , $T_{\psi 1}$, $T_{\psi 2}$ - постоянные времени.

Структурная схема режима управления по крену представлена на рис.7б. Законы управления имеют вид:

$$\delta_{\gamma} = (k_{\gamma} \gamma + k_{\text{py}} x_{\text{py}})(T_{\gamma} p + 1), \quad (3)$$

$$\delta_{\text{H}} = k_{\Delta\psi} \frac{T_{\psi 1} p + 1}{T_{\psi 2} p + 1} \left[p \Delta\psi \frac{T_{\psi} p}{T_{\psi} p + 1} + (k_{\gamma} \gamma + k_{\text{py}} x_{\text{py}})(T_{\gamma} p + 1) \right], \quad (4)$$

где $k_{\text{py}}, x_{\text{py}}$ - соответственно передаточный коэффициент и отклонение рукоятки управления;

T_{ψ} - постоянная времени реального дифференцирующего звена.

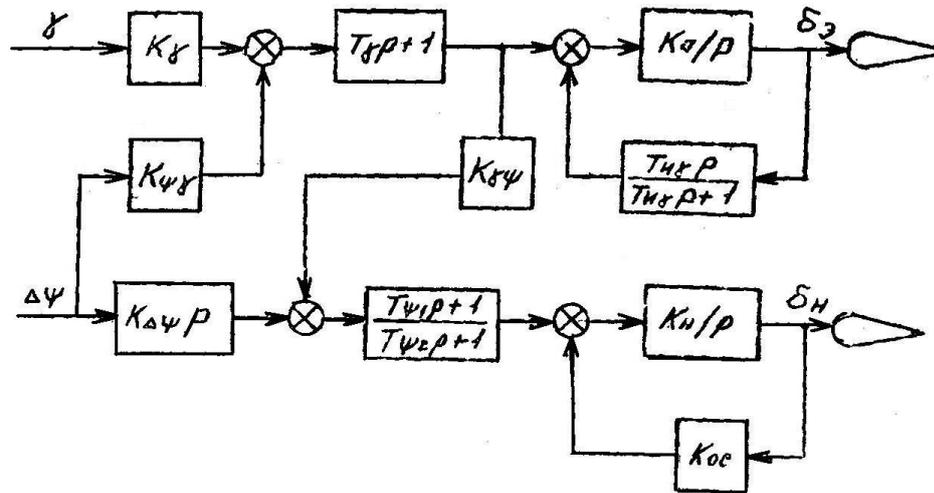


Рис.7а. Структурная схема режима стабилизации курса

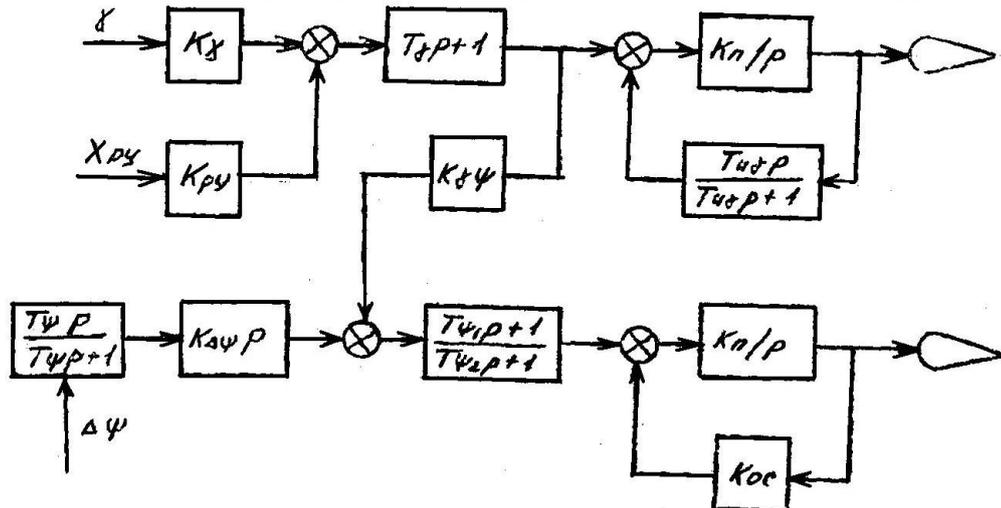


Рис.7б. Структурная схема режима управления по крену

2.2.2. Режим автоматической подготовки к включению в боковом канале

Принципиальная электрическая схема включения автопилота в боковом канале представлена на рис.8.

Напряжение питания 36В, 400 Гц подается в вычислитель ВК (входы 15, 18, 28), пульт управления ПУ (входы 17, 20), на рулевые машины (входы 2 и 4, 6 и 10, 15 и 17) при включении АЗС автопилота РП2.

В вычислителе ВК при этом запитывается обмотка возбуждения двигателя механизма согласования (входы Б1 и Б3 МС); фильтры Ф1, Ф2, Ф3, Ф4, Ф5; усилители магнитные УМ1, УМ2, УМ3, УМ4, УМ5, УМ6, УМ7, трансформаторы Тр1, Тр2, Тр3. В пульте ПУ запитывается индукционный датчик рукоятки управления по крену. В рулевых машинах запитываются обмотки возбуждения двигателя, тахогенератора и датчик позиционной обратной связи.

Режим автоматической подготовки включается тумблером "Питание" В1 на пульте ПУ. При этом с выхода 30 пульта ПУ на вход 3 вычислителя БК подается напряжение +27В постоянного тока, которым запитываются полупроводниковые усилители УП1, УП2, УП4, УП5, магнитные усилители УМ1 и УМ6, усилители релейные УР1, УР2 и УР3.

В режиме автоматической подготовки рулевые машины крена и направления отключены, а все входные сигналы, контролирующие положение самолета в пространстве с помощью различных устройств, обнуляются, то есть доводятся до минимальной величины.

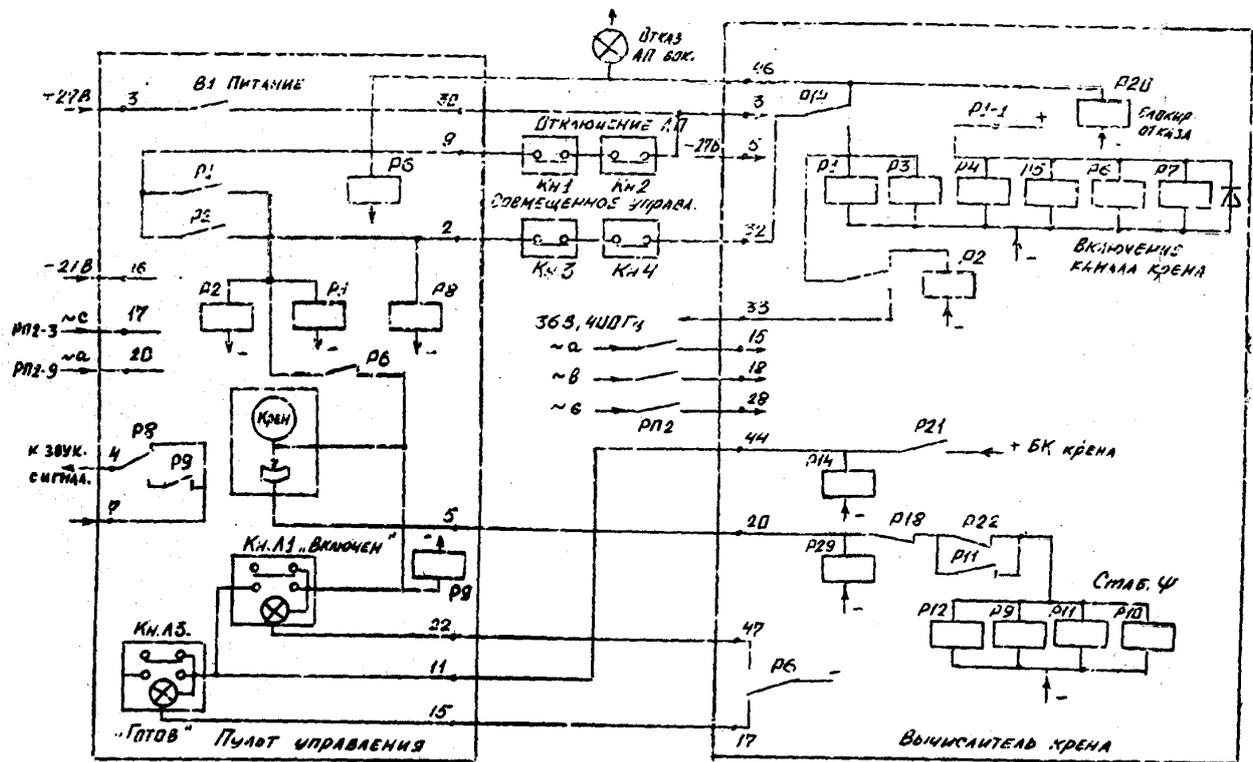


Рис.8. Принципиальная электрическая схема включения автопилота в боковом канале

Элементы контроля каналов крена и направления контролируют исправность основных цепей канала и фиксируют окончание режима подготовки. Если основные цепи каналов исправны, элементы контроля выдают команду на включение лампочки "готов" на пульте ПУ. Команда поступает через замкнутый контакт реле Р21 и выход У4 вычислителя крена ВК на вход 1 пульта ПУ. Минус поступает с вычислителя ВК через контакт реле Р6. Загорание лампочки "Готов" свидетельствует о готовности автопилота к включению. Принципиаль-

ные электрические схемы канала крена и канала курса представлены на рис. 9 и 10.

Сигнал, пропорциональный текущему крену γ , с авиагоризонта АГБ-3К (рис.10) на усилитель сервопривода не поступает, так как контакты реле РЗ и Р4 замкнуты. Сигнал с рукоятки управления ПУ $\gamma_{зад}$ равен нулю, так как рукоятка должна находиться в нейтральном положении. Сигнал с датчика обратной связи ДОС рулевой машины (рис.4) по крену закорочен контактом реле Р5. Сигнал текущего курса с гиромагнитного компаса ГМК (рис.10) поступает на входы 6, 12, 13 вычислителя ВК и далее на входы А1, А2, А3 механизма согласования (МС), представляющего собой сельсин-приемник, двигатель и редуктор.

Сигнал рассогласования между сельсином-датчиком ГМК и сельсином-приёмником МС поступает через выходы А4 и А6 МС на входы А4 и А2 усилителя УП4. Усиленный сигнал с усилителя подается на входы Б2 и Б4 механизма МС на двигатель, который через редуктор поворачивает ротор сельсина-приемника в сторону уменьшения рассогласования. Двигатель остановится тогда, когда сигнал рассогласования будет настолько мал, что после усиления его усилитель он не превышает напряжения трогания двигателя. При наличии рассогласования в этой следящей системе сигнал ошибки поступает в канал крена через трансформатор Тр2 (рис.9), усилитель УП1 и преобразователь Ф1 на вход усилителя сервопривода УМ1 и выводит его в состояние насыщения, в результате чего система контроля не выдает команды на загорание лампочки "Готов", на входе усилителя сервопривода канала направления сигналы обнуляются с помощью глубокой отрицательной обратной связи, охватывающей усилительный тракт и выполненной на запаздывающей ячейке RC (R56, R57, C33, C34, см. рис.5).

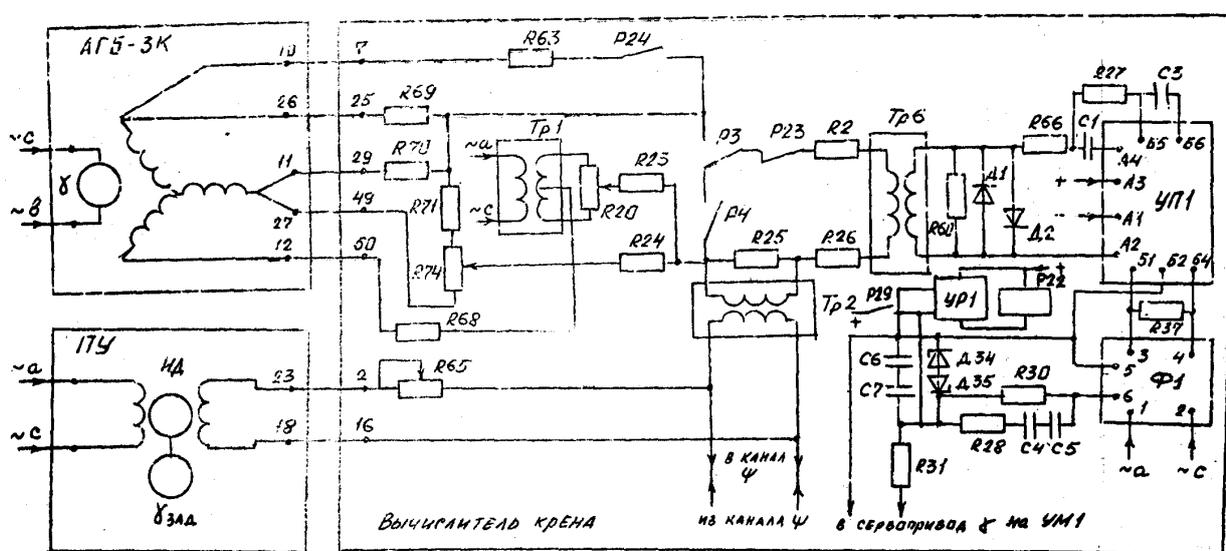


Рис.9. Принципиальная электрическая схема канала крена

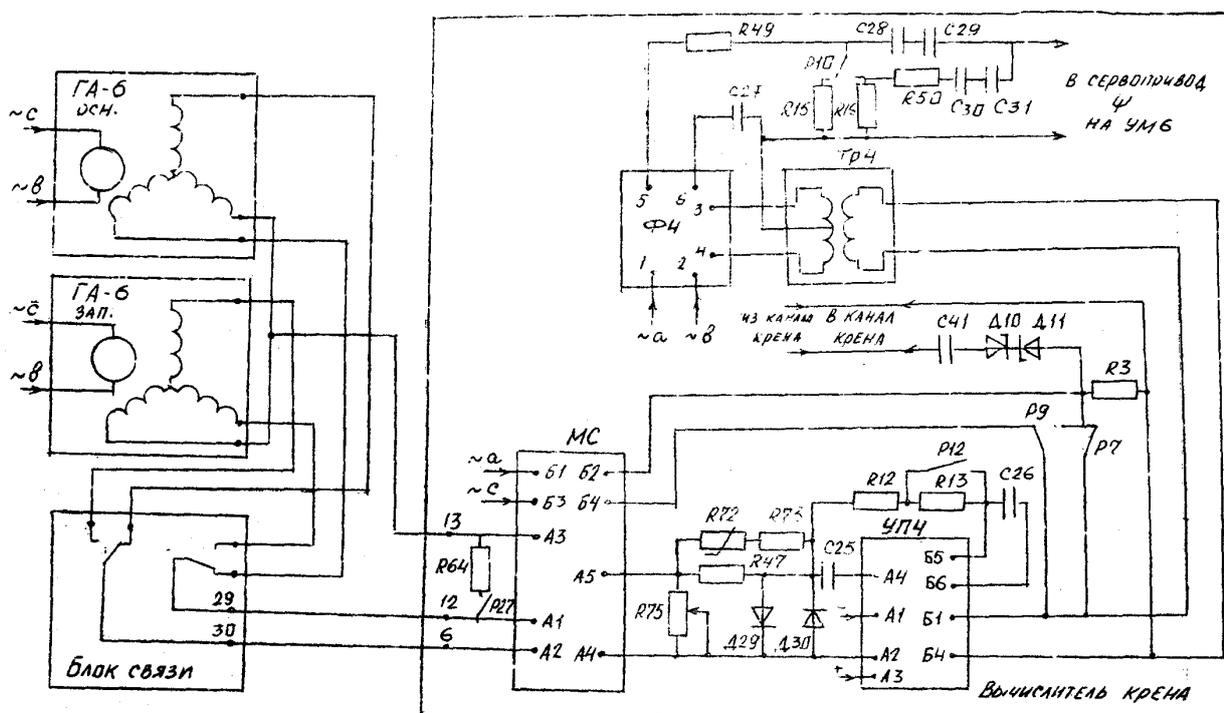


Рис.10. Принципиальная электрическая схема канала курса

2.2.3. Режим стабилизации курса

Автопилот включается нажатием кнопки - лампочки "Включен" на пульте ПУ (рис.8). Лампочка при этом загорается, а лампочка "Готов" гаснет. Срабатывают реле пульта ПУ P1 и P2, которые подают +27В через выход 2ПУ на вход 32ВК на группу реле включения АП в вычислителе ВК, а также реле P8 и P9, которые подготавливают цепь звуковой сигнализации. Напряжение +27В через контакт реле P14, который в это время находится в нижнем положении из-за срабатывания реле P14 по команде блока контроля крена, поступает на реле P1 канала крена и на реле P2 канала направления. Реле P1 своим контактом P1-2 (см. рис.4) включает муфту сцепления рулевой машины крена, соединяя вал рулевой машины с элеронами, и подают +27В контактами P1-1 на группу реле "Включение канала крена".

Эти реле подключают к сервоприводу сигнал текущего крена (контактами P3 и P4 на рис.9), подключают к сервоприводу сигнал обратной связи крена (размыканием контакта P5 на рис.4), отключают лампочку "Готов" и подключают лампочку "Включен" (контактом P6); подготавливают цепь стабилизации курса (контакт P7 на рис.10 размыкается).

Реле P2 контактом P2-1 (рис.5) включает муфту сцепления рулевой машины направления, соединяя вал рулевой машины с рулем направления. Если самолет до включения АП совершал разворот, то благодаря подключению сигнала датчика крена γ рулевая машина отклоняет элероны в сторону уменьшения крена. По окончании выхода самолета из крена автоматически подключается режим стабилизации курса.

Режим стабилизации курса включается после нажатия на кнопку-лампу "Вкл." После достижения самолетом нулевого крена устройства контроля вы-

дают команду на реле Р2-2, и напряжение +27В с пульта управления через контакты реле Р18 и Р22 включает группу реле "стабилизация ψ ", которые выполняют следующие функции: размыкают следящую систему обнуления (контактом Р9 на рис.10); уменьшают постоянную времени фильтра в канале направления (контактом Р10 на рис.10); блокируют режим стабилизации курса (контакты Р11 на рис.8); изменяют коэффициент усиления усилителя УП4 для обеспечения определенного передаточного числа в режиме стабилизации (контактом Р12 на рис.10).

Стабилизация курса самолета осуществляется с помощью элеронов. При отклонении самолета от стабилизируемого курса на роторе сельсина-приемника МС (рис.10) вычислителя крена появляется сигнал от датчика ГМК, пропорциональный углу отклонения самолета. Этот сигнал поступает на усилитель УП4 в канал крена на трансформатор Тр2 (рис.9), усилитель УП1, преобразователь УП-1 и далее на сервопривод крена. Рулевая машина отклоняет элероны до тех пор, пока сигнал обратной связи сервопривода не скомпенсирует сигнал разности между текущим креном с АГБ и заданным креном с МС. Самолет входит в крен, и сигнал разности становится равным нулю. Тогда управляющий сигнал сервопривода меняет знак, и двигатель рулевой машины возвращается в нейтральное положение, возвращая в нейтральное положение и элероны.

Вращение самолета относительно оси Х прекращается, и он разворачивается в сторону заданного курса с заданным креном. По мере приближения к заданному курсу сигнал рассогласования с МС уменьшается, а следовательно, уменьшается значение заданного крена. Сигнал текущего крена с АГБ становится больше сигнала заданного крена, и сервопривод начинает обрабатывать элероны в противоположную сторону, выводя самолет из крена. В момент выхода самолета на заданный курс элероны вернутся в нейтральное положение, и самолет выйдет из крена.

Демпфирование колебаний самолета по крену осуществляется с помощью сигнала производной, получаемой дифференцированием сигнала крена с помощью конденсаторов С4, С5 и сопротивлений R28 и R30 (рис.9). Канал руля направления используется при этом в качестве демпфера рыскания. Демпфирование колебаний самолета по курсу осуществляется сигналом производной курса, получаемым дифференцированием сигнала курса с помощью конденсаторов С28, С29 и сопротивлений R15 и R16.

В цепях прохождения управляющих сигналов по крену используются следующие элементы. Сопротивления R69, R70, R71 и R74 образуют делитель напряжения. С сопротивлений R71 и R74 снимается сигнал угла крена. С помощью R74 может быть осуществлена регулировка передаточного коэффициента k_{γ} . Сопротивления R68, R69 и R70 стоят в задублированной цепи. При обрыве одной ветви цепи сигнал угла сохранится, но с меньшим передаточным числом. Трансформатор Тр1 используется для запитки потенциометра R20, который совместно с сопротивлениями R23 и R24 образует делитель напряжения, с которого снимается сигнал центровки канала крена, суммируясь с сигналом угла. Сигнал центровки регулируется во время технического обслуживания.

Реле Р4 срабатывает при включении автопилота одновременно с Р3. Контакт Р4 контролирует нормальное переключение контакта Р3, который должен подключить сигнал угла и сигнал центровки к тракту канала крена. В случае залипания Р3 контакт Р4 разорвет замкнутую цепь Р3, Р23, R2, Тр6, R26, R25, Р4, Р3, и непрерывный контрольный сигнал, выделенный на R26, не поступит на обмотку Тр6, то есть на вход тракта.

Это приведет к срабатыванию сигнализации об отказе канала. Сопротивление R25 и трансформатор Тр2 служат для суммирования сигналов с рукоятки пульта ПУ и сигнала курса с сигналом текущего крена. Реле Р23 срабатывает во время проверки автопилота с пульта ПП в наземных условиях. Контакт Р23 разрывает входную цепь канала крена, и непрерывный контрольный сигнал, выделенный на R26, не поступает на обмотку Тр6, то есть на вход тракта. Сопротивление R2 служит для обеспечения передаточного коэффициента по крену. Трансформатор Тр6 предотвращает гальваническую связь внешней цепи датчика угла крена с питанием усилителя УП1. Сопротивление R60 подавляет наводки. Диоды Д1, Д2 и сопротивление R66 ограничивают сигнал на вход усилителя УНЧ2 для его защиты. Конденсатор С1 предотвращает попадание на вход усилителя УП1 напряжения постоянного тока.

Сопротивление R27 определяет величину отрицательной обратной связи усилителя УП1, которая необходима для стабильной работы усилителя. Конденсатор С3 служит для фильтрации выходного сигнала усилителя. Сопротивление R37 обеспечивает необходимую нагрузку для усилителя УП1. Конденсаторы С6 и С7 уменьшают пульсацию напряжения с выхода выпрямителя Ф1. Стабилитроны Д34, Д35 и сопротивление R30 ограничивают сигнал на вход сервопривода крена. Конденсаторы С4, С5 и сопротивление R28 формируют производную от сигнала угла крена, то есть угловую скорость. С сопротивления R30 снимается сигнал угла. С сопротивления R31 снимается входной сигнал на сервопривод крена.

В цепях прохождения управляющих сигналов по курсу используются следующие элементы. При наземных проверках срабатывает реле Р27, и его контакт совместно с сопротивлением R64 создает несимметричную нагрузку на сельсин-приемник МС, вследствие чего появляется сигнал, который проходит через весь тракт и отклоняет элероны на соответствующий угол и в соответствующую сторону. Сопротивления R47, R72 и R73 служат для обеспечения необходимой нагрузки для усилителя УПЧ8. Термосопротивления R72 уменьшают влияние температурных условий на изменение передаточного числа угла курса. Диоды Д29 и Д30 ограничивают сигнал на вход усилителя УП4 для его защиты. Конденсатор С25 предотвращает попадание на вход усилителя УПЧ42 напряжения постоянного тока. Сопротивления R12 и R13 определяют величину отрицательной обратной связи усилителя УПЧ, необходимой для стабильной работы усилителя в режиме готовности автопилота к включению.

При включении режима стабилизации курса контакт реле Р12 закорачивает сопротивление R13, увеличивая отрицательную обратную связь (уменьшал коэффициент усиления усилителя). Конденсатор С26 служит для фильтрации выходного сигнала. Стабилитроны Д10 и Д11 вводят зону нечувствительности

в сигнал угла курса в режиме подготовки АП к включению для того, чтобы нормально обнуленный сигнал не смог вывести тракт канала крена на отсечку, что привело бы к незагоранию лампы "Готов" и невозможности включения АП.

Реле Р7 срабатывает при включении автопилота. Контакт Р7 разрывает перекрестную связь из канала курса в канал крена до получения команды на включение стабилизации курса. Реле Р9 срабатывает при включении режима стабилизации курса. Контакт Р9 отключает выход усилителя УПЧ от управляющей обмотки двигателя механизма согласования, прерывая отслеживание угла курса, и переключает его через разделительный трансформатор Тр2 на вход канала крена для стабилизации курса. Сопrotивление R3 служит для предотвращения резкого изменения нагрузки на вход канала крена при разворотах, когда сигнал курса переводится на обнуление. Конденсатор С41 служит для согласования фазы выходного напряжения УПЧ с опорным напряжением выпрямителя Ф4. Диоды Д3 и Д4 вводят зону нечувствительности в сигнал рукоятки крена с тем, чтобы в режиме готовности к включению автопилот при нулевом положении рукоятки нулевой сигнал не привел к незагоранию лампочки "Готов" и невозможности включения автопилота. Трансформатор Тр4 обеспечивает развязку в цепи работы фазочувствительного выпрямителя Ф4 в режиме двухполупериодного выпрямления.

2.2.4. Режим управления по крену

Траектория полета самолета изменяется комбинированной рукояткой управления, расположенной на пульте ПУ. Если необходимо изменить курс самолета (совершить разворот), летчик должен отклонить рукоятку управления по крену. Рукоятка имеет оцифровку от 0° до 30° по которой определяют величину заданного крена самолета. Кроме фиксации рукоятки в нулевом положении, она имеет фиксированное положение, соответствующее углу крена 15° .

При отклонении рукоятки от нулевого положения (рис.9) в вычислителе крена с группы реле "Стаб. ψ " снимается +27В. Контактom реле Р9 (рис.10) включается следящая система обнуления сигнала курса. Сигнал $\gamma_{\text{зад}}$ (рис.9) с индукционного датчика ИД рукоятки пульта ПУ поступает на входы 2 и 16 вычислителя через регулировочный потенциометр R65 на трансформатор Тр2. Этот сигнал на сопротивлении R25 суммируется с сигналом текущего крена с авиагоризонта АГБ, подается на усилитель УП1, преобразователь Ф1 и далее в сервопривод канала крена. Сервопривод обрабатывает элероны на угол, пропорциональный сигналу $\gamma_{\text{зад}}$. В тот момент, когда сигнал обратной связи сервопривода скомпенсирует сигнал разности $(\gamma - \gamma_{\text{зад}})$, элероны прекратят отклоняться, и самолет с угловой скоростью ω_x будет вращаться относительно оси Х. При равенстве сигнала текущего крена с АГБ и сигнала заданного крена с АПУ сервопривод обработает элероны в нейтральное положение, самолет будет разворачиваться по курсу с заданным креном.

Для более эффективного ввода самолета в крен сигнал рукоятки ПУ подается и в канал руля направления, в результате чего руль направления будет компенсировать скольжение.

При отклоненной рукоятке управления рале R29 (рис.8) обесточивается и своим контактом включает релейный усилитель УР1 (рис.9), контакт исполнительного реле Р22 которого (рис.8) предотвращает включение режима стабилизации курса.

При возвращении рукоятки по крену в нулевое положение сигнал $\gamma_{\text{зад}}$ снимается, и на входе сервопривода остается сигнал текущего крена, под действием которого сервопривод отклоняет элероны в противоположном направлении, и самолет начинает выходить из крена. Этот ненулевой сигнал на входе усилителя УР1 (рис.9) подменяет сигнал, подаваемый контактом реле Р29. По мере выхода самолета из крена сигнал γ на входе релейного усилителя УР1 уменьшается, и он отпускает с определенной задержкой времени, которая формируется на ячейке РС. Исполнительное реле отпускает и включает группу реле "Стаб. ψ " С этого момента начнет стабилизироваться новый курс самолета.

2.2.5. Режим совмещенного управления

Этот режим включается при нажатии одной из кнопок "Совмещенное управление" (рис.8), расположенных на штурвалах правого и левого летчиков. Отключение режима происходит при отпускании кнопки.

Если нажать и держать кнопку «Совмещенное управление», автопилот переводится в режим подготовки к включению, то есть обесточиваются муфты сцепления рулевых машин и включается обнуление курса. Летчик может вручную изменить траекторию полета самолета с помощью штурвала и педалей. Для включения режима стабилизации автопилота достаточно отпустить кнопку "Совмещенное управление".

2.3. Продольный канал автопилота

2.3.1. Режимы и законы управления в продольном канале

Автопилот в продольном канале работает в режимах: автоматическая подготовка к включению; стабилизация тангажа; стабилизация высоты; управление по тангажу; совмещенное управление.

Структурная схема режима стабилизации тангажа и управления по тангажу представлена на рис.11а.

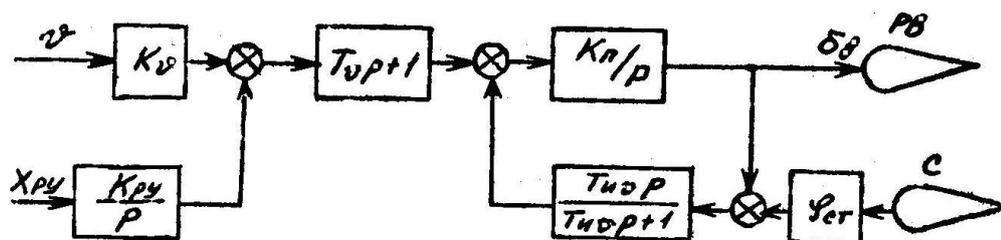


Рис.11а. Структурная схема режима стабилизации тангажа и управления по тангажу

Закон управления имеет следующий вид:

$$\frac{T_{иp}}{T_{иp+1}} \delta_B = \left(k_{\vartheta} \vartheta + \frac{k_{py} \vartheta}{p} \right) (T_{\vartheta} p + 1) - k_{ст} \frac{T_{иp}}{T_{иp+1}} \varphi_{ст}, \quad (5)$$

где $T_{и}$ - постоянная времени издромной обратной связи;

$k_{\vartheta}, k_{py}, k_{ст}$ - передаточные коэффициенты по углу тангажа, по отклонению рукоятки управления, по углу отклонения стабилизатора;

T_{ϑ} - постоянная времени форсирующего звена;

$\varphi_{ст}$ - угол отклонения стабилизатора;

ϑ - угол тангажа;

δ_B - угол отклонения рулей высоты.

Структурная схема режима стабилизации высоты представлена на рис.116.

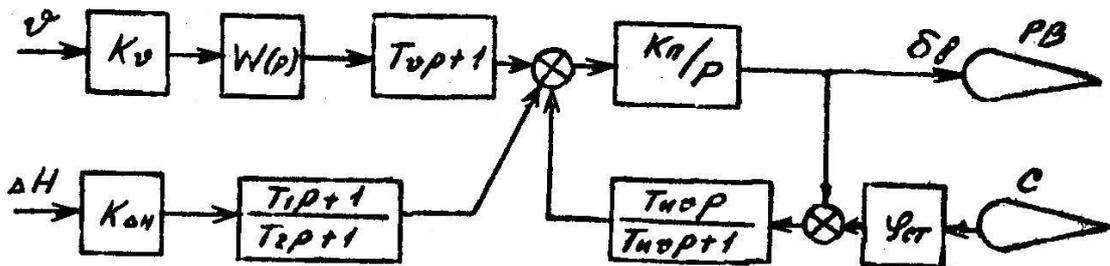


Рис.116. Структурная схема режима стабилизации высоты

Закон управления имеет вид:

$$\frac{T_{иp}}{T_{иp+1}} \delta_B = k_{\vartheta} W(p) (T_{\vartheta} p + 1) \vartheta - k_{\Delta H} \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1} \Delta H - k_{ст} \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1} \varphi_{ст}, \quad (6)$$

где T_{ϑ}' - постоянная времени механизма согласования при $\Delta \vartheta \geq 1,5^\circ$;

$k_{\Delta H}$ - передаточный коэффициент по ΔH ;

T_1, T_2 - постоянные времени фильтра по сигналу ΔH ;

$$W(p) = \begin{cases} 1, & \text{при } \Delta \vartheta < 1,5^\circ; \\ \frac{T_1 p}{T_1 p + 1}, & \text{при } \Delta \vartheta \geq 1,5^\circ. \end{cases}$$

2.3.2. Режим автоматической подготовки к включению в продольном канале

Электрические принципиальные схемы включения канала тангажа и прохождения управляющих сигналов представлены на рис.12 и рис.13.

Напряжение питания 36В, 400 Гц подается в вычислитель ВТ (входы 15,

18, 28), на пульт управления ПУ (входы 17, 20), рулевую машину РМТ (входы 2 и 4, 6 и 10, 15 и 17) и датчик обратной связи ДОС стабилизатора (входы 1 и 2) при включении АЗС автопилота РП2.

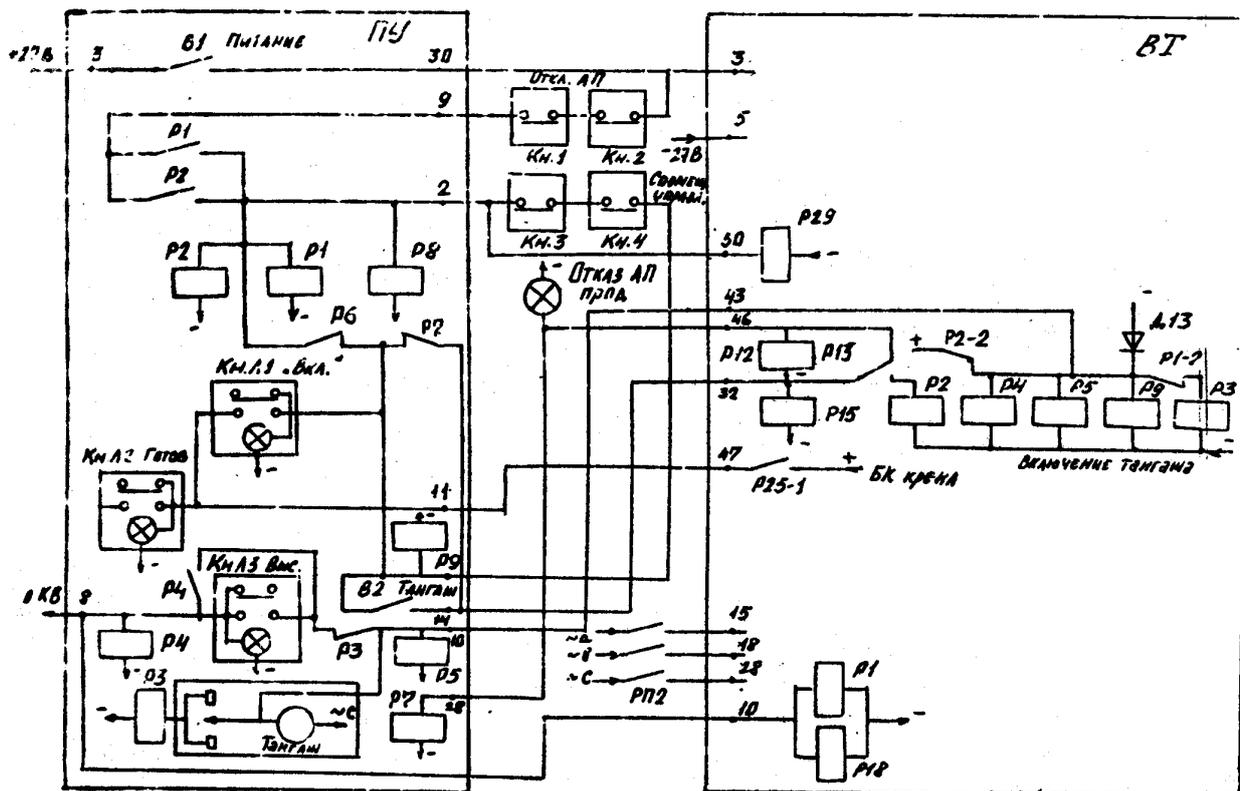


Рис.12. Принципиальная электрическая схема включения канала тангажа

В вычислителе ВТ при этом запитываются обмотка возбуждения двигателя механизма согласования МС (входы Б1, Б3, Б5); фильтры Ф1, Ф2, Ф3, Ф4; усилители магнитные УМ1, УМ2, УМ3, УМ4, УМ5, УМ6; трансформатор Тр2. В пульте ПУ запитывается индукционный датчик рукоятки управления по тангажу. В рулевой машине запитывается обмотка возбуждения двигателя, тахогенератора и датчик позиционной обратной связи. В датчике ДОС запитывается обмотка возбуждения.

Режим автоматической подготовки включается тумблером "Питание" В1 на пульте ПУ (рис.12). При этом с выхода 30 пульта ПУ на вход 3 вычислителя ВТ подается напряжение +27В постоянного тока, которым запитываются полупроводниковые усилители УП1, УП2; магнитный усилитель УМ1; усилители УР1, УР2, УР3.

Элементы контроля канала крена в случае исправности выдают сигнал +27В на вычислитель тангажа и, если элементы контроля этого вычислителя также фиксируют исправную работу канала (контакты реле Р25 замкнуты), это напряжение через выход 47 вычислителя ВТ поступает на вход 11 пульта ПУ и лампу "Готов". Лампа загорается. Для замыкания контактов реле Р25 необходимо, чтобы был обнулен сигнал текущего тангажа с авиагоризонта (рис.13).

Этот сигнал поступает на входы 6, 12, 13 вычислителя ВТ и далее на входы А1, А2 и А3 механизма согласования МС, представляющего собой сельсин-

приемник, двигатель и редуктор. Сигнал рассогласования между сельсином-датчиком АГБ и сельсином-приемником МС поступает через выходы А4 и А5 на входы А4 и А2 усилителя УП1. Сигнал с выходов Б1 и Б4 усилителя через замкнутый контакт Р3 подается на входы Б2 и Б4 механизма МС на двигатель, который через редуктор поворачивает ротор сельсина-приемника в сторону уменьшения рассогласования. Сигнал с датчика обратной связи рулевой машины тангажа и с датчика обратной связи стабилизатора равен нулю благодаря изодромной ячейке в цепи обратной связи (рис.6), постоянная времени которой в режиме подготовки уменьшена сопротивлением Р28. Сигнал с рукоятки управления $\gamma_{зад}$ (рис.13) на вычислитель тангажа не поступает, так как рукоятка находится в нейтральном положении. Сигнал с корректора высоты, отключенный от сервопривода контактом реле Р1-1 (рис.13), обнуляется пружинным устройством корректора.

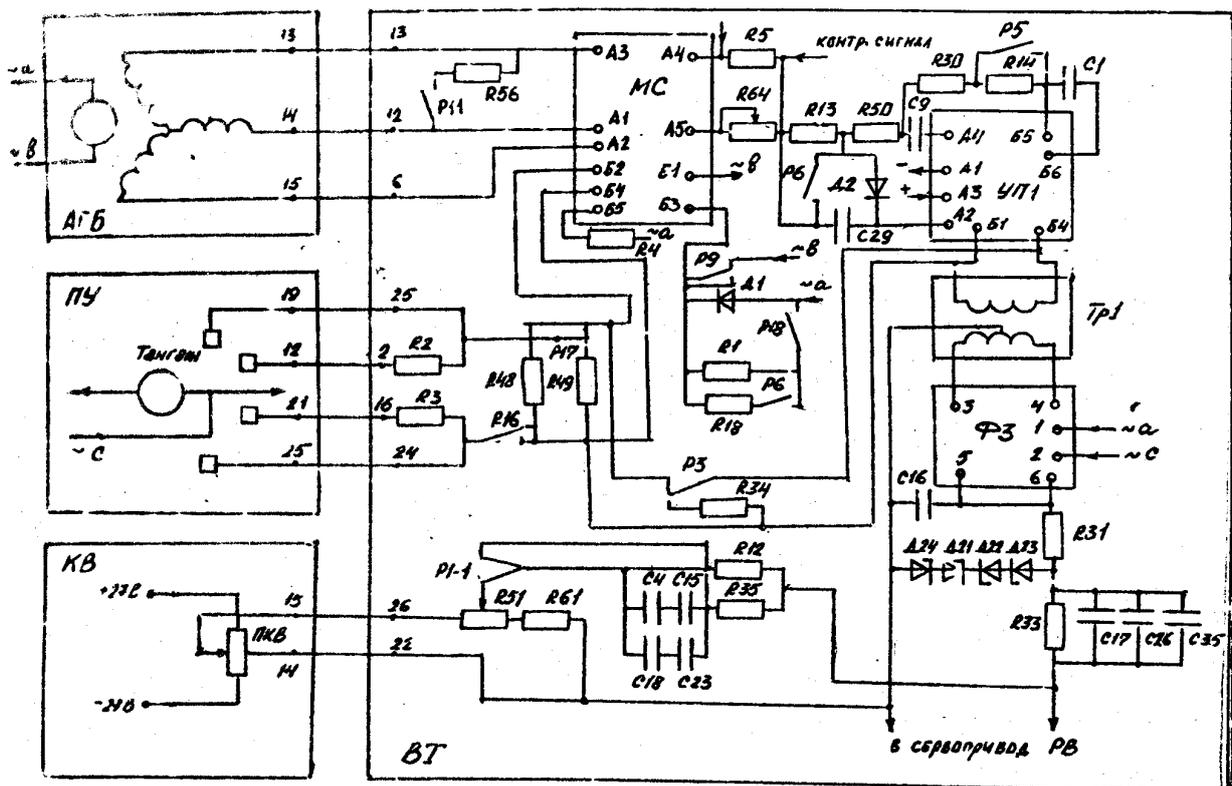


Рис.13. Принципиальная электрическая схема канала рулей высоты

2.3.3. Режим стабилизации тангажа

При нажатии кнопки-лампочки "Включен" срабатывает реле Р29 вычислителя тангажа, контактом которого подготавливается к работе цепь звуковой сигнализации. Включение автопилота по каналу тангажа может произойти лишь при включенном тумблере "Тангаж" на пульте ПУ.

При нажатии кнопки-лампочки "Включен" напряжение +27В поступает на реле Р15 и через контакт Р15 - на реле Р2 вычислителя тангажа. Реле Р15 подготавливает к работе цепь звуковой сигнализации. Реле Р2 включает муфту сцепления рулевой машины тангажа контактом Р2-1 (рис.6), соединяя вал рулевой машины с рулями высоты, и подает +27В контактом Р2-2 на группу реле

"Включение тангажа".

Группа реле "Включение тангажа" размыкает контактом Р3 следящую систему обнуления для работы автопилота в режиме стабилизации (рис.13); изменяет контактом Р5 коэффициент усиления усилителя УП1 для обеспечения определенного передельного числа в режиме стабилизации тангажа; контактом Р9 подготавливает двигатель механизма согласования для работы в режиме управления. Одновременно срабатывает бортовое реле РП1, переключающее ручное управление стабилизатором на автоматическое.

Стабилизация тангажа осуществляется следующим образом. При отклонении самолета от стабилизируемого угла тангажа с сельсина-датчика авиагоризонта АГБ выдается сигнал $\Delta\theta$ на входы 6, 12, 13 вычислителя ВТ на сельсин-приемник механизма МС (входы А1, А2, А3). С ротора сельсин-приемника (выходы А4 и А5 МС) через усилитель УП1 сигнал поступает на трансформатор Тр1, преобразователь Ф3 и далее на вход сервопривода рулей высоты РВ. Демпфирование колебаний самолета по тангажу осуществляется сигналом тангажа, пропущенным через ячейку РС, состоящую из сопротивления R33 и конденсаторов С17, С26, С35. Сервопривод канала тангажа отклоняет руль высота до тех пор, пока сигнал обратной связи не скомпенсирует управляющий сигнал $\Delta\theta$. При этом самолет изменяет тангаж и сигнал $\Delta\theta$ становится равным нулю. Тогда под действием сигнала обратной связи сервопривод рули вернутся в первоначальное положение. Элементы в управляющих цепях вычислителя тангажа в режиме стабилизации тангажа выполняют следующие функции.

Реле РП срабатывает от кнопки "Тангаж" пульта проверки при наземных проверках исправности канала тангажа. Контакт реле РП вместе с сопротивлением R56 создает несимметричную нагрузку на датчик угла тангажа, вследствие чего на роторе сельсина-приемника механизма согласования появляется сигнал, который проходит через весь тракт и отклоняет руль высоты на соответствующий угол и в соответствующую сторону.

Сопротивление R5 обеспечивает определенную величину непрерывного контрольного сигнала в канал тангажа во время контроля в полете. Конденсатор С29 предотвращает попадание +27В на вход контролируемых устройств.

С помощью сопротивления R13 и регулировочного потенциометра R64, шлиц которого выведен на лицевую панель вычислителя, обеспечивается требуемое значение передаточного коэффициента по углу тангажа. Диод Д2 и сопротивление R50 ограничивают сигнал на вход усилителя УП1 для его защиты. Конденсатор С9 предотвращает попадание на вход усилителя УП1 напряжения постоянного тока. Сопротивления R30 и R14 определяют величину отрицательной обратной связи усилителя УП1, необходимой для стабильной работы усилителя в режиме подготовки. При включении автопилота контакт реле Р5 замыкает сопротивление R14, увеличивая отрицательную обратную связь (уменьшая коэффициент усиления усилителя). Конденсатор С1 фильтрует выходной сигнал.

Реле Р3 срабатывает при включении автопилота. Контакт R3 отключает выход усилителя УП1 от управляющей обмотки двигателя механизма согласо-

вания прерывая отслеживание угла тангажа, и подключает к нему для выравнивания сопротивление R34.

Трансформатор Tr1 обеспечивает развязку цепей питания фазочувствительного выпрямителя Ф3 и его работу в режиме двухполупериодного выпрямителя. Конденсатор С16 уменьшает пульсации выходного напряжения с выпрямителя Ф1. Сопротивление R31 и стабилитроны Д21÷Д24 стабилизируют максимальное напряжение усилителя УП1 для предотвращения появления импульсов при срабатывании релейных устройств.

Через сопротивление R33 проходит сигнал угла. Конденсаторы С17, С26, С35 формируют производную от сигнала угла тангажа, то есть угловую скорость. Реле Р9 своим контактом при включении режима стабилизации тангажа включает в цепь возбуждения двигателя механизма согласования диод Д1 для снижения скорости управления и уменьшения момента инерции механизма при снятии управляющего сигнала.

2.3.4. Режим стабилизации высоты

Режим стабилизации высоты включается нажатием кнопки-лампочки "Высота" на пульте ПУ (рис.12). Лампочка загорается, срабатывает реле Р4, блокируя своими контактами команду включения стабилизации высоты, и напряжение +27В подается на муфту корректора высоты КВ. Муфта, срабатывая, подключает сигнал с корректора к вычислителю тангажа. Одновременно в вычислителе тангажа срабатывают реле Р1 и Р18, которые подключают контактом Р1-1 (рис.13) сигнал КВ к усилителю сервопривода, и подготавливают к работе в этом режиме следящую систему обнуления контактами Р18 (рис.13) и Р1-2 (рис.12).

В режиме стабилизации высоты сигнал угла тангажа приводит к определенной статической ошибке по высоте, так как при полете с измененным углом атаки (например, после разгона при включенном корректоре КВ) сигнал изменения угла тангажа $\Delta\theta$ должен быть скомпенсирован сигналом изменения высоты ΔH . Для исключения этой ошибки сигнал $\Delta\theta$ медленно обнуляется механизмом согласования МС (контакт Р3 замкнут).

При отклонении самолета от заданной барометрической высоты сигнал, пропорциональный ΔH , с потенциометра корректора высоты КВ поступит на вход сервопривода, который отклонит руль высоты до положения, когда сигнал обратной связи сервопривода не скомпенсирует сигнал ΔH . Самолет будет изменять угол тангажа и сигнал, пропорциональный $\Delta\theta$, скомпенсирует на входе сервопривода сигнал ΔH . Под действием сигнала обратной связи сервопривода рули высоты вернуться в нейтральное положение. Сигнал рассогласования ΔH начнет уменьшаться, и управляющий сигнал на входе сервопривода поменяет знак. Сервопривод отклонит рули высоты в противоположную сторону, поэтому начнет уменьшаться сигнал $\Delta\theta$, что приведет к возвращению рулей в нейтральное положение. Процесс регулирования закончится, когда ΔH станет равным нулю.

Рассмотрим назначение элементов схемы вычислителя тангажа, действующих в режиме стабилизации высоты. Сопротивления R52, R61 и регули-

ровочный потенциометр R51 обеспечивает требуемое значение передаточного коэффициента по сигналу ΔH . Конденсаторы C4, C15, C13, C23 и сопротивление R35 образуют форсирующий сигнал (производную от сигнала корректора высоты), необходимый для демпфирования колебаний самолета по высоте. При выпуске шасси срабатывает реле P6, контакт которого уменьшает сопротивление в цепи возбуждения двигателя механизма согласования, увеличивая чувствительность системы реле P18 своими контактами, при включении режима стабилизации высоты шунтирует сопротивление R1 и диод Д1, который ввел зону нечувствительности в следящую систему при отработке угла тангажа. Сопротивление R1 обеспечивает величину зоны нечувствительности $1,5 \pm 1,3^\circ$, необходимой для стабилизации высоты. При срабатывании реле P6 сопротивление R18 шунтирует диод Д1 и сопротивление R1, уменьшая зону нечувствительности до $1 \pm 0,7$ при отработке угла тангажа при выпущенном шасси.

2.3.5. Режим управления по тангажу

При необходимости изменить угол тангажа самолета летчик отклоняет рукоятку управления автопилота на себя или от себя. Если летчик отклонил рукоятку и удерживает ее в этом положении, срабатывает реле P3 пульта управления П4 (рис.12), которое отключает режим стабилизации высоты (снимается +27В с муфты корректора высоты), и лампочка "Высота" гаснет. В вычислителе тангажа обесточиваются реле P1 и P18, которые отключают цепь сигнала ΔH от усилителя сервопривода тангажа и подготавливают МС к работе в режиме управления.

При отклонении рукоятки управления (рис.13) фаза переменного тока через контактное устройство рукоятки поступает на управляющую обмотку двигателя МС (входы Б2 и Б4), который поворачивает с определенной скоростью ротор сельсина-приемника. Сигнал с ротора (выходы А4 и А5) поступает через усилитель УП1 и преобразователь Ф3 на сервопривод. Рулевая машина тангажа отклоняет рули высоты до тех пор, пока сигнал обратной связи не скомпенсирует управляющий сигнал $\Delta \theta$ на входе сервопривода. В результате самолет будет изменять угол тангажа с заданной угловой скоростью. При достижении необходимого угла тангажа летчик отпускает рукоятку, которая под действием пружины возвращается в нейтральное положение. Сервопривод отрабатывает рули высоты в нейтральное положение, и изменение угла тангажа прекращается. Для стабилизации новой высоты летчик должен нажать кнопку "Высота" на пульте ПУ.

Сопротивления R2 и R3 обеспечивают минимальные скорости управления рукояткой на кабрирование и пикирование. Сопротивления R48 и R49 определяют величину реверсивной скорости от рукоятки управления. Сопротивление R4 обеспечивает максимальную скорость управления рукояткой по тангажу. Реле P16 и P17 коммутируют сигнал от рукоятки управления по тангажу для реверсирования двигателя МС в обратную сторону.

2.3.6. Режим автоматического триммирования

Автоматическое управление стабилизатором самолета обеспечивает сня-

тие усилий в проводке рулей высоты. В режимах стабилизации тангажа и высоты самолета при длительном полете или при изменении режима полета, а также при выпуске шасси или закрылков рули высоты должны быть отклонены от начального положения и установлены в новое балансировочное положение. Автопилот автоматически обеспечит это отклонение, но летчик не будет об этом информирован, и в случае отключения автопилота руль под действием шарнирного момента резко вернется в начальное положение (по потоку), что вызовет перегрузку. Для того чтобы не было рывка при отключении автопилота, система автоматического управления стабилизатором (автотриммер) переставляет стабилизатор самолета в новое балансировочное положение, а руль возвращает в исходное ненагруженное положение.

Автотриммер действует следующим образом. Если руль высоты отклонен от начального положения и автопилот удерживает его в этом положении, то на входе рулевой машины тангажа действует управляющий сигнал, под действием которого рулевая машина развивает момент, уравнивающий шарнирный момент. Принципиальная электрическая схема работы вычислителя тангажа в режиме автоматического триммирования представлена на рис.14.

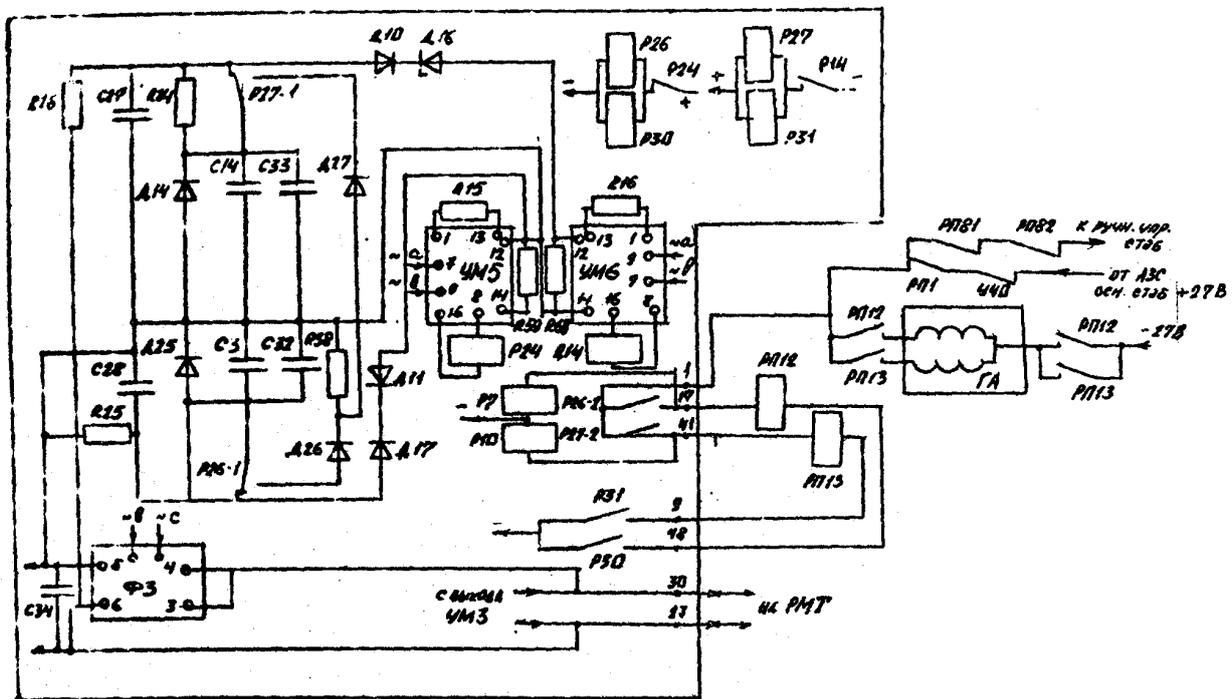


Рис.14. Принципиальная электрическая схема работы автопилота в режиме автоматического триммирования

Управляющий сигнал с выхода усилителя сервопривода УМ3 поступает на преобразователь Ф3 и далее, в зависимости от полярности, на магнитные реле УМ5 или УМ6. Эти реле через задержку времени, определяемую параметрами ячейки R25, C3, C32 или R26, C14, C33, включают исполнительные реле Р14 или Р24. Эти реле включают реле Р26 и Р30 или Р27 и Р31, которые подают 27В постоянного тока (контактами Р26-2 и Р30 или Р27-2 и Р36, в зависимости от полярности) на бортовые реле РП12 или РП13. Эти реле подают 27В постоян-

ного тока на гидрокран стабилизатора ГА, который отклоняет стабилизатор самолета в ту же сторону, в которую отклонен руль высоты.

Датчик обратной связи положения стабилизатора выдает на вход сервопривода сигнал на отклонение руля высоты в обратную сторону (к исходному положению). Тем самым стабилизатор снимает с руля высоты нагрузку. Как только руль высоты вернется в начальное положение (по потоку), сигнал на входе рулевой машины тангажа уменьшится до минимального значения. Магнитные реле УМ5 или УМ6 выдадут команду исполнительным реле на снятие управляющего сигнала с гидрокрана стабилизатора, стабилизатор остановится в отклоненном положении.

Рассмотрим назначение элементов управляющих цепей, задействованных в режиме автоматического триммирования. Сопротивления R26 и R60 образуют делитель напряжения, с которого снимается на магнитное реле УМ6 сигнал с преобразователя Ф3. Конденсаторы С14, С33 в начале работы триммерного устройства (в режиме импульсной работы) вместе с сопротивлением R26, когда сопротивление R24 закорочено контактом реле Р27-1, создают задержку на срабатывание магнитного реле УМ6.

При срабатывании УМ6 контакт реле Р27-1 через сопротивление R38 замыкает конденсаторы С14, С33, которые разряжаются с постоянной времени, определяемой R38, С14, С33 до напряжения стабилизация диода Д27. Сопротивление R24 увеличивает постоянную времени заряда конденсаторов С14, С33, которые дозаряжаются с этой новой постоянной времени. При этом на сопротивлении R60 напряжение падает, и реле УМ6 отпускает до полного заряда конденсаторов.

С увеличением сигнала, поступающего на систему триммирования, интервалы между срабатыванием и отпусканием реле УМ6 уменьшаются, и начинается непрерывная работа триммерного устройства. Сопротивление R16 определяет чувствительность триммерного устройства, то есть момент начала импульсной работы. Чем больше сопротивление R16, тем больше чувствительность. Диод Д14 исключает зарядку конденсаторов С14, С33 напряжением обратной полярности при работе реле УМ5. Диод Д10 обеспечивает отсутствие тока в цепи входных обмоток реле УМ6 при смене полярности сигнала на входе триммерного устройства, что вызвало бы не отпускание УМ6.

Стабилитрон Д16 вводит зону нечувствительности сигнала на триммирование, чтобы нулевые сигналы не заблокировали реле УМ6. Конденсатор С27 уменьшает пульсации выходного напряжения с Ф3. Сопротивления R25 и R59 образуют напряжение, с которого снимается сигнал на реле УМ5. Конденсаторы С3, С32 в начале работы триммерного устройства (в режиме импульсной работы) вместе с сопротивлением R25, когда R62 закорочено контактом, создают задержку на срабатывание магнитного реле УМ5. Их работа аналогична работе конденсаторов С14 и С33. Назначение элементов R15, R62, Д25, Д11, Д17, С28 аналогично назначению таких же элементов, обеспечивающих работу реле УМ6.

Реле Р14 срабатывает при включении реле УМ6, когда руль высоты отклонен и на него длительно действует шарнирный момент, стремящийся вер-

нуть руль в нейтральное положение. Контакт реле Р14 подает +27В на реле Р27 и 31. Контакт реле Р27-2 подает напряжение +27В, а контакт Р31 - напряжение -27В на самолетное реле РП13, которое запитывается напряжением постоянного тока соответствующую обмотку гидрокрана стабилизатора ГА.

Стабилизатор начинает отклоняться на пикирование, а датчик обратной связи стабилизатора У11 (рис.6) выдает сигнал на возврат руля высоты в нейтральное положение. Когда руль высоты встанет по потоку, на него не будет действовать шарнирный момент. На входе триммерного устройства сигнал пропадет, реле Р14 отпустит, и стабилизатор остановится в отклоненном положении. Работа реле Р24 и происходящие в системе триммирования процессы аналогичны описанным, но стабилизатор отклоняется на кабрирование.

3. КОНТРОЛЬ АТОПИЛОТА И СИГНАЛИЗАЦИЯ ОБ ОТКАЗАХ

3.1. Контроль автопилота в полете

Безопасность полета самолета в случае неисправности автопилота обеспечивается:

- ограничением усилий рулевых машин автопилота и, как следствие, ограничением максимальной скорости изменения угла крена и перегрузки (нормальной и боковой);
- возможностью свободного пересиливания рулевых машин одним летчиком;
- возможностью быстрого отключения автопилота кнопками отключения, расположенными на штурвалах левого и правого летчиков, или тумблеров "питание" на пульте автопилота;
- наличием постоянного контроля основных трактов прохождения сигналов в каждом канале с автоматическим отключением неисправного канала и сигнализацией об этом летчику; сигнализацией летчику о неисправности автотриммера.

Неисправности автопилота в канале крена и тангажа обнаруживаются непрерывной проверкой прохождения через основные цепи вычислителей контрольного сигнала, вырабатываемого генераторами. Неисправности, вызывающие пропадание сигнала генератора, сводятся к следующим неисправностям:

- обрыву цепей тракта прохождения управляющих сигналов; пропаданию напряжений питания;
- появлению на входе усилителя сервопривода сигнала такой величины, который переводит усилитель в режим насыщения;
- неисправности рулевой машины; неисправности элементов контроля.

3.1.1. Контроль исправности бокового канала

Схема контроля канала крена представлена на рис.15. Контроль основан на пропуске непрерывного контрольного сигнала через весь тракт канала крена и проверки его на выходе канала.

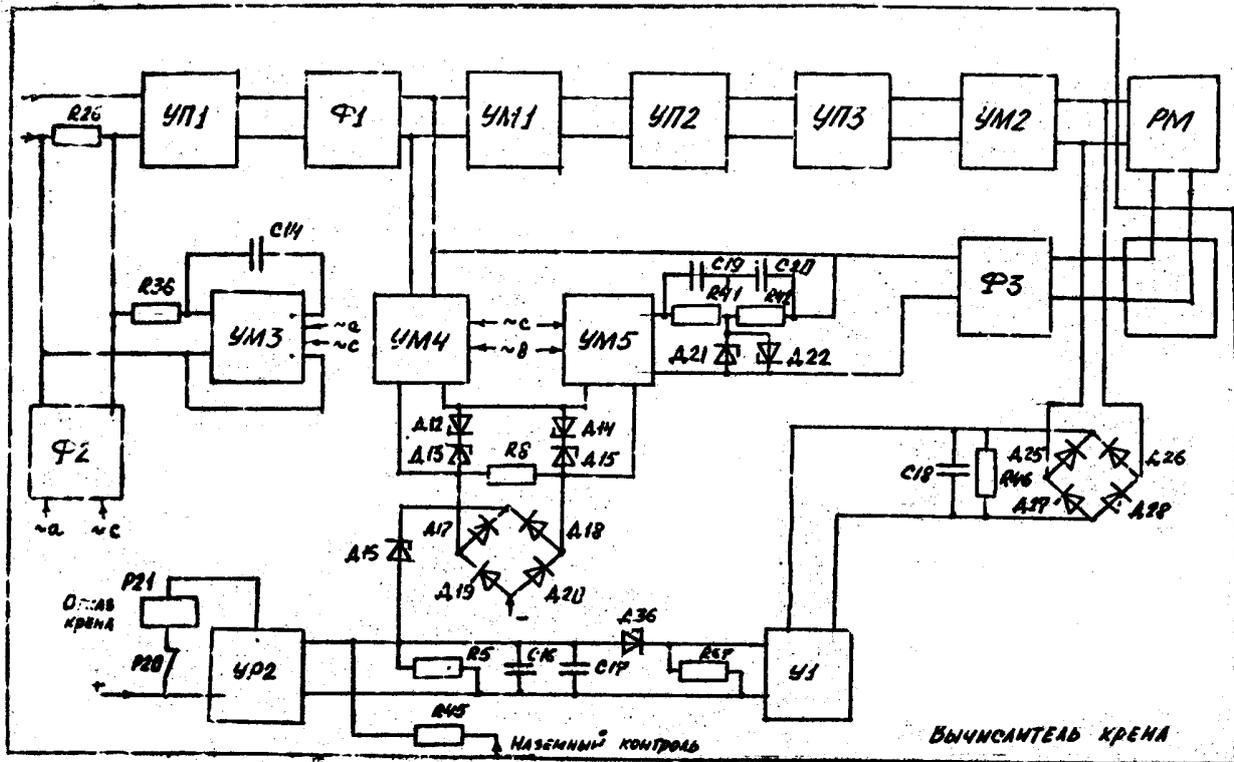


Рис.15. Схема контроля канала крена

Непрерывный контрольный сигнал формируется магнитным усилителем УМ3, который при подаче сигнала с его выхода на вход становится генератором. Величина емкости конденсатора С14, установленного в цепи выход-вход определяет частоту генерации, которая для канала крена равна 13Гц. Сигнал частоты 400Гц модулируется частотой 13Гц. Амплитудная модуляция состоит в том, что амплитуда колебаний частота 400Гц не остается постоянной, а изменяется в соответствии с воздействующими колебаниями низкой частоты 13Гц.

Это достигается следующим образом: подключенная к цепи одна половина преобразователя работает как однополупериодный выпрямитель, то есть пропускает одну полуволну сигнала частоты 400 Гц. Поданный синусоидальный сигнал генератора частоты 13Гц закорачивается в эту полуволну преобразователя с частотой 400Гц, а во вторую полуволну преобразователь Ф2 имеет небольшое сопротивление, и сигнал с генератора проходит в канал. Сопротивление R36 является ограничивающим, поэтому при рабочей полуволне преобразователь Ф2 не закорачивает выход генератора УМ3.

Далее этот сигнал приходит через сопротивление R4, которым подбирается необходимая его величина, и подается на вход канала через сопротивление R26.

На выходе канала модулированный непрерывный контрольный сигнал попадает на диодный мост Д25÷Д28, где он преобразуется из переменного тока в постоянный ток. Так как выпрямление двухполупериодное, то происходит удвоение модулирующей частоты. Затем сигнал поступает на фильтр У1, где происходит процесс детектирования, то есть выделение модулирующей частоты (в данном случае удвоенной), которая была выработана генератором УМ3, и

выпрямление сигнала. Сигнал постоянного тока (не менее 2В) держит усилитель УР2 в постоянно сработанном состоянии.

При пропадании непрерывного контрольного сигнала усилитель УР2 через время задержки, определенное конденсаторами С16, С17 и сопротивлениями R5, R67, отпустит, и реле Р21 обесточится. Контакт реле Р21 обесточивает реле Р14, которое своим контактом снимает +27В с группы реле включения канала крена и подает его на табло "Отказ АП бок" и реле блокировки Р20. Контакт реле Р20 разрывает цепь реле Р21, и при появлении вновь контрольного сигнала реле Р21 не сработает до тех пор, пока не будет произведено отключение и повторное включение автопилота. Кроме того, контакт Р21 разрывает цепь лампочки "готов" и кнопки "Включен", исключая включение автопилота при наличии на выходе канала крена несогласованного сигнала в режиме подготовки автопилота к включению.

При резком отклонении рукоятки управления по крену на входе усилителя сервопривода появляется большой некомпенсированный сигнал. В результате на выходе усилительного тракта из-за насыщения усилителя пропадает контрольный сигнал генератора, и становится возможным ложное отключение канала системой встроенного контроля. Во избежание этого в вычислителе крена предусмотрено логическое устройство, принцип действия которого заключается в сравнении знака сигнала, поступающего на вход сервопривода (этот знак определяется усилителем УМ4), со знаком угла отклонения элеронов (знак определяется усилителем УМ5). Логическое устройство срабатывает, и отключает систему контроля в том случае, когда элероны отклонены в заданную сторону. При невыполнении команды или при движении элеронов в сторону, обратную заданной логическое устройство не срабатывает, и система контроля отключает канал автопилота.

Рассмотрим назначение элементов цепей контроля. Сопротивление R46 служит для разрядки конденсаторов цепи при снятии сигнала. Конденсатор С18 уменьшает пульсации выходного напряжения с моста Д25÷Д28. Сопротивление R67 разряжает конденсатор на выходе фильтра У1 при пропадании контрольного сигнала. Стабилитрон Д36 вводит в зону нечувствительности по контрольному сигналу с тем, чтобы при пропадании контрольного сигнала остаточный сигнал не заблокировал блок контроля крена (усилитель УР2).

Конденсаторы С16, С17 совместно с R5, R67 создают задержку на отпускание релейного усилителя УР2, которая исключает ложные срабатывания системы контроля при кратковременном пропадании контрольного сигнала (примерно 1,5с). Сопротивление R5 необходимо для нормальной работы усилителя УР2 и стабильной разрядки конденсаторов С16, С17, Сопротивление R45 ограничивает сигнал блокировки блока контроля канала крена при наземных проверках.

Контроль канала направления выполнен по способу контроля уровня напряжения на выходе усилителя сервопривода. Исполнительным элементом схемы контроля является релейный усилитель УР3. При появлении на выходе усилителя сервопривода длительного сигнала определенной величины релейный усилитель срабатывает, и контактом своего исполнительного реле Р19 от-

ключает канал направления.

3.1.2. Контроль исправности продольного канала

Схема контроля продольного канала представлена на рис.16. Контроль исправности продольного канала аналогичен контролю исправности канала крена, за исключением того, что генератор УМТ вырабатывает частоту 25Гц. Удвоения частоты на выходе нет, и релейный усилитель УР2 не является конечным.

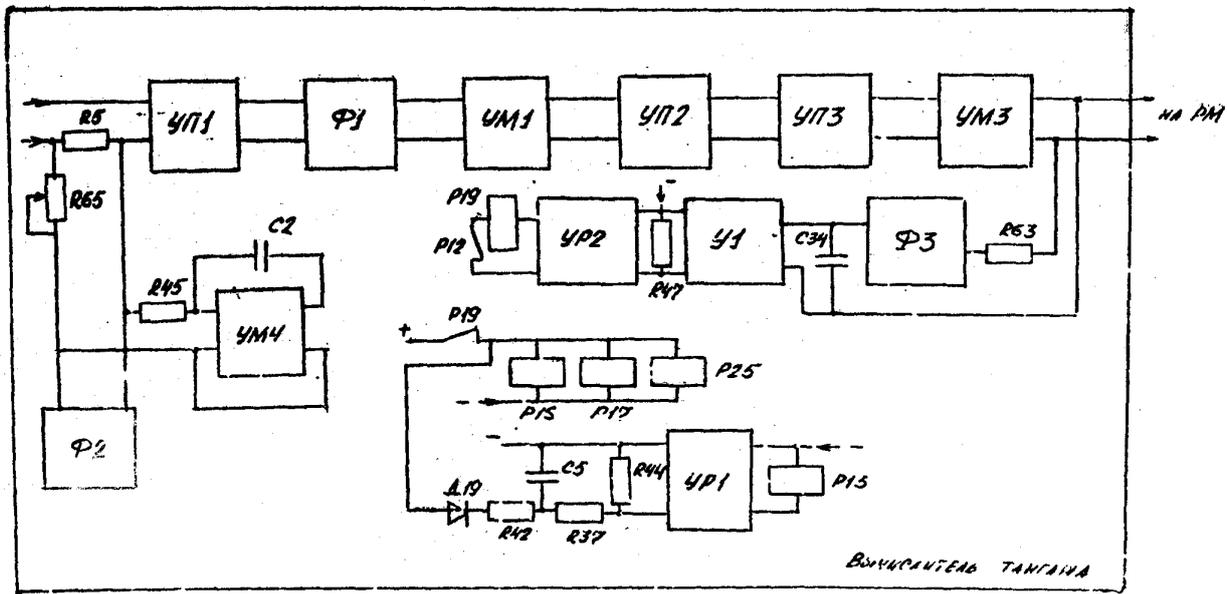


Рис.16. Схема контроля канала тангажа

Реле P19, на которое работает усилитель УР2, своим контактом держит усилитель и группу реле P16, P17, P25 в постоянно срабатанном состоянии. При пропадании непрерывного контрольного сигнала реле P16, P17, P25 обесточиваются без задержки. Контакт P25 разрывает цепь лампочки "Готов" и кнопки "Включен", не исключая включения автопилота при наличии на выходе канала тангажа несогласованного сигнала в режиме подготовки автопилота.

При отклонении рукоятки управления по тангажу возможно было бы ложное срабатывание средств контроля по той же причине, что и в канале крена. В связи с тем, это характер управления по тангажу другой (по крену задается угол, а по тангажу - угловая скорость), средства борьбы с ложными срабатываниями в этом канале также другие.

Ложное отключение автопилота по каналу тангажа возможно потому, что заданная угловая скорость $\omega_{зад}$ (скорость механизма согласования) может быть больше скорости самолета по тангажу, которая определяется максимальным моментом, развиваемым рулевой машиной. Поэтому принцип логического устройства в канале тангажа основан на уменьшении (путем реверсирования управляющего сигнала) скорости управления до величины, которую может обеспечить рулевая машина. Реверсирование сигнала управления с рукоятки (посредством контактов реле P16, P17) включается в момент срабатывания пер-

вой ступени системы контроля канала тангажа - релейного усилителя УР2.

При этом разность $\omega_{z\text{зад}} - \omega_z$ уменьшится. Если команда не была выполнена примерно в течение 1,2с (время задержки срабатывания релейного усилителя определяется конденсатором С5 и сопротивлениями R37, R44) то усилитель УР1 отпустит и обесточит реле Р13. Контакт реле Р13 снимет +27В с группы реле включения канала тангажа и подает его на табло "Отказ АП прод." и реле блокировки Р12. Контакт реле Р12 разрывает цепь реле Р19, и при появлении вновь контрольного сигнала реле Р19 не работает до тех пор, пока не будет произведено отключение и повторное включение автопилота.

3.2. Наземный контроль автопилота

В автопилоте предусмотрен встроенный наземный контроль его работоспособности, обеспечивающий предполетную и послеполетную проверку. Элементы контроля размещены на пульте наземной проверки, который обеспечивает:

- проверку работоспособности основных усилительных трактов АП;
- проверку исправности блоков контроля;
- переключение изодромной обратной связи на жесткую связь;
- отключение блоков контроля по крену, курсу тангажу.

Электрическая схема прохождения командных контролируемых сигналов представлена на рис.17.

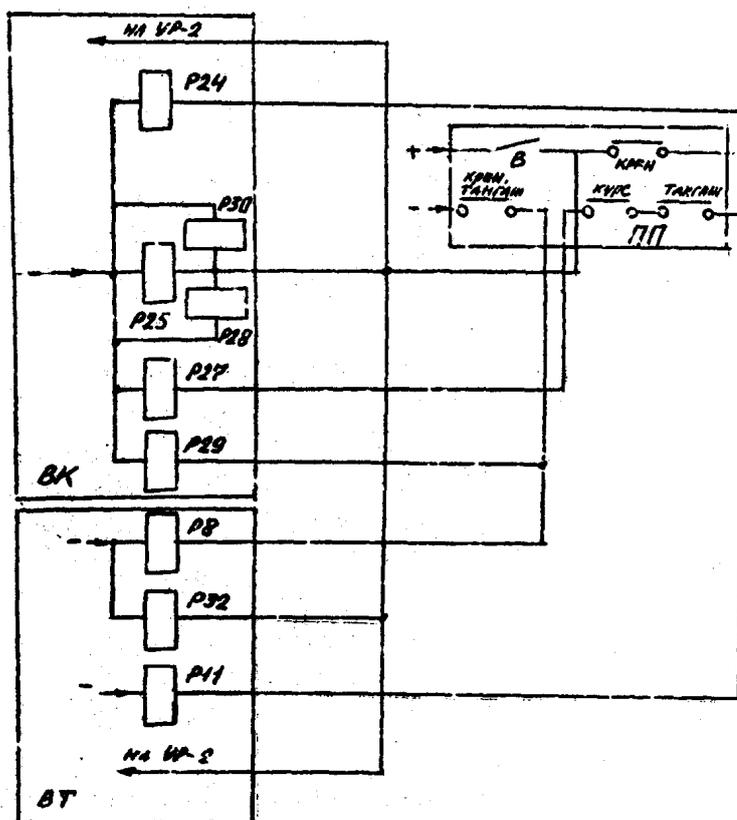


Рис.17. Схема контроля канала тангажа

Проверка работоспособности АП производится при включенном тумбле-

ре "В" на пульте проверки. При этом отключаются блоки контроля каналов крена, курса и тангажа. Сигнал +27В поступает через сопротивление R45 на вход усилителя УР2 канала крена и через сопротивление R47 на вход усилителя УР2 канала тангажа, что исключает срабатывание этих усилителей при последующих проверках. Кроме того, срабатывают реле Р25 вычислителя крена и Р32 вычислителя тангажа, которые своими контактами (рис.4 и рис.6) переключают изодромную обратную связь на жесткую связь. Реле Р30 вычислителя крена отключает обратную связь усилителя сервопривода канала руля направления, то есть отключает автоматическую центровку (рис.5).

При последовательном нажатии кнопок "Крен", "Курс", "Тангаж" на пульте проверки сигнал +27В поступает на реле соответствующего канала: крена - Р24, курса - Р27, тангажа - Р11. Реле, срабатывая, подают в усилительные тракты каналов тест-сигналы (в результате несимметричного нагружения сельсинов), под действием которых рулевые машины крена, тангажа и направления отклоняют соответствующие органы управления (штурвал, колонку и педали). Формирование несимметричных входных сигналов можно видеть на рис. 4 и рис.6. По наличию отклонения и направлению отклонения органов управления судят о работоспособности соответствующего канала АП.

Исправность блоков контроля крена и тангажа проверяется нажатием кнопки "Крен -тангаж" на пульте проверки при выключенном тумблере "В". При этом сигнал +27В поступает на реле Р23 канала крена и реле Р8 канала тангажа. Реле Р23, срабатывая, разрывает цепь сигнала угла крена, а реле Р8 замыкает вход усилителя УП1 канала тангажа, имитируя отказы АП. Замыкание входа усилителя УП1 или разрыв цепи сигнала угла крена вызывают пропадание контрольного сигнала блока контроля на выходе усилительного тракта, в результате чего должен сработать блок контроля. Таким образом, данная проверка показывает, что наличие отказа соответствующего канала АП контролируется блоком контроля.

Контрольные вопросы

- 1) Назначение, основные характеристики и комплектность автопилота.
- 2) Принцип действия автопилота.
- 3) Работа сервопривода.
- 4) Режимы и законы управления в боковом канале.
- 5) Режим автоматической подготовки к включению в боковом канале.
- 6) Режим стабилизации курса.
- 7) Режим управления по крену.
- 8) Режим совмещенного управления.
- 9) Режимы и законы управления в продольном канале.
- 10) Режим автоматической подготовки к включению в продольном канале.
- 11) Режим стабилизации тангажа.
- 12) Режим стабилизации высоты.

- 13) Режим управления по тангажу
- 14) Режим автоматического триммирования
- 15) Контроль автопилота в полете
- 16) Контроль исправности бокового канала.
- 17) Контроль исправности продольного канала
- 18) Наземный контроль автопилота

Литература

1. Воробьев В.Г., Кузнецов С.В. Автоматическое управление полетом. - М.: Транспорт, 1995.
2. Кузнецов С.В. Методические указания по изучению автопилота АП-40. - М.: МИИГА, 1989.
3. Гусев А.А., Демченко А.Г., Кузнецов С.В. Системы автоматического управления полетом. Пособие по выполнению лабораторных работ «Автопилоты». - М.: МГТУ ГА, 2010.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие сведения об автопилоте.....	3
1.1. Назначение, основные характеристики и комплектность автопилота.....	3
1.2. Принцип действия автопилота.....	4
2. Работа автопилота.....	6
2.1. Работа сервопривода.....	6
2.2. Боковой канал автопилота.....	11
2.2.1. Режимы и законы управления в боковом канале.....	11
2.2.2. Режим автоматической подготовки к включению в боковом канале.....	12
2.2.3. Режим стабилизации курса.....	15
2.2.4. Режим управления по крену.....	18
2.2.5. Режим совмещенного управления.....	18
2.3. Продольный канал автопилота.....	19
2.3.1. Режимы и законы управления в продольном канале.....	19
2.3.2. Режим автоматической подготовки к включению в продольном канале.....	20
2.3.3. Режим стабилизации тангажа.....	22
2.3.4. Режим стабилизации высоты.....	24
2.3.5. Режим управления по тангажу.....	25
2.3.6. Режим автоматического триммирования.....	25
3. Контроль автопилота и сигнализация об отказах.....	28
3.1. Контроль автопилота в полете.....	28
3.1.1. Контроль исправности бокового канала.....	28
3.1.2. Контроль исправности продольного канала.....	31
3.2. Наземный контроль автопилота.....	32
Контрольные вопросы.....	33
Литература.....	34