

УДК 531.396

АЛГОРИМ ИМИТАЦИИ ПОЛЕТА НА ДИНАМИЧЕСКОМ СТЕНДЕ ОПОРНОГО ТИПА

АЛЕКСАНДРОВ В. В., ДЫЛЕВСКИЙ И. В., ЗИМЕНКОВ В. Д.,
ТИХАНИНА И. Г., ЧУГУНОВ О. Д.

Дается постановка задачи динамической имитации полета для оператора, находящегося в кабине пилотажно-динамического стенда. Предлагается композиционный способ решения этой задачи для случая стенда опорного типа. Дается описание алгоритма, реализующего этот способ.

1. В [1] поставлена задача имитации кажущегося ускорения и предложен композиционный способ ее решения на динамическом стенде. В [2] рассматривается более общая задача имитации полета, которую можно сформулировать следующим образом.

Имеются две управляемые системы: пилотируемый летательный аппарат (ЛА) и пилотажно-динамический стенд (ПДС) с подвижной платформой и установленной на ней кабиной пилота. Пусть $Mxyz$ — система координат, связанная с летательным аппаратом [2], и N — точка, совпадающая с одной из точек головы пилота, неподвижная относительно этой системы, $\rho(N) = \rho$ — матрица-столбец координат этой точки в системе $Mxyz$. На стенде определены: система координат $M_c x_c y_c z_c$ [1], связанная с платформой, и точка N_c , такая, что $\rho(N_c) = \rho$, где $\rho(N_c)$ — матрица-столбец координат точки N_c в системе $M_c x_c y_c z_c$. Требуется так построить движение платформы стенда, чтобы проекции векторов кажущегося ускорения точки N_c , угловой скорости и углового ускорения трехгранника $M_c x_c y_c z_c$ на его оси отличались бы от проекций векторов кажущегося ускорения точки N , угловой скорости и углового ускорения трехгранника $Mxyz$ на его оси не более чем на μ, ν, ε . Положительные величины μ, ν, ε — это пороги чувствительности восприятия пилотом поступательного и углового движений аппарата, определяемые экспериментально в рабочей обстановке [3]. Наличие ограничений на перемещения платформы ПДС не позволяет в ряде случаев полностью решать сформулированную задачу. Поэтому имитация определенного этапа полета для того или иного класса летательного аппарата существенным образом зависит от кинематической схемы стенда.

Рассмотрим решение задачи имитации полета на ПДС опорного типа с шестью степенями свободы. Соответственно кинематической схеме такого стенда платформа совершает ограниченные перемещения благодаря изменению длин шести электрогидравлических цилиндров, соединенных с платформой и фундаментом при помощи шаровых шарниров [2]. Для построения имитирующих движений платформы применим композиционный способ [1]. Ограничимся при этом имитацией таких полетов тяжелого летательного аппарата (ТЛА), каждый из которых можно рассматривать как композицию двух движений [4]: движения квазиустановившегося [5] по отношению к текущей перегрузке центра масс ТЛА n и абсолютной угловой скорости ω , а также относительного движения, малого по угловым переменным χ . Угловую скорость ω и кажущееся уско-

рение $a(N)$ такого полета в проекциях на связанные оси можно представить в виде [4, 1]:

$$\omega = \omega^\circ + X\omega^\circ + A(\chi) d\chi/dt \quad (1.1)$$

$$a(N) = a(M^\circ) + [Xa(M^\circ) + A(\chi)w(\chi) + A(\chi)w(M)] \quad (1.2)$$

Здесь ω° , $a(M^\circ)$ — матрицы-столбцы проекций векторов угловой скорости квазистационарного трехгранника $M^\circ x^\circ y^\circ z^\circ$ и кажущегося ускорения начала этого трехгранника на его оси. Трехгранник $Mxyz$ совпадает с трехгранником $M^\circ x^\circ y^\circ z^\circ$ при квазиустановившемся движении ТЛА, получается из него поворотом на малые углы χ_i ($i=1, 2, 3$) и сдвигом на вектор $\overline{M^\circ M}$ при наличии относительного движения (квазиустановившееся движение ТЛА можно описать, например, при помощи вырожденной системы дифференциальных уравнений, получаемой из уравнений движения ТЛА [4]), $A(\chi)$ — матрица направляющих косинусов между осями $x^\circ y^\circ z^\circ$ и xyz , X — кососимметрическая матрица, соответствующая вектору малого поворота χ , $w(\chi)$ — матрица-столбец проекций на оси $x^\circ y^\circ z^\circ$ составляющей вектора ускорения точки N , возникающей при наличии относительного углового движения, $w(M)$ — матрица-столбец проекций на оси $x^\circ y^\circ z^\circ$ составляющей вектора ускорения точки N , имеющей место, например, при наличии относительного движения точки M [1].

Как известно [6], полукружные каналы вестибулярной системы человека, являющиеся основными датчиками углового движения, не реагируют на изменение угловой скорости ω° квазиустановившегося полета ТЛА, поэтому из всех составляющих в разложении (1.1) надо имитировать только третью составляющую, описывающую малые колебания ТЛА относительно трехгранника $M^\circ x^\circ y^\circ z^\circ$.

Первое слагаемое в разложении (1.2) $a(M^\circ)$ также является медленно меняющейся вектор-функцией, так как определяется угловой скоростью ω° и текущей перегрузкой n° квазиустановившегося движения [1]:

$$a(M^\circ) = |g^\circ| n^\circ + Ld\omega^\circ/dt + (l^* \omega^\circ) \omega^\circ - |\omega^\circ|^2 l \quad (1.3)$$

Здесь g° — гравитационное ускорение, l — матрица-столбец координат точки M в системе $Oxyz$ с началом в центре масс ТЛА (звездочка означает транспонирование), L — кососимметрическая матрица, соответствующая вектору l . Так как максимальные поступательные перемещения платформы ПДС рассматриваемого типа не более 1–3 м, то ограничимся имитацией только ориентации вектора $a(M^\circ)$.

Таким образом, решение задачи имитации полета в данном случае сводится к решению трех задач: задачи имитации ориентации квазиустановившейся перегрузки (1.3); задачи имитации относительных угловых колебаний, т. е. имитации χ , $d\chi/dt$, $d^2\chi/dt^2$ и, следовательно, имитации $A(\chi)$ и $w(\chi)$; задачи имитации линейного ускорения $w(M)$.

Для описания имитирующих движений платформы введем дополнительные системы координат: $\Phi \xi \eta \zeta$ — система координат, связанная с фундаментом; $M_c^\circ x_c^\circ y_c^\circ z_c^\circ$ — квазистатическая система координат. Движение платформы будем строить как композицию двух движений: движения трехгранника $M_c^\circ x_c^\circ y_c^\circ z_c^\circ$ и движения платформы относительно этого трехгранника. Положение точки M_c° задается координатами ξ° , η° , ζ° , положение трехгранника $M_c^\circ x_c^\circ y_c^\circ z_c^\circ$ определяется двумя углами ϕ_c° и γ_c° :

$$M_c^\circ \xi \eta \zeta \begin{matrix} \phi_c^\circ \gamma_c^\circ \\ \xi x_c^\circ \end{matrix} \rightarrow M_c^\circ x_c^\circ y_c^\circ z_c^\circ$$

положение точки M_c в системе $M_c^\circ x_c^\circ y_c^\circ z_c^\circ$ — координатами x_c , y_c , z_c и положение трехгранника $M_c x_c y_c z_c$ относительно $M_c^\circ x_c^\circ y_c^\circ z_c^\circ$ — углами χ_{1c} , χ_{2c} , χ_{3c} . Композиция движения квазистатического трехгранника и относительного движения платформы описывается координатами ξ , η , ζ точки M_c и угловыми координатами ϕ , γ , ψ трехгранника $M_c x_c y_c z_c$.

Угловое движение квазистатического трехгранника будем строить таким образом, чтобы ориентация вектора $(-g)$, где g — вектор ускорения силы тяжести, относительно этого трехгранника как можно меньше отличалась бы от ориентации вектора $a(M^\circ)$ относительно трехгранника $M^\circ x^\circ y^\circ z^\circ$. При этом угловое движение должно удовлетворять геометриче-

ским ограничениям и значения угловой скорости и углового ускорения не должны превышать порогов чувствительности ν и ε . Угловые колебания платформы относительно квазистатического трехгранника должны воспроизводить χ , $d\chi/dt$, $d^2\chi/dt^2$ с учетом геометрических ограничений. Относительное движение точки M_c будем строить так, чтобы воспроизводить приращения ускорения $w(M)$ с учетом ограничений на поступательные перемещения платформы.

2. Будем считать, что в момент t_k известна информация об имитирующем движении и прогноз имитируемого движения на момент t_{k+1} ; область возможных положений платформы ПДС является прямым произведением множеств прямоугольника медленных поворотов $\{|\vartheta_c^\circ| \leq \vartheta^+; |\gamma_c^\circ| \leq \gamma^+\}$, куба относительных углов колебаний $\{|\chi_{ic}| \leq \chi^+\}$ с центром в точке $(\vartheta^\circ, \gamma^\circ)$ и прямоугольного параллелепипеда относительных движений точки $M_c \{ |x_c| \leq x^+; |y_c| \leq y^+; |z_c| \leq z^+ \}$ с центром в точке M_c° . Рассмотрим построение имитирующих движений на отрезке $[t_k; t_{k+1}]$.

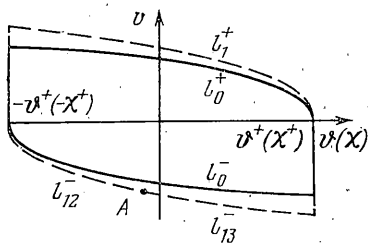
Пусть ориентация вектора $a(M^\circ)$ задана двумя углами $\vartheta^\circ(t)$, $\gamma^\circ(t)$. Так как ограничения на ϑ_c° и γ_c° независимы, то рассмотрим лишь построение $\vartheta_c^\circ(t)$. В момент t_k известны $\vartheta_c^\circ(t_k)$, $\gamma_c^\circ(t_k)$ и $\vartheta^\circ(t_{k+1})$, $\gamma^\circ(t_{k+1})$. Требуется выбрать угловое ускорение $d^2\vartheta_c^\circ/dt^2$, $t \in [t_k; t_{k+1}]$, не превышающее порога чувствительности ε , такое, чтобы угловая скорость не превышала порога чувствительности ν и была бы решена одна из двух задач: задача отслеживания $\{[\vartheta^\circ(t_{k+1}) - \vartheta_c^\circ(t_{k+1})]^2\} \rightarrow \min$, если имитирующая (при $t=t_k$) и имитируемая (при $t=t_{k+1}$) точки находятся в одной полуплоскости, определяемой неравенством $d\vartheta_c^\circ(t_k)/dt \cdot d\vartheta^\circ(t_{k+1})/dt \geq 0$ и имитируемая точка находится впереди имитирующей ($|\vartheta_c^\circ(t_k)| \leq |\vartheta^\circ(t_{k+1})|$) или задача наибыстрейшего прихода на отрезок покоя $\{d\vartheta^\circ/dt=0; |\vartheta^\circ| \leq \vartheta^+\}$ в противном случае.

Решение этих задач выписывается в явном виде в классе кусочно-постоянных ускорений. Имитирующая точка при этом не выходит за ограничения $|\vartheta_c^\circ(t)| \leq \vartheta^+$ и в моменты t_k при любом натуральном k находится в области, ограниченной кривыми

$$l_0^+ = \{v = \sqrt{2\varepsilon^\circ(\vartheta^+ - \vartheta)}; |\vartheta| \leq \vartheta^+\}$$

$$l_0^- = \{v = -\sqrt{2\varepsilon^\circ(\vartheta^+ + \vartheta)}; |\vartheta| \leq \vartheta^+\}$$

где $v = d\vartheta/dt$ и ε° выбрано из условия $\varepsilon^\circ = \min\{\varepsilon; \nu^2/4\vartheta^+\}$ (фиг. 1). Из любой точки этой области можно попасть на отрезок покоя, не превышая порогов чувствительности ν и ε . Назовем эту область областью управляемости. Таким образом, построение имитирующего медленного углового движения заключается в решении задачи отслеживания в области управляемости или в приходе из любой точки этой области на отрезок покоя.



Фиг. 1

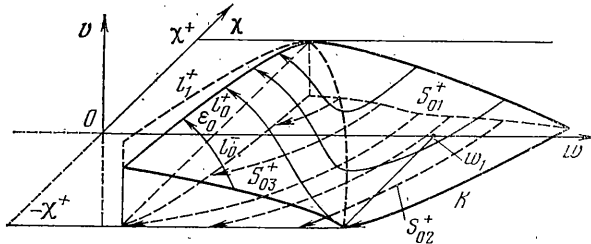
Рассмотрим теперь построение угловых колебаний χ_i платформы относительно квазистатического трехгранника (в дальнейшем индекс i опустим). В связи с тем, что надо воспроизводить положение, скорость и ускорение, введем трехмерное пространство

$$\{\chi, v, w\}, \text{ где } v = d\chi/dt, \quad w = d^2\chi/dt^2.$$

Ограничение $|\chi| \leq \chi^+$ выделяет в этом пространстве полосу, где может находиться имитирующая точка. В этой полосе имеется отрезок покоя $\{v=0; w=0; |\chi| \leq \chi^+\}$ и криволинейный цилиндр W_0 длины $2\varepsilon^\circ$, поперечное сечение которого с границами l_0^+ , l_0^- , $\pm\chi^+$ показано на фиг. 1. При движении имитирующей точки в этом цилиндре не нарушаются пороги

чувствительности ν и ε . Если имитирующая точка в момент t_k и имитируемая точка в момент t_{k+1} находятся внутри цилиндра W_0 , то задача построения угловых колебаний решается аналогично задаче построения медленных угловых поворотов, так как нет необходимости в воспроизведении углового ускорения.

Если имитируемая точка в момент t_{k+1} или имитирующая в момент t_k находятся вне цилиндра W_0 , то для построения движения имитирующей точки в полосе $\{|\chi| \leq \chi^+\}$ будем выбирать производную или скачок [7] ускорения $u = dw/dt$, решая либо задачу прихода на отрезок покоя из области управляемости (см. п. 3), либо задачу отслеживания в этой области. Здесь $u(t)$ — произвольная кусочно-непрерывная функция при реше-



Фиг. 2

нии задачи отслеживания и ограниченная кусочно-непрерывная функция ($|u| \leq \delta$) при решении задачи прихода на отрезок покоя.

3. Рассмотрим решение задачи прихода на отрезок покоя или, более точно, на плоскую границу цилиндра W_0 , так как дальнейшее построение движения точки в цилиндре W_0 происходит в соответствии с п. 2. Обозначим через U множество точек полосы $\{|\chi| \leq \chi^+\}$, из которых возможен приход на плоскую границу W_0 без нарушения условия $|\chi| \leq \chi^+$ и ограничений $|u| \leq \delta$ при $|w| > \varepsilon^0$ ($w(t)$ может меняться скачком при $|w| \leq \varepsilon^0$). Решение задачи прихода заключается в построении области U и определении движения внутри этой области. Построение области U и описание выбора движения на отрезок покоя будем проводить параллельно.

Опишем сначала множество точек полосы, из которых возможен приход на плоскую границу цилиндра W_0 при постоянном $u \in [-\delta, \delta]$ без нарушения ограничений $|\chi| \leq \chi^+$. Это множество состоит из двух симметричных областей V_{01}^+ и V_{01}^- : $\{\chi, v, w\} \in V_{01}^+$ при $w > \varepsilon^0$, $\{\chi, v, w\} \in V_{01}^-$ при $w < -\varepsilon^0$. Область V_{01}^+ ограничена кусками поверхностей S_{01}^+ , S_{02}^+ , S_{03}^+ и плоскостей $\{\chi = \chi^+\}$, $\{w = \varepsilon^0\}$, $\{\chi = -\chi^+\}$ (фиг. 2). Поверхность S_{01}^+ образована траекториями $u(t) = -\delta$, проходящими через точки линии l_0^+ (фиг. 1):

$$v = -w^2/2\delta + (\sqrt{2\varepsilon^0(\chi^+ - \chi)} + (\varepsilon^0)^2/2\delta)$$

$$\chi = \frac{w^3}{6\delta^2} - \left(\sqrt{2\varepsilon^0(\chi^+ - \chi)} + \frac{(\varepsilon^0)^2}{2\delta} \right) \frac{w}{\delta} +$$

$$+ \left(\psi + \frac{(\varepsilon^0)^3}{3\delta^2} + \frac{\varepsilon^0}{\delta} \sqrt{2\varepsilon^0(\chi^+ - \chi)} \right)$$

где параметр $\psi \in [-\chi^+, \chi^+]$.

Обозначим через K траекторию, лежащую на S_{01}^+ и касающуюся прямой $\{\chi = -\chi^+, v = 0\}$ (фиг. 2):

$$v = -w^2/2\delta + w_1^2/2\delta$$

$$\chi = w^3/6\delta^2 - ww_1^2/2\delta^2 - \chi^+ + w_1^3/3\delta^2$$

где w_1 — корень уравнения

$$w^4/8\delta^2\varepsilon^0 + w^3/3\delta^2 - 3\varepsilon^0 w^2/4\delta^2 - 7(\varepsilon^0)^3/24\delta^2 - 2\chi^+ = 0$$

удовлетворяющий условию $w_1 > \varepsilon^\circ$. Исследуя поведение левой части уравнения и ее производных, можно показать, что искомый корень существует и единственный.

Поверхность S_{02}^+ образована траекториями $u(t) = -\delta$, проходящими через точки отрезка $\{\chi = -\chi^+, v = 0, \varepsilon^\circ \leq w_0 \leq w_1\}$:

$$v = -w^2/2\delta + w_0^2/2\delta, \quad \chi = w^3/6\delta^2 - ww_0^2/2\delta^2 - \chi^2 + w_0^3/3\delta^2$$

Множество общих точек поверхностей S_{01}^+ и S_{02}^+ есть часть траектории K , соответствующая $v \leq 0, w \geq w_1$. Поверхность S_{03}^+ образована траекториями $u(t) = -\delta$, проходящими через точки линии l_0^- :

$$v = -w^2/2\delta + [(\varepsilon^\circ)^2/2\delta - \sqrt{2\varepsilon^\circ(\chi^+ + \chi_0)}]$$

$$\chi = \frac{w^3}{6\delta^2} - \left[\frac{(\varepsilon^\circ)^2}{2\delta} - \sqrt{2\varepsilon^\circ(\chi^+ + \chi_0)} \right] \frac{w}{\delta} + \chi_0 +$$

$$+ \frac{(\varepsilon^\circ)^3}{3\delta^2} - \frac{\varepsilon^\circ}{\delta} \sqrt{2\varepsilon^\circ(\chi^+ + \chi_0)}$$

где параметр $\chi_0 \in [-\chi^+, \chi^+]$. Множество общих точек поверхностей S_{02}^+ и S_{03}^+ есть траектория, проходящая через точку $\{\chi = -\chi^+, v = 0, w = \varepsilon^\circ\}$:

$$v = -w^2/2\delta + (\varepsilon^\circ)^2/2\delta, \quad \chi = w^3/6\delta^2 - w(\varepsilon^\circ)^2/2\delta^2 - \chi^+ + (\varepsilon^\circ)^3/3\delta^2$$

Область V_{01}^- симметрична области V_{01}^+ относительно начала координат.

Для расширения области управляемости $U_0 = W_0 \cup V_{01}^+ \cup V_{01}^-$ рассмотрим множества точек V_1^+ и V_1^- , аналогичные множествам V_{01}^+ и V_{01}^- и обладающие таким свойством, при котором из любой точки этих множеств можно попасть на плоскую границу цилиндра W_0 , не выходя из полосы $\{|\chi| \leq \chi^+\}$, а скачок ускорения при этом имеет не более одного переключения. Расширение области V_{01}^+ происходит снизу: вместо поверхностей S_{02}^+, S_{03}^+ строятся поверхности S_{12}^+, S_{13}^+ , лежащие ниже S_{02}^+ и S_{03}^+ . Поверхность S_{12}^+ образована траекториями $u(t) = \delta$, проходящими через точки отрезка $\{\chi = -\chi^+, v = 0, \varepsilon^\circ \leq w \leq w_1\}$, поверхность S_{13}^+ — траекториями $u(t) = \delta$, проходящими через точки траектории K для $w \geq w_1$. Линия l_{12}^- пересечения поверхности S_{12}^+ с плоскостью $w = \varepsilon^\circ$ имеет вид

$$\chi = v/\delta + [(\varepsilon^\circ)^2/3\delta - 2v/3] \sqrt{(\varepsilon^\circ)^2 - 2\delta v} - \chi^+ - (\varepsilon^\circ)^3/3\delta^2$$

и расположена ниже линии l_0^- (фиг. 1). Линия l_{13}^- пересечения поверхности S_{13}^+ с плоскостью $w = \varepsilon^\circ$ также расположена ниже линии l_0^- . Пересечение линий l_{12}^- и l_{13}^- (точка A) находится на траектории, лежащей на S_{12}^+ и проходящей через точку $\{\chi = -\chi^+, v = 0, w = w_1\}$. Обозначим через W_1 криволинейный цилиндр, являющийся расширением W_0 , так как его образующие проходят через линию l_1^- , составленную из кусков l_{12}^- и l_{13}^- и расположенную ниже линии l_0^- и через линию l_1^+ , симметричную l_1^- относительно начала координат (фиг. 1). Таким образом, область $U_0 \subset U_1 = W_1 \cup V_1^+ \cup V_1^-$, где V_1^- — область, симметричная V_1^+ относительно начала координат. При этом, если точка находится в цилиндре W_1 , но вне W_0 , то сначала она переводится на плоскость $\{w = \varepsilon^\circ\}$ (при $v < 0$) или $\{w = -\varepsilon^\circ\}$ (при $v > 0$), и в дальнейшем происходит движение в области V_1^+ или V_1^- соответственно, в результате которого точка оказывается на плоской границе цилиндра W_0 . Опшем построение движения точки в области V_1^+ (для V_1^- построение проводится аналогично). Определим поверхность переключения S_n^+ , состоящую из двух частей S_{n1}^+ и S_{n2}^+ , причем S_{n1}^+ образована траекториями $u(t) = -\delta$, проходящими через точки отрезка $\{|\chi_0| \leq \chi^+, v = 0, w = \varepsilon^\circ\}$:

$$v = -w^2/2\delta + (\varepsilon^\circ)^2/2\delta, \quad \chi = w^3/6\delta^2 - w(\varepsilon^\circ)^2/2\delta - \chi_0 + (\varepsilon^\circ)^3/3\delta^2$$

и S_{n2}^+ образована траекториями $u(t) \equiv -\delta$, проходящими через точки луча $\{\chi = \chi^+, v = 0, w_0 \geq \varepsilon^0\}$:

$$v = -w^2/2\delta + w_0^2/2\delta, \quad \chi = w^3/6\delta^2 - ww_0/2\delta^2 - \chi^+ + w_0^3/3\delta^2$$

Из этого определения следует, что построенная ранее поверхность S_{02}^+ является частью S_{n2}^+ .

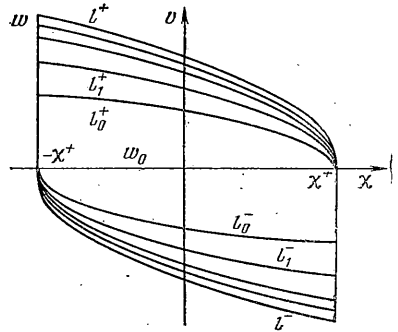
Уравнения, определяющие траекторию, общую для поверхностей S_{n1}^+ и S_{n2}^+ , проходящую через точку $\{\chi = -\chi^+, v = 0, w = \varepsilon^0\}$, имеют вид

$$v = -w^2/2\delta + (\varepsilon^0)^2/2\delta, \quad \chi = w^3/6\delta^2 - w(\varepsilon^0)^2 - \chi^+ + (\varepsilon^0)^3/3\delta^2$$

Пусть точка $(\chi, v, w) \in V_1^+$ лежит не ниже поверхности S_n^+ , тогда движение с $u(t) \equiv -\delta$ приводит ее на плоскую границу цилиндра W_0 (при $w = \varepsilon^0 - v > 0$). Если точка (χ, v, w) лежит ниже S_n^+ , то $u(t) \equiv \delta$ до момента попадания на S_n^+ , а затем $u(t) \equiv -\delta$, в результате чего точка опять же оказывается на плоской границе W_0 при $v \geq 0$.

Аналогично тому, как строятся области V_1^+ и V_1^- , можно построить области V_2^+ и V_2^- . Это построение заключается в следующем. Прежде всего, проведя через линии $l_1^+(w = \varepsilon^0)$ и $l_1^-(w = -\varepsilon^0)$ поверхности, аналогичные S_{01}^+ и S_{01}^- , можно получить области V_{02}^+ и V_{02}^- . При этом V_{02}^+ — область, расширенная сверху относительно V_1^+ , а V_{02}^- — снизу относительно V_1^- . Области V_{02}^+ и V_{02}^- аналогичны V_{01}^+ и V_{01}^- в том смысле, что из любой точки расширения можно попасть на плоскую границу W_1 без переключения знака $u(t)$. Достроив V_{02}^+ и V_{02}^- снизу и сверху соответственно, так же как V_{01}^+ и V_{01}^- , можно получить области V_2^+ и V_2^- , обладающие свойством, при котором из любой точки этих областей можно прийти на плоскую границу криволинейного цилиндра W_1 с кусочно-постоянным $u(t)$, имеющим не более одного переключения. При этом $V_1^+ \subset V_2^+$, $V_1^- \subset V_2^-$. В результате получаем область $U_2 = W_2 \cup V_2^+ \cup V_2^-$, где $U_0 \subset U_1 \subset U_2$, W_2 — криволинейный цилиндр, $W_0 \subset W_1 \subset W_2$.

Рассмотрим точки области U_2 , лежащие вне U_1 . Пусть точка (χ, v, w) лежит в области V_2^+ , но вне V_1^+ . Аналогично описанному выше, если эта точка лежит не ниже поверхности S_n^+ , то движение с $u(t) \equiv -\delta$ приводит ее на плоскую границу цилиндра W_1 , но не W_0 (при этом $v > 0$ при $w = \varepsilon^0$). Если точка (χ, v, w) лежит ниже, то $u(t) \equiv \delta$ до момента попадания на S_n^+ , а затем $u(t) \equiv -\delta$ до момента попадания с $v > 0$ на плоскую границу цилиндра W_1 . Траектории описанных движений лежат в области V_2^+ , но вне V_1^+ и приводят точку на плоскую границу цилиндра W_1 , а следовательно, в область U_1 . Точки цилиндра W_2 (лежащие вне W_1) переводятся сначала на одну из плоскостей $w = \pm \varepsilon^0$, а затем строятся траектории движения в одной из областей V_2^+ или V_2^- , приводящие точку на одну из плоских границ цилиндра W_1 .



Фиг. 3.

Аналогично (для любого целого m) может быть построена область $U_m = W_m \cup V_m^+ \cup V_m^-$, состоящая из криволинейного цилиндра W_m и подобластей V_m^+ и V_m^- . Из каждой точки этих подобластей, лежащей в V_{m-1}^+ и V_{m-1}^- , можно попасть на плоскую границу цилиндра W_{m-1} (а следовательно, и в область U_{m-1}) с кусочно-постоянным скачком ускорения, имеющим не более одного переключения.

Можно показать, что существует предел $\lim U_m = U$ при $m \rightarrow \infty$, где область U , определенная выше, есть множество точек, из которых при ограничениях $|\chi| \leq \chi^+$; $|u| \leq \delta$ (при $|w| \geq \varepsilon^0$) возможен приход в цилиндр W_0 , а следовательно, и на отрезок покоя. Область U есть объединение цилиндра W и областей $V^+(w > \varepsilon^0)$ и $V^-(w < -\varepsilon^0)$. Динамика расширения плоских границ цилиндров W_m представлена на фиг. 3.

4. При решении задачи отслеживания имитирующая точка на отрезке $[t_k, t_{k+1}]$ не должна выходить из полосы $|\chi| \leq \chi^+$ и в моменты t_k, t_{k+1} должна находиться в области управляемости U_m , чтобы при необходимости для $t > t_{k+1}$ она могла быть переведена на отрезок покоя с ограниченным скачком ускорения $u(t)$ ($|u| \leq \delta$) без нарушения $|\chi| \leq \chi^+$. Алгоритм построения имитирующего движения заключается в следующем (рассматривается только случай $v_c(t_k) > 0, v(t_{k+1}) \geq 0$, все остальные случаи аналогичны приведенному).

По известным значениям координаты, скорости и ускорения имитируемого движения определяется отслеживаемая в момент t_{k+1} точка (χ_c, v_c, w_c) : если $(\chi_{k+1}, v_{k+1}, w_{k+1}) \in U_m$, то $\chi_c = \chi_{k+1}, v_c = v_{k+1}, w_c = w_{k+1}$; если $(\chi_{k+1}, v_{k+1}, w_{k+1}) \notin U_m$ и $|\chi_{k+1}| \geq \chi^+$, то $\chi_c = \pm \chi^+, v_c = 0, w_c = 0$; если $(\chi_{k+1}, v_{k+1}, w_{k+1}) \in U_m$ и $|\chi_{k+1}| < \chi^+$, то в качестве точки отслеживания (χ_c, v_c, w_c) выберем граничную точку сечения U_m плоскостью $\chi = \chi_{k+1}$, ближайшую к точке $(\chi_{k+1}, v_{k+1}, w_{k+1})$. Затем в зависимости от взаимного расположения точек $(\chi_c(t_k), v_c(t_k), w_c(t_k))$ и (χ_c, v_c, w_c) выбирается один из трех режимов имитирующего движения на отрезке $[t_k, t_{k+1}]$.

Режим отслеживания. Пусть $\chi_c > \chi_c(t_k)$. Из равенств $\chi_c(t_{k+1}) = \chi_c, v_c(t_{k+1}) = v_c, w_c(t_{k+1}) = w_c$ находится кусочно-постоянная производная ускорения $u(t)$, имеющая два переключения. Если при этом скорость $v_c(t)$ не меняет знак на интервале (t_k, t_{k+1}) , то реализуется этот режим. Если движение с найденной $u(t)$ приводит к смене знака скорости, то реализуется иной режим отслеживания.

Режим отслеживания с выходом на отрезок покоя. Имитирующая точка осуществляет выход в момент $(t_k + \tau_1)$ на отрезок покоя в точку $((\chi_c(t_k) + \chi_c)/2, 0, 0)$. Это достигается при помощи $u(t)$ с одним переключением (без ограничения на $|u(t)|$). Затем имитирующая точка стоит на отрезке покоя от момента $t_k + \tau_1$ до момента $t_k + \tau_1 + \tau_2$ и за время $\tau_3 = t_{k+1} - t_k - \tau_1 - \tau_2$ движется до попадания в точку (χ_c, v_c, w_c) с одним переключением по $u(t)$. Можно показать существование и единственность этого режима при условии смены знака скорости в предыдущем режиме.

Режим выхода на отрезок покоя. Пусть $\chi_c \leq \chi_c(t_k)$. В соответствии с п. 3 строится движение, приводящее имитирующую точку на отрезок покоя.

Построение имитирующего относительного движения точки M_c в параллелепипеде $\{|x_c| \leq x^+, |y_c| \leq y^+, |z_c| \leq z^+\}$ с центром в точке M_c^0 также является либо решением задачи отслеживания в области управляемости U_m , либо решением задачи мягкой остановки [8]. Так как при этом отслеживается только приращение линейного ускорения $w(M)$ и нет необходимости в отслеживании относительного положения точки M , то после прихода имитирующей точки на плоскую границу цилиндра W_0 она приводится не на отрезок покоя, а в начало координат.

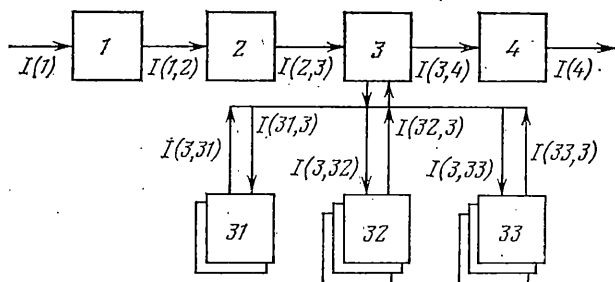
5. Рассмотрим схему работы цифровой системы управления пилотажно-динамического стенда (ЦСУ ПДС), составной частью которой являются алгоритмы построения имитирующих движений. Цифровая система управления работает в реальном масштабе времени. В момент времени t_{k-1} она получает информацию о движении летательного аппарата и выдает управление на силовые органы стенда для организации движения платформы в течение времени $[t_{k-1}, t_k]$. Это движение платформы было определено на предыдущем интервале времени $[t_{k-2}, t_{k-1}]$ при помощи описанных в пп. 2, 3, 4 алгоритмов. Далее следует построение имитирующего движения на интервале времени $[t_k, t_{k+1}]$ и формирование управления ПДС, которые должны быть закончены к моменту времени t_k , когда начинается очередной такт работы ЦСУ.

Блок-схема ЦСУ ПДС представлена на фиг. 4, где стрелками обозначены потоки передаваемой информации, прямоугольниками — функциональные блоки ЦСУ. Во входной блок 1 поступает информация $I(1)$ о движении аппарата в момент времени t_{k-1} и информация о действиях пилота (сигналы ручного управления). В этом блоке производится декомпозиция движения на квазиустановившееся и относительное. Выходная информация блока 1 $I(1.2)$ включает матрицы-столбцы $a(M^0), \chi, d\chi/dt, d^2\chi/dt^2, w(M)$ и информация о действиях пилота.

В блоке прогноза 2 запоминается информация $I(1.2; t_{k-1})$ и по информации

$I(1.2; t_{k-3}), I(1.2; t_{k-2}), I(1.2; t_{k-1})$ производится прогноз на моменты времени t_k и t_{k+1} . Эта информация (вместе с информацией о действиях пилота) $I(2.3)$ передается блоку 3.

Блок 3 является диспетчером. По информации о действиях пилота он производит распределение области возможных перемещений платформы между алгоритмами с отдачей предпочтения тем алгоритмам, работа которых наиболее нужна в прогнозируемом движении. Область возможных перемещений платформы определяется заданием ограничений на длины электрогидравлических цилиндров $l_{i \min} \leq l_i \leq l_{i \max}$. На подготовительном этапе производится декомпозиция этой области, т. е.



Фиг. 4

в нее вписывается подобласть, являющаяся прямым произведением множеств: прямоугольника медленных поворотов, куба относительных угловых колебаний и прямоугольного параллелепипеда относительного движения (см. п. 2).

Входной информацией $I(3.31)$ для блоков 31 являются углы ϕ° и γ° , а также их производные, которые вычисляются в диспетчере при помощи интерполяционного многочлена. В блоке 31 строится медленное угловое движение квазистатического трехгранника. Выходной информацией блока 3 являются значения углов ϕ_c° и γ_c° .

После этого диспетчер вычисляет координаты $\xi^\circ, \eta^\circ, \zeta^\circ$ начала квазистатической системы координат $M_c^\circ x_c^\circ y_c^\circ z_c^\circ$ в системе $\Phi\xi\eta\zeta$, которые являются функциями углов $\phi_c^\circ, \gamma_c^\circ$. Эти функции определяются и для них строятся аппроксимирующие функции на подготовительном этапе после декомпозиции области возможных перемещений платформы.

Входной информацией $I(3.32)$ для блока 32 являются матрицы-столбцы $\chi, d\chi/dt, d^2\chi/dt^2$. В блоке 32 производится имитация быстрых угловых колебаний на интервале времени $[t_k, t_{k+1}]$ и диспетчеру в выходной информации возвращается матрица-столбец $\chi_c(t_{k+1})$.

Входной информацией $I(3.33)$ для блока 33 служит матрица-столбец $w(M)$. В блоке 33 производится построение быстрых линейных перемещений на интервале времени $[t_k, t_{k+1}]$ и диспетчеру в выходной информации $I(33.3)$ возвращается матрица-столбец координат точки M_c в системе координат $M_c^\circ x_c^\circ y_c^\circ z_c^\circ$ в момент времени t_{k+1} .

Информацию $I(3.4)$ о значении координат имитирующего движения $\phi_c^\circ, \gamma_c^\circ, \xi^\circ, \eta^\circ, \zeta^\circ, x_c, y_c, z_c, \chi_{1c}, \chi_{2c}, \chi_{3c}$ в момент времени t_{k+1} диспетчер передает выходному блоку 4. В блоке по положению платформы ПДС в момент времени t_{k+1} определяются длины электрогидравлических цилиндров $l_i(t_{k+1})$, которые являются выходной информацией $I(4)$ блока 4. Эта информация в начале следующего такта поступает на систему управления цилиндрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В. В. Об имитации кажущегося ускорения. — Докл. АН СССР, 1981, т. 256, № 2, с. 314—317.
2. Бюшгенс Г. С., Студнев Р. В. Аэродинамика самолета. Динамика продольного и бокового движения. М.: Машиностроение, 1979. 352 с.
3. Бардин К. В. Проблема порогов чувствительности и психофизические методы. М.: Наука, 1976. 395 с.
4. Борзов В. И. Задача о разделении движений в динамике полета. — Изв. АН СССР. МТТ, 1981, № 5, с. 3—12.
5. Остославский И. В., Стражева И. В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1969. 499 с.
6. Хилов К. Л. Функция органов равновесия и болезнь передвижения. М.: Медицина, 1969. 277 с.
7. Кононенко Т. И. К теории ускорений высших порядков: Сб. научн.-методич. ст., 1976, вып. 7, с. 44—47.
8. Тиханина И. Г. Задача о мягкой остановке имитатора ускорения. — Некоторые вопросы математики и механики: Сб. статей./Под ред. А. Н. Колмогорова. М.: Изд-во МГУ, 1981, с. 85—86.

Москва

Поступила в редакцию
14.VII.1982