

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УЛУЧШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ

Если самолет обладает неудовлетворительными характеристиками устойчивости и управляемости или эти характеристики существенно меняются по режимам полета, возникает задача их улучшения с помощью соответствующих автоматических средств.

В качестве средств автоматического улучшения устойчивости самолета применяют автоматы устойчивости, среди которых различают автоматы продольной устойчивости и автоматы боковой устойчивости. Их общей особенностью является отклонение руля при возникновении перегрузок относительно соответствующей связанной оси самолета.

Разделение средств автоматического демпфирования и улучшения устойчивости самолета на автоматы демпфирования и устойчивости достаточно условно, так как демпфирование и устойчивость - взаимосвязанные свойства самолета. Кроме того, на современных самолетах автоматы демпфирования и устойчивости комплексуются в единой системе и работают одновременно и согласованно.

Автоматическое улучшение управляемости самолета осуществляется путем отклонения рулей средствами автоматического управления при воздействии пилота на рычаги управления и изменения параметров короткопериодического движения самолета либо изменением кинематики системы управления рулями по режимам полета. Благоприятное влияние автоматики на характеристики управляемости проявляется в улучшении качества и обеспечении стабильности переходных процессов выхода самолета на новый режим полета после целенаправленного воздействия пилота на рычаги управления. При этом сохраняются требуемые характеристики демпфирования и устойчивости.

В качестве средств автоматического улучшения управляемости самолета применяют автоматы управления, автоматы регулирования управления и загрузки, автоматы триммирования.

Среди автоматов управления различают автоматы продольного управления и бокового управления. Их общей особенностью является дополнительное к ручному автоматическое отклонение руля при воздействии пилота на рычаги управления. При наличии на самолете бустерной системы управления автоматическое отклонение руля суммируется с ручным отклонением руля посредством механической проводки. При наличии на самолете электродистанционной системы управления автоматическое отклонение руля суммируется с электродистанционным отклонением. Иногда автомат управления сам представляет собой электродистанционную систему управления и берет на себя все ее функции. На современных самолетах автоматы управления комплексуются с автоматами демпфирования и устойчивости в единой системе и работают одновременно и согласованно.

Среди автоматов регулирования управления различают автоматы регулирования продольного, путевого и поперечного управления. Аналогичным образом классифицируют автоматы регулирования загрузки. Общая особенность этих автоматов - обеспечение постоянства статических характеристик управляемости при изменении режимов полета путем воздействия на кинематику механической проводки управления.

7.1. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УЛУЧШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПО ПЕРЕГРУЗКАМ

Устройство и работа автоматов продольной устойчивости. Автоматы демпфирования не полностью решают проблему улучшения пилотажных свойств самолета, так как компенсируют лишь недостаточное собственное демпфирование самолета. Вследствие действия внешних продольных возмущений, даже при включенном демпфере тангажа, у самолета могут измениться угол атаки и нормальная перегрузка. Поэтому необходимо сохранить исходный режим полета по углу атаки и нормальной перегрузке. Для освобождения пилота от решения этой задачи служат автоматы продольной устойчивости.

Автомат продольной устойчивости (АПУ) - средство автоматического управления, обеспечивающее повышение устойчивости самолета по углу атаки и нормальной перегрузке на всех этапах полета путем отклонения руля высоты при возникновении приращения угла атаки или избыточной нормальной перегрузки.

Простейшие автоматы продольной устойчивости реализуют следующие законы управления рулем высоты:

$$\Delta\delta_B^{APU} = k_\alpha \Delta\alpha, \quad (7.1)$$

$$\Delta\delta_B^{APU} = k_{n_y} \Delta n_y, \quad (7.2)$$

где $\Delta\delta_B^{APU}$ - отклонение руля высоты автоматом продольной устойчивости; $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$ - приращение угла атаки относительно опорного значения, имевшего место в момент включения автомата; $\Delta n_y = n_y - 1$ - избыточная нормальная перегрузка; k_α - передаточный коэффициент по приращению угла атаки, показывающий, на какой угол должен отклониться руль высоты при изменении угла атаки на 1° ; k_{n_y} - передаточный коэффициент по избыточной нормальной перегрузке, показывающий, на какой угол должен отклониться руль высоты при изменении избыточной нормальной перегрузки на единицу.

В связи с недостаточной точностью датчиков угла атаки и необходимостью создания специальных схем для запоминания опорного значения угла атаки закон управления (7.1) большого распространения не получил. Поэтому обычно используется закон управления (7.2), который часто комплексируется с законом управления демпфера тангажа:

$$\Delta\delta_B^{APU} = k_{\omega_z} \Delta\omega_z + k_{n_y} \Delta n_y. \quad (7.3)$$

То есть отклонение руля высоты автоматом продольной устойчивости пропорционально угловой скорости тангажа и избыточной нормальной перегрузке.

Благодаря последовательному включению исполнительного устройства автомата в механическую проводку бустерной или электродистанционной системы управления рулем высоты при совместном управлении самолетом пилотом и автоматом полное отклонение руля высоты от балансировочного положения $\Delta\delta_B$ равно алгебраической сумме

$$\Delta\delta_B = \Delta\delta_B^P + \Delta\delta_B^{APU}.$$

В состав автомата продольной устойчивости (рис.7.1) входят датчик линейного ускорения ДЛУ, датчик угловой скорости ДУС, вычислитель ВАПУ и сервопривод руля высоты СП δ_B . Автомат продольной устойчивости работает следующим образом. При изменении нормальной перегрузки на вход вычислителя В с датчиков ДУС и ДЛУ поступают сигналы u_{ω_z} и u_{n_y} . Сигнал u_{n_y} преобразуется в сигнал $u_{\Delta n_y}$.

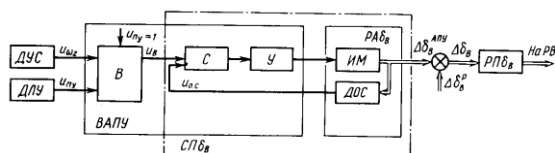


Рис. 7.1. Функциональная схема автомата продольной устойчивости

Эти сигналы суммируются согласно закону управления (7.3). Управляющий сигнал u_{σ_b} вызывает отработку сервоприводом руля высоты. При отклонении руля высоты на угол $\Delta\delta_B^{APU}$ возникает управляющий аэродинамический момент $M_{z\delta_b}$, противоположный по знаку возмущению. Поэтому угловая скорость ω_z и избыточная нормальная перегрузка начнут уменьшаться, а вместе с ними и сигналы u_{ω_z} с ДУС и u_{n_y} с ДЛУ. Когда угловая скорость тангажа станет равной нулю ($\omega_z = 0$), руль высоты все еще будет отклонен автоматом продольной устойчивости благодаря еще имеющемуся сигналу u_{n_y} с ДЛУ (тогда как демпфер тангажа в этот момент возвращал руль высоты в балансировочное положение). Поэтому угловая скорость тангажа ω_z поменяет знак и избыточная перегрузка Δn_y начнет интенсивно уменьшаться. Когда сигналы u_{ω_z} и u_{n_y} уравновесят друг друга, АПУ вернет руль высоты в балансировочное положение. Дальнейшая отработка руля будет вызвана сменой знака суммы сигналов u_{ω_z} и u_{n_y} , что приведет к плавному возвращению самолета к исходной нормальной перегрузке.

Влияние автоматов продольной устойчивости на устойчивость и управляемость. Покажем, что с помощью автомата продольной устойчивости повышается степень продольной статической устойчивости по перегрузке. Влияние демпферной части закона управления (7.3) на характеристики продольной устойчивости и управляемости показано в § 6.1. Рассмотрим влияние составляющей закона управления по избыточной нормальной перегрузке.

При отклонении руля высоты автоматом продольной устойчивости появляется приращение коэффициента момента тангажа

$$\Delta m_z = m_z^{\delta_b} \Delta\delta_B^{APU} = m_z^{\delta_b} k_{n_y} \Delta n_y.$$

С учетом того, что на малых углах атаки $\Delta n_y = k_{n_y}^{\alpha} \Delta\alpha$, где $k_{n_y}^{\alpha}$ - коэффициент пропорциональности, степень продольной статической устойчивости по перегрузке самолета, управляемого АПУ, определится согласно (3.30) следующим образом:

$$\sigma_{\Pi}^{APU} = \left(\frac{dm_{R_z}}{dc_{y_a}} \right)_{V=const} = \sigma_{\Pi} + \frac{k_{n_y} m_z^{\delta_b}}{c_{y_a}} = \sigma_{\Pi} + \Delta\sigma_{\Pi}^{APU}.$$

Так как $m_z^{\delta_b} < 0$, то приращение степени продольной статической устойчивости по перегрузке при использовании автомата продольной устойчивости $\Delta\sigma_{\Pi}^{APU} < 0$. Следовательно, $|\sigma_{\Pi}^{APU}| > |\sigma_{\Pi}|$.

Покажем, что с помощью автомата продольной устойчивости улучшается динамическая устойчивость продольного движения. Как видно из рис. 7.2, характеристики динамической устойчивости самолета с АПУ - период колебаний T_K , и время затухания $t_{зат}^K \sim$ уменьшаются. Автомат продольной устойчивости так же, как и демпфер тангажа, позволяет снизить колебательность продольного короткопериодического движения самолета и уменьшить длительность переходных процессов. Вместе с тем увеличивается частота продольных короткопериодических колебаний V_K .

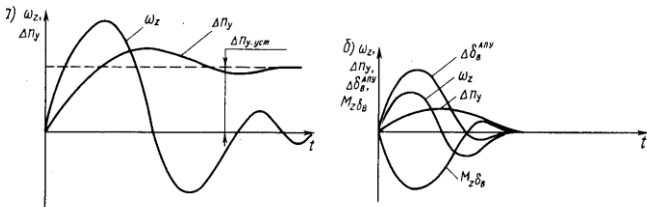


рис. 7.2. Переходные процессы в контуре угловой скорости тангажа и нормальной перегрузки при кратковременном внешнем возмущении:
а - свободный самолет; б - при включенном автомате продольной устойчивости

Величина V_K , зависит от запаса статической устойчивости самолета по перегрузке, который в течение полета меняется в широких пределах. При этом увеличение запаса устойчивости ухудшает демпфирование. Демпферная часть закона управления (7.3) увеличивает коэффициент демпфирования h_K и попутно способствует некоторому увеличению частоты собственных колебаний V_K . Составляющая закона управления по перегрузке также увеличивает частоту V_K . Таким образом, подбором передаточных коэффициентов k_{ω_z} и k_{n_y} удастся снизить запас статической устойчивости по перегрузке, компенсируя смещение фокуса вперед обратной связью по перегрузке.

Другим важным преимуществом автоматов продольной устойчивости является их способность возвращать самолет к исходному режиму полета по нормальной перегрузке. При длительном возмущении появляется статическая ошибка в виде установившегося значения избыточной перегрузки $\Delta n_{y,уст}$. Поэтому АПУ с законами управления (7.2) и (7.3) называют статическими. Для ликвидации статической ошибки применяют более сложные законы управления, например с интегрированием сигнала с датчика ДЛУ.

Основной недостаток автомата продольной устойчивости - уменьшение эффективности управления рулем высоты от колонки штурвала, так как отклонение руля высоты автоматом $\Delta\delta_B^{APU}$ вычитается из отклонения руля высоты пилотом $\Delta\delta_B^p$. Это приводит к уменьшению интенсивности вертикального маневра.

Устройство и работа автоматов боковой устойчивости. Демпферы крена и рыскания не могут противодействовать изменению угла скольжения и боковой перегрузки. Поэтому наряду с задачей демпфирования боковых короткопериодических колебаний возникает задача сохранения исходного режима полета по углу скольжения и боковой перегрузке. Особенно это актуально при развороте, когда пилот воздействует на элероны. Для противодействия возникающему при этом скольжению и связанной с ним боковой перегрузке пилот, наблюдая за указателем угла скольжения, отклоняет руль направления. Разворот при этом становится координированным. Для освобождения пилота от решения этой задачи служат автоматы боковой устойчивости.

Автомат боковой устойчивости (АБУ) - средство автоматического управления, обеспечивающее повышение устойчивости самолета по углу скольжения и боковой перегрузке на всех этапах полета путем отклонения руля направления при возникновении приращения угла скольжения или боковой перегрузки.

Простейшие автоматы боковой устойчивости реализуют следующие законы управления рулем направления:

$$\Delta\delta_n^{ABU} = k_{\beta} \Delta\beta \quad (7.4)$$

$$\Delta\delta_n^{ABU} = -k_{n_z} n_z \quad (7.5)$$

где $\Delta\delta_n^{ABY}$ - отклонение руля направления автоматом боковой устойчивости; $\Delta\beta = \beta - \beta_0$ - приращение угла скольжения относительно опорного значения; k_β, k_{n_z} - передаточные коэффициенты по приращению угла скольжения и боковой перегрузке ($n_{z0} = 0$).

Невысокие точностные характеристики известных датчиков угла скольжения не позволяют широко применять закон управления (7.4). Поскольку углы скольжения обычно малы, то боковая перегрузка практически пропорциональна углу скольжения. Так как измерение боковой перегрузки не вызывает затруднений, закон управления (7.5) распространен более широко.

Обычно автомат боковой устойчивости объединяется с демпфером рыскания и имеет закон управления

$$\Delta\delta_n^{ABY} = k_{\omega_y} \omega_y - k_{n_z} n_z. (7.6)$$

При совместном управлении пилотом и автоматом полное отклонение руля направления от балансировочного положения равно алгебраической сумме

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_n^p + \Delta\delta_n^{ABY}.$$

Функциональная схема автомата боковой устойчивости аналогична схеме АПУ. Отличие заключается в том, что датчик угловой скорости ДУС ориентирован по измерительной оси OY, а датчик линейных ускорений ДЛУ - по измерительной оси OZ. Вычислитель ВАБУ вырабатывает управляющий сигнал u_{σ_n} согласно закону управления (7.6) на основе сигналов u_{ω_y} и u_{n_z} . Автомат содержит сервопривод руля направления СП δ_n .

Работа АБУ аналогична работе АПУ.

Влияние автоматов боковой устойчивости на устойчивость и управляемость. Покажем, что с помощью автомата боковой устойчивости повышается степень путевой статической устойчивости по углу скольжения m_y^β . Демпферная часть закона управления (7.6) обеспечивает увеличение степени путевой статической устойчивости по угловой скорости рыскания $m_y^{\omega_y}$. Рассмотрим влияние составляющей закона управления по боковой перегрузке.

При отклонении руля направления автоматом боковой устойчивости появляется приращение коэффициента момента рыскания

$$\Delta m_y = m_y^{\delta_n} \Delta\delta_n^{ABY} = -m_y^{\delta_n} k_{n_z} \Delta n_z.$$

Известно, что при малых углах скольжения $n_z = -k_{n_z}^\beta \Delta\beta$, где $k_{n_z}^\beta$ - коэффициент пропорциональности. Тогда приращение частной производной коэффициента момента рыскания по углу скольжения

$$\Delta m_y^\beta = m_y^{\delta_n} k_{n_z} k_{n_z}^\beta \Delta\beta.$$

Следовательно, при включенном автомате боковой устойчивости:

$$(m_y^\beta)^{ABY} = m_y^\beta + \Delta m_y^\beta,$$

$$|(m_y^\beta)^{ABY}| > |m_y^\beta|.$$

Анализ влияния автомата боковой устойчивости на динамические характеристики бокового движения аналогичен проведенному анализу для АПУ. Недостатком автомата боковой устойчивости является уменьшение эффективности путевого управления.

Особенности законов управления автоматов продольной и боковой устойчивости. Для обеспечения астатизма управления при длительных внешних возмущениях в закон управления АПУ вводят сигнал, пропорциональный интегралу от избыточной нормальной перегрузки (рис. 7.3):

$$\Delta\delta_B = k_{\omega_z} \frac{T_{\omega_z} p}{T_{\omega_z} p + 1} \omega_z + k_{n_y} \Delta n_y + \frac{k_{f_{n_y}}}{p} \Delta n_y. (7.7)$$

где $k_{f_{n_y}}$ - передаточный коэффициент по интегралу от избыточной нормальной перегрузки.

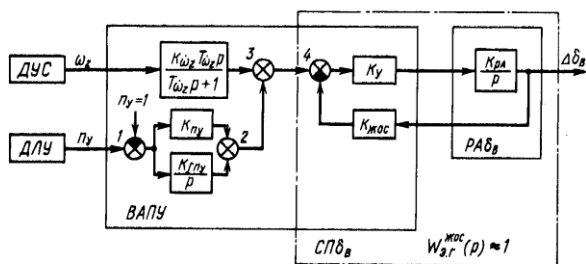


Рис. 7.3. Структурная схема автомата продольной устойчивости

Для ликвидации статической ошибки автоматов боковой устойчивости по углу скольжения при длительных внешних возмущениях применяется интегрирование сигнала с датчика ДЛУ либо использование скоростной обратной связи в сервоприводе автомата:

$$p\Delta\delta_n = k_{\dot{\omega}_y} \dot{\omega}_y - k_{n_z} n_z. (7.8)$$

Тогда в законе управления (7.8) вместо сигнала угловой скорости ω_y следует использовать ее производную $\dot{\omega}_y$ для сохранения демпфирующих свойств автомата (рис. 7.4). Так обеспечивается улучшение путевой устойчивости с помощью систем САУ-62 и САУ-86.

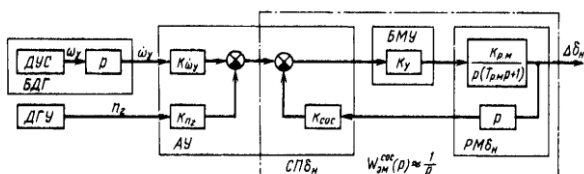


Рис. 7.4. Структурная схема автомата боковой устойчивости

7.2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УЛУЧШЕНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ

7.2.1. Автоматы продольного управления

Устройство и работа. Демпферы тангажа и автоматы продольной устойчивости обладают одним общим недостатком: снижают эффективность продольного управления самолетом от колонки штурвала. Если, к тому же, самолет обладает неудовлетворительными характеристиками продольной управляемости, пилоту приходится компенсировать снижение эффективности продольного управления дополнительным отклонением колонки штурвала и руля высоты. Автоматы продольного управления служат для освобождения пилота от решения этой задачи.

Автоматы продольного управления (АПУ) - средства автоматического управления, обеспечивающие улучшение продольной управляемости самолета на всех этапах и во всех режимах полета путем отклонения руля высоты при воздействии пилота на колонку штурвала.

Простейший автомат продольного управления реализует следующий закон управления рулем высоты:

$$\Delta\delta_B^{АПУ} = k_{x_B} \Delta x_B, (7.9)$$

где $\Delta\delta_B^{АПУ}$ - автоматическое отклонение от балансировочного положения руля высоты автоматом продольного управления; k_{x_B} - передаточный коэффициент по отклонению колонки штурвала, показывающий, на какой угол должен отклониться руль высоты при перемещении пилотом колонки штурвала от балансировочного положения на 1мм; Δx_B - отклонение пилотом колонки штурвала.

Обычно автомат продольного управления объединяется с демпфером тангажа или автоматом продольной устойчивости. Тогда их совместные законы управления имеют следующий вид:

$$\Delta\delta_B^{АПУ} = k_{\omega_z} \Delta\omega_z + k_{x_B} \Delta x_B; (7.10)$$

$$\Delta\delta_B^{АПУ} = k_{\omega_z} \Delta\omega_z + k_{n_y} \Delta n_y + k_{x_B} \Delta x_B. (7.11)$$

Последовательное включение исполнительного устройства автомата в механическую проводку бустерной или электродистанционной системы управления рулем высоты позволяет суммировать отклонения руля высоты пилотом и автоматом.

Рассмотрим функциональную схему аналогового автомата продольного управления, включенного в бустерную систему управления (рис.7.5.). В состав автомата входят датчик угловой скорости тангажа ДУС, датчик линейных ускорений ДЛУ, датчик положения колонки штурвала ДП, вычислитель В и сервопривод руля высоты СП δ_B . Вычислитель и электронная часть сервопривода образуют электронный блок автомата БА в канале руля высоты.

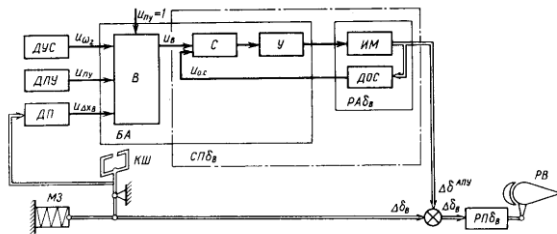


Рис. 7.5. Функциональная схема аналогового автомата продольного управления

Автомат продольного управления работает следующим образом. При отклонении пилотом колонки штурвала КШ датчик ДП вырабатывает электрический сигнал $u_{\Delta x_B}$, пропорциональный Δx_B . Этот сигнал преобразуется в вычислителе В согласно закону управления (7.11) в сигнал u_{σ_B} , который вызывает обработку сервоприводом руля высоты. Полное отклонение руля высоты равно $\Delta\delta_B^P + \Delta\delta_B^{АПУ}$. Отклонение руля высоты вызовет появление управляющего аэродинамического момента $M_{z\delta_B}$, который изменит угловую скорость тангажа ω_z и избыточную нормальную перегрузку Δn_y . Сигналы, пропорциональные этим параметрам u_{ω_z} и $u_{\Delta n_y}$ поступят с датчиков ДУС и ДЛУ на вычислитель, и вызовут уменьшение сигнала u_{σ_B} . Тогда сервопривод вернет шток рулевого агрегата в нейтральное положение. В это время угловая скорость тангажа ω_z и избыточная перегрузка Δn_y примут новые установившиеся значения, пропорциональные отклонению руля высоты пилотом с помощью колонки штурвала. При возвращении пилотом колонки штурвала в балансировочное положение все процессы повторяются в обратном порядке.

Влияние автоматов продольного управления на характеристики управляемости самолета. Автоматы демпфирования и устойчивости обладают одним общим недостатком - снижают эффективность ручного управления самолетом, увеличивая градиенты перемещений $(x_B^{ny})_{ДТ}$ и усилий $(P_B^{ny})_{ДТ}$ на колонке штурвала. Поэтому демпферная составляющая $k_{\omega_z} \Delta\omega_z$ и составляющая перегрузки $k_{n_y} \Delta n_y$ законов управления (7.10)-(7.11) вызывают тот же эффект. Использование сигнала Δx_B в АПУ приводит к увеличению значения коэффициента штурвала в силу того, что

$$\begin{aligned} \Delta\delta_B &= \Delta\delta_B^P + \Delta\delta_B^{АПУ} = k_{ш.в} \Delta x_B + k_{x_B} \Delta x_B + k_{\omega_z} \Delta\omega_z + k_{n_y} \Delta n_y = \\ &= k'_{ш.в} \Delta x_B + k_{\omega_z} \Delta\omega_z + k_{n_y} \Delta n_y, \end{aligned}$$

где $k'_{ш.в} = k_{ш.в} + k_{x_B}$.

Такое увеличение коэффициента штурвала компенсирует уменьшение градиентов перемещения и усилий, так как

$$(x_B^{ny})_{АПУ} = \frac{\delta_B^{ny}}{k'_{ш.в}} < \frac{\delta_B^{ny}}{k_{ш.в}} = (x_B^{ny})_{ДТ},$$

$$(P_B^{ny})_{APU} = \frac{\delta_B^{ny}}{k_{ш.в}} P_B^{x_b} < \frac{\delta_B^{ny}}{k_{ш.в}} P_B^{x_b} = (P_B^{ny})_{ДТ}$$

Таким образом, автомат продольного управления позволяет сохранить статические характеристики продольной управляемости в заданных пределах.

Влияние автомата продольного управления на динамические характеристики видно из рис.7.6. Демпферная часть закона управления автомата обеспечивает уменьшение колебательности короткопериодического движения по угловой скорости тангажа, делая его почти апериодическим. Составляющая закона управления АПУ, пропорциональная отклонению колонки штурвала Δx_B , обеспечивает равенство установившегося значения угловой скорости $(\omega_z)_{уст}$ установившемуся значению угловой скорости без применения автоматике. Тем самым сохраняется эффективность продольного управления.

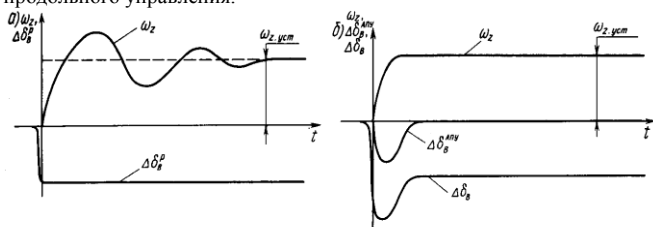


Рис. 7.6. Переходные процессы в контуре угловой скорости тангажа при ступенчатом отклонении руля высоты: а – свободный самолет; б – при включенном автомате продольного управления

Особенности законов управления автоматов продольного управления. В аналоговых автоматах продольного управления получил распространение закон управления

$$\Delta \delta_B^{APU} = k_{\omega_z} \omega_z + k_{x_b} (1 - k'_{x_b}) \Delta x_B \quad (7.12)$$

Передаточный коэффициент по отклонению колонки штурвала k'_{x_b} зависит от ее балансировочного положения следующим образом:

$$k'_{x_b} = \frac{\Delta x_{в.бал.0} + \Delta x_{в.бал}}{(x_B^{ny})_{зад}}$$

где $\Delta x_{в.бал.0}$ - постоянное отклонение колонки штурвала, характерное для данного самолета $\Delta x_{в.бал}$ - отклонение колонки штурвала из нейтрального положения в балансировочное $(x_B^{ny})_{зад}$ - заданный для данного самолета градиент перемещения колонки штурвала на единицу нормальной перегрузки.

Величины $\Delta x_{в.бал.0}$ и $\Delta x_{в.бал}$ являются постоянными и реализуются в вычислителе в виде соответствующих опорных напряжений. Для измерения отклонения колонки штурвала из нейтрального положения в балансировочное устанавливается дополнительный датчик положения ДП. Наиболее просто сигнал, пропорциональный $\Delta x_{в.бал}$, можно получить, измеряя отклонение штока механизма эффекта триммирования МЭТ. Механизм используется пилотом для снятия усилий с колонки штурвала и ее перемещения в балансировочное положение. Тогда в функциональной схеме рис.7.5 появляется еще один датчик ДП с электрическим выходом $u_{\Delta x_{в.бал}}$.

Автомат с законом управления (7.12) позволяет сохранить постоянство статических характеристик продольной управляемости самолета в различных режимах полета. Так обеспечивается улучшение продольной устойчивости и управляемости самолета Ту-154 с помощью системы АБСУ-154-2 (рис.7.7).

Пример 7.1. Рассчитаем характеристики управляемости самолета с автоматом продольного управления, имеющим закон управления (7.12) для исходных данных примеров 3.1, 3.2, и 6.1.

В начале полета $\Delta x_{в.бал} = \Delta \delta_{в.бал} / k_{ш.в} = -90$ мм, где $\Delta \delta_{в.бал} = -8^\circ$, $k'_{x_b} = (\Delta x_{в.бал.0} + \Delta x_{в.бал}) / x_B^{ny}_{зад} = -0,915$, где $\Delta x_{в.бал.0} = -20$ мм, $x_B^{ny}_{зад} = 120$ мм, $(x_B^{ny})_{APU} = (x_B^{ny})_{ДТ} / (1 - k'_{x_b}) = -145$ мм, $(P_B^{ny})_{APU} = (x_B^{ny})_{APU} P_B^{x_b} + P_0 = 214$ Н.

В конце полета $\Delta \delta_{в.бал} = -8^\circ$, $\Delta x_{в.бал} = -20$ мм, $(x_B^{ny})_{APU} = -126$ мм, $(P_B^{ny})_{APU} = 191$ Н.

Таким образом, автомат продольного управления существенно снизил разброс значений характеристик управляемости по режимам полета, сделав их практически постоянными. Так, градиент перемещения колонки штурвала теперь меняется от -145мм в начале полета до -126мм в конце полета, а градиент усилий на колонке штурвала меняется от 214Н в начале полета до 191Н в конце полета, что практически незаметно для пилота.

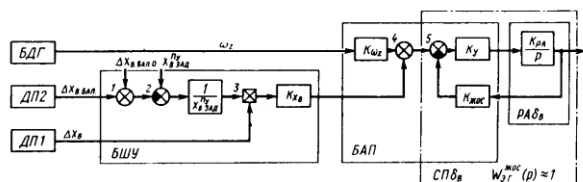


Рис. 7.7. Структурная схема автомата продольного управления

Влияние отказов автомата продольного управления на управление продольным движением. Пассивный отказ автомата продольного управления по сигналу Δx_B приводит к прекращению обработки руля высоты через контур автоматического управления при воздействии пилота на колонку штурвала. Эффективность продольного управления самолетом падает, градиенты перемещений и усилий на колонке штурвала возрастают.

Полный пассивный отказ автомата, комплексированного с демпфером тангажа приводит к снижению эффективности демпфирования продоль-

ных короткопериодических колебаний и возрастанию эффективности продольного управления.

Активный отказ автомата продольного управления аналогичен активному отказу демпфера тангажа и сопровождается отработкой штока рулевого агрегата на максимальный ход, ограниченный концевыми выключателями. Ограничение хода штока рулевого агрегата АПУ сказывается на эффективности продольного управления, особенно при вертикальном маневре, когда часть рабочей зоны отклонения руля высоты расходуется демпферной составляющей автомата.

Цифроаналоговые автоматы продольного управления. Ужесточение требований к характеристикам продольной устойчивости и управляемости самолета и, как следствие, усложнение законов управления АПУ, привели к необходимости реализации автоматов на цифроаналоговой схемотехнике.

В состав автомата входят датчики положения колонки штурвала ДП, угловой скорости тангажа ДУС и нормальной перегрузки ДЛУ, аналоговый блок управления БУ, цифровой вычислительный блок устойчивости и управляемости БВУУ и рулевой агрегат высоты РАδ_в (рис.7.8).

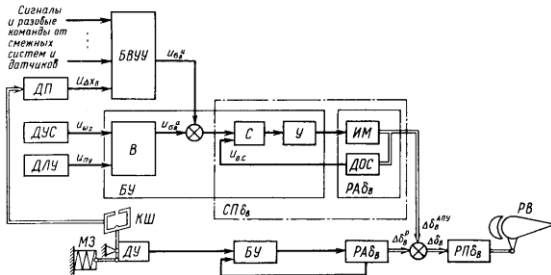


Рис. 7.8. Функциональная схема цифроаналогового автомата продольного управления АСУУ-96

Формирование закона управления осуществляется одновременно в аналоговом вычислителе В блока управления БУ и цифровом вычислителе БВУУ. При этом аналоговый закон управления реализует функции автомата продольной устойчивости по сигналам нормальной перегрузки и угловой скорости тангажа.

Цифровой закон управления выполняет собственно функции АПУ по сигналам отклонения колонки штурвала, а так же сигналам и разовым командам от смежных систем и датчиков. Сигналы с датчиков ДП, ДУС и ДЛУ являются аналоговыми - напряжений постоянного и переменного тока $u_{\Delta x_b}$, u_{ω_z} и $u_{\Delta n_y}$. Часть сигналов со смежных датчиков также имеют аналоговую форму. Ряд сигналов со смежных систем поступает в виде последовательного биполярного кода. Разовые команды подаются в виде напряжения постоянного тока 27 В.

Аналоговые сигналы и разовые команды преобразуются в БВУУ к цифровому виду. Управляющее воздействие формируется в цифровом виде с последующим преобразованием в аналоговый сигнал $u_{\sigma_B^u}$. Этот сигнал подается в блок управления, где суммируется с управляющим сигналом

$u_{\sigma_B^a}$ аналогового контура. Сервопривод АПУ СПδ_в формирует отклонение руля высоты $\Delta\delta_B^{АПУ}$.

В случае отказа цифрового контура продолжает работать аналоговый контур с сохранением основных функций демпфирования колебаний самолета по тангажу и устранения избыточной перегрузки.

Управляющее воздействие АПУ $\Delta\delta_B^{АПУ}$ суммируется с управляющим воздействием ручного контура $\Delta\delta_B^P$ электродистанционной системы управления по усилию на колонке штурвала.

В обобщенном виде закон управления такого АПУ выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta\delta_B^{АПУ} &= \sigma_B^a + \sigma_B^u, \\ \sigma_B^a &= \sigma_B^{\omega_z} + \sigma_B^{\Delta n_y}, \\ \sigma_B^u &= \sigma_B^{\Delta x_b} + \sigma_B^{\Delta\alpha} + \sigma_B^M + \sigma_B^{АНУПС} + \sigma_B^{САД}, \\ \sigma_B^{\omega_z} &= k_{\omega_z} \omega_z, \\ \sigma_B^{\Delta n_y} &= k_{\Delta n_y} \Delta n_y, \\ \sigma_B^{\Delta x_b} &= \frac{k_{x_b}(\varphi)}{T_{x_b} p + 1} \Delta x_b, \\ \sigma_B^{\Delta\alpha} &= F_{зак} k_{\alpha}(\Delta\alpha, M)[\alpha - \alpha_0(M)], \\ \sigma_B^M &= F_{зак} \delta_B(M), \\ \sigma_B^{АНУПС} &= F_{АНУПС} \delta_B^{АНУПС}(\Delta x_b, \Delta n_y, \alpha), \\ \sigma_B^{САД} &= F_{САД} \delta_B^{САД}(\Delta n_y). \end{aligned} \quad (7.13)$$

Составляющая закона управления по угловой скорости тангажа $\sigma_B^{\omega_z}$ обеспечивает демпфирование колебаний самолета по тангажу. Составляющая закона управления по избыточной нормальной перегрузке $\sigma_B^{\Delta n_y}$ улучшает продольную устойчивость самолета.

Составляющая закона управления по отклонению колонки штурвала $\sigma_B^{\Delta x_b}$ улучшает продольную управляемость самолета, причем передаточный коэффициент k_{x_b} корректируется по углу отклонения стабилизатора φ , а сигнал Δx_b пропускается через апериодический фильтр с постоянной времени T_{x_b} .

Составляющая закона управления по приращению угла атаки $\sigma_B^{\Delta\alpha}$ обеспечивает улучшение продольной устойчивости и ограничение угла

атаки при убранных закрылках. Требуемое значение угла атаки α_0 корректируется по числу М. Передаточный коэффициент корректируется по разности $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$ и числу М. Составляющая закона управления по числу М σ_B^M обеспечивает ограничение скорости полета самолета путем дополнительного отклонения руля высоты при изменении числа М при убранных закрылках.

При включении автомата непосредственного управления подъемной силой (АНУПС) формируется составляющая закона управления $\sigma_B^{АНУПС}$, которая корректируется по отклонению колонки штурвала, избыточной перегрузке, приращению угла атаки и управляющему воздействию вычислительной системы управления полетом. Назначение и особенности формирования этой составляющей будут рассмотрены в гл.8.

При включении системы активного демпфирования (САД) формируется составляющая закона управления $\sigma_B^{САД}$, которая корректируется по избыточной нормальной перегрузке. Назначение и особенности формирования этой составляющей будут рассмотрены в главе 8.

Так обеспечивается улучшение устойчивости и управляемости продольного движения с помощью системы АСУУ-96 (рис.7.9).

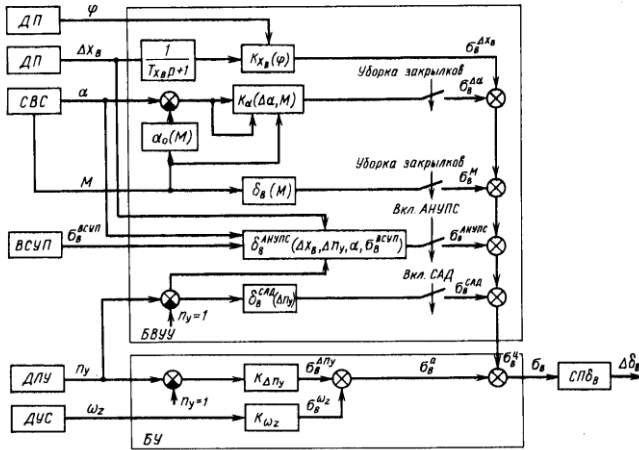


Рис. 7.9. Структурная схема цифроаналогового автомата продольного управления АСУУ-96

Распространен также вариант реализации цифроаналогового АПУ (рис.7.10) без суммирования управляющих воздействий аналогового и цифрового контуров. Отличие этой схемы заключается в том, что основным контуром управления является цифровой. Аналоговый автоматический контур, а также ручной контуры подключаются к сервоприводу электродистанционной системы управления только при отказе цифрового контура. Контроль и коммутация производится в аналоговых блоках управления и контроля БУК.

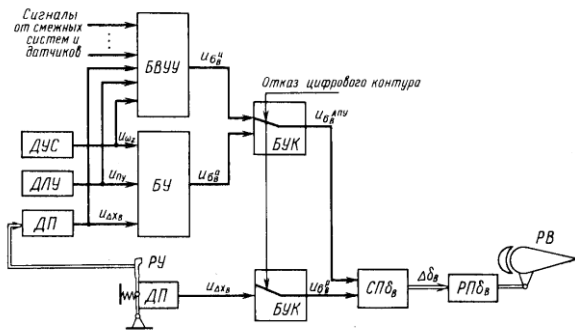


Рис. 7.10. Функциональная схема цифроаналогового автомата продольного управления АСУУ-204

В обобщенном виде закон управления такого АПУ выглядит следующим образом:

$$\Delta\delta_B^{АПУ} = \sigma_B^a \vee \sigma_B^п,$$

$$\sigma_B^a = \sigma_{Ba}^{\omega_z} + \sigma_{Ba}^{\Delta n_y} + \sigma_{Ba}^{\Delta x_B},$$

$$\sigma_B^п = \sigma_{Bп}^{\Delta x_B} + \sigma_{Bп}^{\Delta \alpha} + \sigma_{Bп}^{n_y} + \sigma_{Bп}^{\omega_z} + \sigma_{Bп}^V,$$

$$\sigma_{Ba}^{\omega_z} = k_{\omega_z} \omega_{z\phi},$$

$$\sigma_{Ba}^{\Delta n_y} = k_{\Delta n_y} \Delta n_{y\phi},$$

$$\sigma_{Ba}^{\Delta x_B} = k_{x_B} \Delta x_B,$$

$$\sigma_{Bп}^{\omega_z} = k_{\omega_z} (V_{пр}) \left[\frac{1}{T_{\omega_z, 2} p + 1} \omega_{z\phi} - F_{\omega_z}^y (V_{пр}) \gamma \right],$$

$$\sigma_{Bп}^{\Delta n_y} = \frac{k_{\Delta n_y} (\text{ш.о})}{T_{\phi} p + 1} \left[\frac{1}{T_{\Delta n_y, p} + 1} \Delta n_{y\phi} - F_{n_y}^y \gamma \right],$$

$$\sigma_{\text{ВЦ}}^{\Delta x_B} = k_{x_B} (\varphi, V_{\text{пр}}, \delta_{\text{зак}}) F_{x_{B3}} \{F_{x_{B1}} F_{x_{B2}} (x_{\text{МРЗ}}) + F_{x_{\text{зад}}}^{n_y} [F_{\Delta V} (V_{\text{пр}} - V_{\text{пр}}^{\text{доп}}) + \sigma_{\text{В}}^{\text{БСУП}}]\},$$

$$\sigma_{\text{ВЦ}}^{\Delta \alpha} = \frac{k_{\alpha} (\delta_{\text{зак}})}{T_{\phi} p + 1} [\alpha - \alpha_0 (M, \delta_{\text{зак}})],$$

$$\sigma_{\text{ВЦ}}^{\varphi} = k_{\varphi} [(\varphi - \varphi_{\text{зад}}) + \frac{1}{p} F_{\varphi} (\Delta x_B, \alpha, \omega_Z, n_y)],$$

$$\omega_{z\phi} = \frac{1}{T_{\omega_{z1}} p + 1} \omega_z,$$

$$\Delta n_{y\phi} = \frac{1}{T_{n_y} p + 1} n_y - 1. \quad (7.14)$$

Так обеспечивается улучшение устойчивости и управляемости с помощью системы АСШУ-204 (рис.7.11).

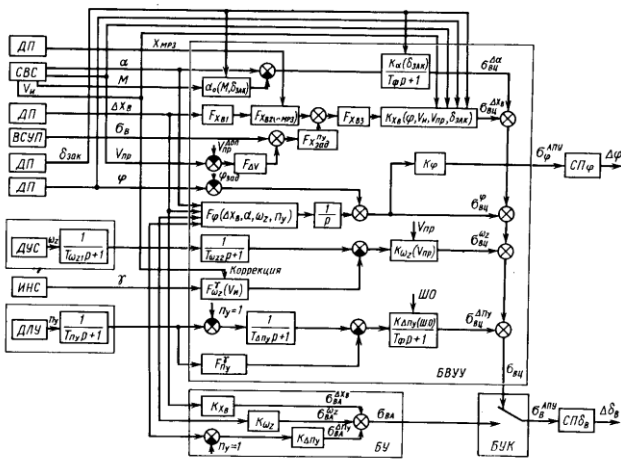


Рис. 7.11. Структурная схема цифроаналогового автомата продольного управления АСШУ-204

7.3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УЛУЧШЕНИЕ БОКОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ

7.3.1. Автоматы бокового управления

Устройство и работа. Демпферы крена и рыскания, автоматы боковой устойчивости снижают эффективность путевого и поперечного управления. Пилоту приходится компенсировать эти недостатки дополнительным воздействием на штурвал и педали. Автоматы бокового управления служат для освобождения пилота от решения этой задачи.

Автоматы бокового управления (АБУ) - средства автоматического управления, обеспечивающие улучшение путевой управляемости самолета на всех этапах и во всех режимах полета путем отклонения руля направления при воздействии пилота на педали или улучшение поперечной управляемости самолета отклонением элеронов при воздействии пилота на штурвал.

Простейшие автоматы бокового управления реализуют следующие законы управления рулем направления и элеронами:

$$\Delta \delta_H^{\text{АБУ}} = k_{x_H} \Delta x_H, \quad (7.34)$$

$$\Delta \delta_3^{\text{АБУ}} = k_{x_3} \Delta x_3, \quad (7.35)$$

где $\Delta \delta_H^{\text{АБУ}}$, $\Delta \delta_3^{\text{АБУ}}$ - автоматические отклонения от балансировочного положения соответственно руля направления и элеронов автоматом бокового управления; k_{x_H} , k_{x_3} - передаточные коэффициенты соответственно по отклонению педалей и штурвала, показывающие на какой угол должны отклоняться руль направления или элероны при перемещении пилотом педалей или штурвала на 1 мм.

Обычно автоматы бокового управления объединяются с демпферами рыскания и крена. Тогда их совместные законы управления имеют следующий вид:

$$\Delta \delta_H^{\text{АБУ}} = k_{\omega_y} \Delta \omega_y + k_{x_H} \Delta x_H, \quad (7.36)$$

$$\Delta \delta_3^{\text{АБУ}} = k_{\omega_x} \Delta \omega_x + k_{x_3} \Delta x_3. \quad (7.37)$$

Последовательное включение исполнительного устройства автомата в механическую проводку бустерной или электродистанционной системы управления рулем направления или элеронов позволяет суммировать отклонения руля пилотом и автоматом.

Рассмотрим функциональную схему простейшего аналогового автомата бокового управления (7.13). В состав аналогового автомата бокового управления входят датчик угловой скорости рыскания ДУС, датчик положения педалей ДП, вычислитель В и сервопривод руля направления СПД_н. Вычислитель и электронная часть сервопривода образуют электронный блок автомата БА в канале руля направления. Принцип работы автомата бокового управления аналогичен принципу работы автомата продольного управления.

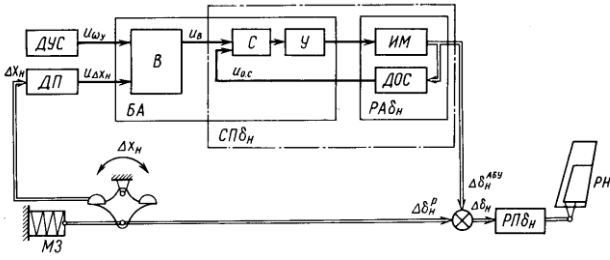


Рис. 7.13. Функциональная схема аналогового автомата бокового управления

Влияние автоматов бокового правления на характеристики управляемости самолета. Демпферные составляющие в законах управления автоматов бокового управления, как это было показано в предыдущей главе, снижают эффективность путевого и поперечного управления, увеличивая градиенты перемещений и усилий на педалях и баранке штурвала. Дополнительное отклонение автоматом руля направления или элеронов при воздействии пилота на педали или штурвал приводит к увеличению коэффициентов штурвала в силу того, что

$$\Delta\delta_H = \Delta\delta_H^P + \Delta\delta_H^{ABY} = k_{ш.н} \Delta x_H + k_{\omega_y} \omega_y + k_{x_H} \Delta x_H = k'_{ш.н} \Delta x_H + k_{\omega_y} \omega_y$$

$$\Delta\delta_3 = \Delta\delta_3^P + \Delta\delta_3^{ABY} = k_{ш.э} \Delta x_3 + k_{\omega_x} \omega_x + k_{x_3} \Delta x_3 = k'_{ш.э} \Delta x_3 + k_{\omega_x} \omega_x$$

где $k'_{ш.н} = k_{ш.н} + k_{x_H}$, $k'_{ш.э} = k_{ш.э} + k_{x_3}$.

Такое увеличение коэффициентов штурвала компенсирует снижение демпферами градиентов перемещений и усилий, так как

$$(x_H^\beta)_{ABY} = \frac{\delta_H^\beta}{k'_{ш.н}} < \frac{\delta_H^\beta}{k_{ш.н}} = (x_H^\beta)_{ДР}$$

$$(P_H^\beta)_{ABY} = \frac{\delta_H^\beta}{k'_{ш.н}} P_H^{x_H} < \frac{\delta_H^\beta}{k_{ш.н}} P_H^{x_H} = (P_H^\beta)_{ДР}$$

$$(x_3^\gamma)_{ABY} = \frac{\delta_3^\gamma}{k'_{ш.э}} < \frac{\delta_3^\gamma}{k_{ш.э}} = (x_3^\gamma)_{ДК}$$

$$(P_3^\gamma)_{ABY} = \frac{\delta_3^\gamma}{k'_{ш.э}} P_3^{x_3} < \frac{\delta_3^\gamma}{k_{ш.э}} P_3^{x_3} = (P_3^\gamma)_{ДК}$$

где $(x_H^\beta)_{ABY}$, $(P_H^\beta)_{ABY}$, $(x_3^\gamma)_{ABY}$, $(P_3^\gamma)_{ABY}$ - характеристики боковой управляемости самолета с включенным автоматом бокового управления; $(x_H^\beta)_{ДР}$, $(P_H^\beta)_{ДР}$, $(x_3^\gamma)_{ДК}$, $(P_3^\gamma)_{ДК}$ - характеристики боковой управляемости самолета с включенными демпферами рыскания и крена.

Таким образом, автомат бокового управления позволяет сохранить статические характеристики боковой управляемости в заданных пределах (рис.7.14).

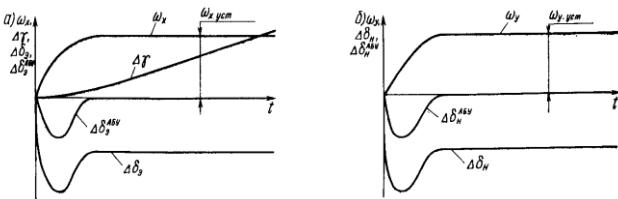


Рис. 7.14. Переходные процессы в контуре угловой скорости крена и угла крена при ступенчатом отклонении элеронов:
а - свободный самолет; б - при включенном автомате бокового управления

Демпферные части законов управления автоматов обеспечивают почти аperiodический характер переходных процессов по угловым скоростям крена и рыскания. Составляющие управляемости законов управления АБУ, пропорциональные отклонению штурвала Δx_3 и педалей Δx_H обеспечивают равенство установившихся значений угловых скоростей $\omega_{x.уст}$ и $\omega_{y.уст}$ значениям этих параметров без применения автоматики. Тем самым сохраняется эффективность поперечного и путевого управления.

Выпуск интерцепторов на полукрыле с отклоненными вверх элеронами увеличивает эффективность поперечного управления, так как создает дополнительный управляющий аэродинамический момент крена $M_{x \delta_{ин}}$. Кроме того, канал управления интерцепторами является резервным при отказе канала управления элеронами и обеспечивает отказоустойчивость поперечного управления.

Цифроаналоговые автоматы бокового управления. Дальнейшее совершенствование АБУ стало возможным с применением цифроаналоговой схемотехники. В состав автомата (рис.7.15) входят датчики положения штурвала ДП, два датчика угловой скорости рыскания и угловой скорости крена ДУС, аналоговый блок управления БУ, цифровой вычислительный блок устойчивости и управляемости БВУУ и сервопривод руля

направления $\text{СП}\delta_H$.

Формирование закона управления осуществляется в аналоговом контуре по сигналам угловых скоростей рыскания и крена (аналоговый демпфер рыскания) и в цифровом контуре по сигналам положения баранки штурвала, а также смежных систем и датчиков. Цифровой управляющий сигнал $\sigma_H^Ц$ приводится к аналоговому виду $u_{\sigma_H^Ц}$ и суммируется в блоке БУ с аналоговым управляющим сигналом $u_{\sigma_H^А}$. Управляющее воздействие $\Delta\delta_H^{АБУ}$ формируется сервоприводом АБУ и суммируется с управляющим воздействием ручного контура $\Delta\delta_H^Р$ электродистанционной системы управления по усилию на педалях.

В обобщенном виде закон управления такого АБУ выглядит следующим образом:

$$\Delta\delta_H^{АБУ} = \sigma_H^a + \sigma_H^Ц, \sigma_H^a = \sigma_H^{\omega_y} + \sigma_H^{\omega_x}, \sigma_H^Ц = \sigma_H^{\Delta x_3}, \sigma_H^{\omega_y} = k_{\omega_y} \frac{T_{\omega_y} p}{T_{\omega_y} p + 1} \omega_y, \sigma_H^{\omega_x} = k_{\omega_x} (\delta_{зак}) \frac{1}{T_{\omega_x} p + 1} \omega_x, (7.38)$$

$$\sigma_H^{\Delta x_3} = k_{x_3} (\delta_{зак}, \sigma_3^{ВСУП}) \frac{1}{T_{x_3} p + 1} \Delta x_3.$$

Составляющая закона управления по угловой скорости рыскания $\sigma_H^{\omega_y}$ обеспечивает демпфирование колебаний самолета по рысканию. Изоморфный фильтр с постоянной времени T_{ω_y} устраняет противодействие АБУ развороту самолета с постоянной угловой скоростью рыскания.

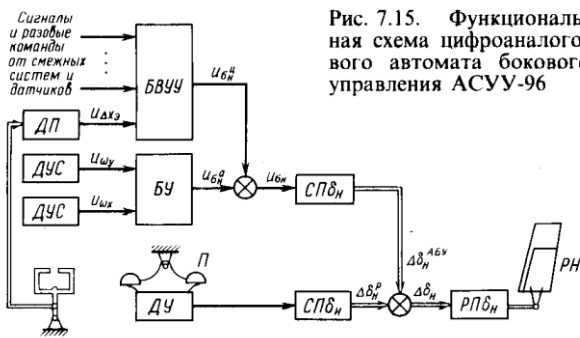


Рис. 7.15. Функциональная схема цифроаналогового автомата бокового управления АСУУ-96

Составляющая закона управления по угловой скорости крена $\sigma_H^{\omega_x}$ обеспечивает демпфирование и улучшение устойчивости самолета по углу скольжения. Апероидический фильтр с постоянной времени T_{ω_x} служит для фильтрации помех, содержащихся в сигнале с ДУС. При выпуске закрылков увеличивается передаточный коэффициент k_{ω_x} .

Составляющая закона управления по отклонению штурвала $\sigma_H^{\Delta x_3}$ обеспечивает требуемые характеристики боковой управляемости. Апероидический фильтр с постоянной времени T_{x_3} служит для фильтрации помех, содержащихся в сигнале с ДП. Передаточный коэффициент k_{x_3} корректируется при выпуске закрылков и при работе вычислительной системы управления полетом ВСУП в режиме совмещенного управления (рис. 7.16). Так обеспечивается улучшение устойчивости и управляемости бокового движения самолета Ил-96 с помощью системы АСУУ-96.

В цифроаналоговом АБУ, включенном в электродистанционные системы управления элеронов и интерцепторов (рис. 7.17) реализуется логика раздельного формирования управляющих сигналов в аналоговом и цифровом контурах. Основным контуром управления является цифровой. При его отказе происходит автоматическое переключение на аналоговый автоматический контур управления элеронами и отключение управления интерцепторами.

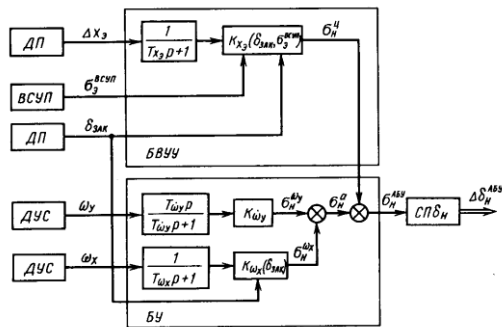


Рис. 7.16. Структурная схема цифроаналогового автомата бокового управления АСУУ-96

