УДК 629.7.018.74

Д.А. Бетин

Определение погрешностей вычислений моментов инерции свободнолетающей модели самолета в третьем приближении

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

При проектировании свободнолетающей динамически подобной модели (СДПМ) определение моментов инерции (как и стартовой массы) проходит ряд последовательных приближений. Важнейшим критерием в этих работах является точность получаемых результатов, а мерой точности - погрешность вычислений моментов инерции.

В работах [1, 2] получены зависимости для определения предельной и практически вероятной погрешностей вычислений осевых моментов инерции СДПМ в первом и втором приближениях на этапах обликового и эскизного проектирования.

Целью же данной работы является получение зависимостей для определения предельных и практически вероятных погрешностей вычислений осевых и центробежных моментов инерции СДПМ в третьем приближении на этапе рабочего проектирования.

Согласно [3] зависимости, определяющие осевые и центробежные моменты инерции СДПМ в третьем приближении, имеют следующий вид (далее индексом “III” будем обозначать третье приближение расчетов):

$$I_{jM}^{III} = I_{jM}^{cIII} + I_{jM}^{пIII} \tag{1}$$

$$(j = x,\ y,\ z,\ xy,\ xz,\ yz),$$

где I_{jM}^{cIII} - собственные осевые и центробежные моменты инерции СДПМ относительно осей связанной системы координат $OXYZ$ с началом координат в требуемом положении центра масс (ЦМ) СДПМ; $I_{jM}^{пIII}$ - переносные осевые и центробежные моменты инерции СДПМ относительно осей системы координат $OXYZ$.

Собственные осевые и центробежные моменты инерции СДПМ в третьем приближении

$$I_{jM}^{cIII} = I_{jM1}^{cIII} + I_{jM2}^{cIII}, \tag{2}$$

где I_{jM1}^{cIII} - суммарные собственные осевые и центробежные моменты инерции элементов СДПМ, которые можно определить расчетным путем (к таким элементам относят силовую и несиловую конструкцию (обшивку, каркас, механизм ввода парашютов, арматуру всех видов комплектующих), воздушные и гидравлические магистрали, электрические сети, технические жидкости и газы, топливо); I_{jM2}^{cIII} - суммарные собственные осевые и центробежные моменты инерции комплектующих СДПМ, численные значения которых известны или их определяют в результате эксперимента (к ним относят готовые изделия всех видов оборудования и силовой установки, парашютные системы в сборе, центровочные и доводочные грузы).

Для i-го конечного элемента конструкции СДПМ в виде однородного прямоугольного параллелепипеда формулы, определяющие собственные осевые моменты инерции относительно главных центральных осей $O_i X_i$, $O_i Y_i$, $O_i Z_i$ ($O_i X_i // OX$, $O_i Y_i // OY$, $O_i Z_i // OZ$), имеют следующий вид [4]:

$$I_x^c(m_i) = \frac{m_i}{12}\left(L_{yi}^2 + L_{zi}^2\right); \tag{3}$$

$$I_y^c(m_i) = \frac{m_i}{12}\left(L_{xi}^2 + L_{zi}^2\right); \tag{4}$$

$$I_z^c(m_i) = \frac{m_i}{12}\left(L_{xi}^2 + L_{yi}^2\right), \tag{5}$$

где m_i - масса i-го конечного элемента; L_{xi}, L_{yi}, L_{zi} - длины ребер i-го конечного элемента ($L_{xi} // O_i X_i$, $L_{yi} // O_i Y_i$, $L_{zi} // O_i Z_i$).

Так как оси $O_i X_i$, $O_i Y_i$, $O_i Z_i$ являются осями симметрии такого конечного элемента, то центробежные моменты инерции относительно этих осей равны нулю, т.е. $I_{xy}^c(m_i) = I_{xz}^c(m_i) = I_{yz}^c(m_i) = 0$.

Выполнив аналогичные расчеты для остальных элементов СДПМ, по соответствующим формулам можно найти значения их собственных осевых и центробежных моментов инерции.

Согласно [4], переносные осевые и центробежные моменты инерции СДПМ в третьем приближении можно определить суммированием по формулам

$$I_{xм}^{пIII} = \sum_{i=1}^{f} m_i\left(y_i^2 + z_i^2\right); \tag{6}$$

$$I_{yм}^{пIII} = \sum_{i=1}^{f} m_i\left(x_i^2 + z_i^2\right); \tag{7}$$

$$I_{zм}^{пIII} = \sum_{i=1}^{f} m_i\left(x_i^2 + y_i^2\right); \tag{8}$$

$$I_{xyм}^{пIII} = \sum_{i=1}^{f} m_i x_i y_i; \tag{9}$$

$$I_{xzм}^{пIII} = \sum_{i=1}^{f} m_i x_i z_i; \tag{10}$$

$$I_{yzм}^{пIII} = \sum_{i=1}^{f} m_i y_i z_i \,, \tag{11}$$

где f - общее количество конечных элементов (на которые условно “разбита” СДПМ) и ее комплектующих; x_i, y_i, z_i - координаты ЦМ i-го конечного элемента или ЦМ комплектующего относительно осей системы координат $OXYZ$.

В данных формулах в качестве m_i может выступать масса как i-го конечного элемента, так и одного из комплектующих.

Для получения зависимостей, определяющих предельные и практически вероятные абсолютные и относительные погрешности вычислений $I_{xм}^{III}$, $I_{yм}^{III}$, $I_{zм}^{III}$, $I_{xyм}^{III}$, $I_{xzм}^{III}$, $I_{yzм}^{III}$, воспользуемся известными в теории погрешностей формулами, в частности приведенными в работе [5]. Символом δ будем обозначать предельную относительную погрешность вычислений, символом $\delta_{п.в}$ - практически вероятную относительную погрешность вычислений, символом Δ - предельную абсолютную погрешность вычислений, а символом $\Delta_{п.в}$ - практически вероятную абсолютную погрешность вычислений.

Для последующих рассуждений используем понятие частной абсолютной погрешности. Частная абсолютная погрешность величины U, вызванная неточностью только аргумента x_i, описывается формулой [5]

$$\Delta U_{xi} = \frac{\partial U}{\partial x_i} \Delta x_i \,, \tag{12}$$

где $\left(\partial U / \partial x_i\right)$ - частная производная величины U по переменной x_i; Δx_i - предельная абсолютная погрешность вычислений величины x_i.

В рассматриваемой задаче предельную абсолютную погрешность вычислений осевых моментов инерции в третьем приближении будем рассматривать как сумму частных абсолютных погрешностей вычислений, а именно:

$$\begin{gathered} \Delta I_{jм}^{III} = \left|\Delta I_{jм}^{III}\left(I_{jм}^{cIII}\right)\right| + \left|\Delta I_{jм}^{III}\left(I_{jм}^{пIII}\right)\right| = \\ = \left|\Delta I_{jм}^{III}\left(I_{jм1}^{cIII}\right)\right| + \left|\Delta I_{jм}^{III}\left(I_{jм2}^{cIII}\right)\right| + \left|\Delta I_{jм}^{III}\left(I_{jм}^{пIII}\right)\right| . \end{gathered} \tag{13}$$

В этих зависимостях приведены частные абсолютные погрешности $I_{jм}^{III}$, вызванные неточностью указанных в скобках аргументов.

Слагаемые зависимости (13) имеют ряд элементов, которые непосредственно влияют на точность определения осевых моментов инерции. Поэтому, согласно (3) - (11) предельные абсолютные погрешности

$$\Delta I_{jм}^{III} = \left|\Delta I_{jм1}^{cIII}(m_i)\right| + \left|\Delta I_{jм1}^{cIII}(L_{xi})\right| + \left|\Delta I_{jм1}^{cIII}(L_{yi})\right| +$$
$$\left|\Delta I_{jм1}^{cIII}(L_{zi})\right| + \left|\Delta I_{jм}^{cIII}\left(I_{jм2}^{cIII}\right)\right| + \left|\Delta I_{jм}^{пIII}(m_i)\right| + \left|\Delta I_{jм}^{пIII}(x_i)\right| + \tag{14}$$
$$+ \left|\Delta I_{jм}^{пIII}(y_i)\right| + \left|\Delta I_{jм}^{пIII}(z_i)\right| .$$

В данной зависимости приведены частные абсолютные погрешности $I_{jм}^{III}$, вызванные неточностью указанных в скобках аргументов.

Частная абсолютная погрешность $I_{jм}^{III}$, вызванная неточностью аргумента $I_{jм2}^{cIII}$, может быть представлена в виде

$$\Delta I_{jм}^{III}\left(I_{jм2}^{cIII}\right) = \delta I_{эj} \sum_{i=1}^{f} I_{jм2}^{cIII}(i), \tag{15}$$

где $\delta I_{эj}$ - предельная относительная погрешность экспериментального определения осевых моментов инерции, которая зависит от метода определения, а также от применяемого приборного и технологического оборудования (редко может достигать значений меньше 2,5% [5]).

Используя формулу (12), нетрудно получить зависимости для определения частных абсолютных погрешностей вычислений величин, указанных выше.

Так, для определения частных абсолютных погрешностей собственных осевых моментов инерции всех элементов силовой и несиловой конструкции, могут быть использованы следующие формулы:

$$\Delta I_{xм1}^{cIII}(m_i) = \frac{\partial I_{xм1}^{cIII}}{\partial m_i}\Delta m_i = \sum_{i=1}^{f} \frac{\left(L_{yi}^2 + L_{zi}^2\right)}{12}\Delta m_i; \tag{16}$$

$$\Delta I_{xм1}^{cIII}(L_{yi}) = \frac{\partial I_{xм1}^{cIII}}{\partial L_{yi}}\Delta L_{yi} = \sum_{i=1}^{f} \frac{m_i L_{yi}}{6}\Delta L_{yi}; \tag{17}$$

$$\Delta I_{xм1}^{cIII}(L_{zi}) = \frac{\partial I_{xм1}^{cIII}}{\partial L_{zi}}\Delta L_{zi} = \sum_{i=1}^{f} \frac{m_i L_{zi}}{6}\Delta L_{zi}; \tag{18}$$

$$\Delta I_{yм1}^{cIII}(m_i) = \frac{\partial I_{yм1}^{cIII}}{\partial m_i}\Delta m_i = \sum_{i=1}^{f} \frac{\left(L_{xi}^2 + L_{zi}^2\right)}{12}\Delta m_i; \tag{19}$$

$$\Delta I_{yм1}^{cIII}(L_{xi}) = \frac{\partial I_{yм1}^{cIII}}{\partial L_{xi}}\Delta L_{xi} = \sum_{i=1}^{f} \frac{m_i L_{xi}}{6}\Delta L_{xi}; \tag{20}$$

$$\Delta I_{ум1}^{cIII}(L_{zi}) = \frac{\partial I_{ум1}^{cIII}}{\partial L_{zi}} \Delta L_{zi} = \sum_{i=1}^{f} \frac{m_i L_{zi}}{6} \Delta L_{zi}; \tag{21}$$

$$\Delta I_{zм1}^{cIII}(m_i) = \frac{\partial I_{zм1}^{cIII}}{\partial m_i} \Delta m_i = \sum_{i=1}^{f} \frac{\left(L_{xi}^2 + L_{yi}^2\right)}{12} \Delta m_i; \tag{22}$$

$$\Delta I_{zм1}^{cIII}(L_{xi}) = \frac{\partial I_{zм1}^{cIII}}{\partial L_{xi}} \Delta L_{xi} = \sum_{i=1}^{f} \frac{m_i L_{xi}}{6} \Delta L_{xi}; \tag{23}$$

$$\Delta I_{zм1}^{cIII}(L_{yi}) = \frac{\partial I_{zм1}^{cIII}}{\partial L_{yi}} \Delta L_{yi} = \sum_{i=1}^{f} \frac{m_i L_{yi}}{6} \Delta L_{yi}, \tag{24}$$

а для определения частных абсолютных погрешностей собственных моментов инерции остальных элементов СДПМ следует использовать аналогичные формулы, характерные для конкретной формы элементов.

Частные абсолютные погрешности собственных центробежных моментов инерции для принятого конечного элемента, а также для любого из комплектующих, имеющих симметричную форму, равны нулю, т.е.

$$\Delta I_{jм}^{III}\left(I_{jм}^{cIII}\right) = 0. \tag{25}$$

Данное утверждение вытекает из следующих рассуждений. Собственный центробежный момент инерции элемента зависит от массы и габаритных размеров. Считая, что масса по элементу распределена равномерно, а габаритные размеры обеспечивают симметрию, то изменение массы или габаритных размеров элемента не приведут к изменению собственного центробежного момента инерции, т.е. его нулевого значения. А это значит, что частные абсолютные погрешности определения собственных центробежных моментов инерции равны нулю.

Используя формулы (6) - (12), можно получить частные абсолютные погрешности переносных осевых и центробежных моментов инерции СДПМ:

$$\Delta I_{xм}^{пIII}(m_i) = \frac{\partial I_{xм}^{пIII}}{\partial m_i} \Delta m_i = \sum_{i=1}^{f} \left(y_i^2 + z_i^2\right) \Delta m_i; \tag{26}$$

$$\Delta I_{xм}^{пIII}(y_i) = \frac{\partial I_{xм}^{пIII}}{\partial y_i} \Delta y_i = \sum_{i=1}^{f} 2 y_i m_i \Delta y_i; \tag{27}$$

$$\Delta I_{xм}^{пIII}(z_i) = \frac{\partial I_{xм}^{пIII}}{\partial z_i} \Delta z_i = \sum_{i=1}^{f} 2 z_i m_i \Delta z_i; \tag{28}$$

$$\Delta I_{yм}^{пIII}(m_i) = \frac{\partial I_{yм}^{пIII}}{\partial m_i}\Delta m_i = \sum_{i=1}^{f}\left(x_i^2 + z_i^2\right)\Delta m_i; \tag{29}$$

$$\Delta I_{yм}^{пIII}(x_i) = \frac{\partial I_{yм}^{пIII}}{\partial x_i}\Delta x_i = \sum_{i=1}^{f} 2x_i m_i \Delta x_i; \tag{30}$$

$$\Delta I_{yм}^{пIII}(z_i) = \frac{\partial I_{yм}^{пIII}}{\partial z_i}\Delta z_i = \sum_{i=1}^{f} 2z_i m_i \Delta z_i; \tag{31}$$

$$\Delta I_{zм}^{пIII}(m_i) = \frac{\partial I_{zм}^{пIII}}{\partial m_i}\Delta m_i = \sum_{i=1}^{f}\left(x_i^2 + y_i^2\right)\Delta m_i; \tag{32}$$

$$\Delta I_{zм}^{пIII}(x_i) = \frac{\partial I_{zм}^{пIII}}{\partial x_i}\Delta x_i = \sum_{i=1}^{f} 2x_i m_i \Delta x_i; \tag{33}$$

$$\Delta I_{zм}^{пIII}(z_i) = \frac{\partial I_{zм}^{пIII}}{\partial y_i}\Delta y_i = \sum_{i=1}^{f} 2y_i m_i \Delta y_i; \tag{34}$$

$$\Delta I_{xyм}^{пIII}(m_i) = \frac{\partial I_{xyм}^{пIII}}{\partial m_i}\Delta m_i = \sum_{i=1}^{f} x_i y_i \Delta m_i; \tag{35}$$

$$\Delta I_{xyм}^{пIII}(x_i) = \frac{\partial I_{xyм}^{пIII}}{\partial x_i}\Delta x_i = \sum_{i=1}^{f} m_i y_i \Delta x_i; \tag{36}$$

$$\Delta I_{xyм}^{пIII}(y_i) = \frac{\partial I_{xyм}^{пIII}}{\partial y_i}\Delta y_i = \sum_{i=1}^{f} m_i x_i \Delta y_i; \tag{37}$$

$$\Delta I_{xzм}^{пIII}(m_i) = \frac{\partial I_{xzм}^{пIII}}{\partial m_i}\Delta m_i = \sum_{i=1}^{f} x_i z_i \Delta m_i; \tag{38}$$

$$\Delta I_{xzм}^{пIII}(x_i) = \frac{\partial I_{xzм}^{пIII}}{\partial x_i}\Delta x_i = \sum_{i=1}^{f} m_i z_i \Delta x_i; \tag{39}$$

$$\Delta I_{xzм}^{пIII}(z_i) = \frac{\partial I_{xzм}^{пIII}}{\partial x_i}\Delta z_i = \sum_{i=1}^{f} m_i x_i \Delta z_i; \tag{40}$$

$$\Delta I_{yzм}^{nIII}(m_i) = \frac{\partial I_{yzм}^{nIII}}{\partial m_i}\Delta m_i = \sum_{i=1}^{f} y_i z_i \Delta m_i ; \tag{41}$$

$$\Delta I_{yzм}^{nIII}(y_i) = \frac{\partial I_{yzм}^{nIII}}{\partial x_i}\Delta y_i = \sum_{i=1}^{f} m_i z_i \Delta y_i ; \tag{42}$$

$$\Delta I_{yzм}^{nIII}(z_i) = \frac{\partial I_{yzм}^{nIII}}{\partial x_i}\Delta z_i = \sum_{i=1}^{f} m_i y_i \Delta z_i , \tag{43}$$

где Δx_i, Δy_i, Δz_i - погрешности координат ЦМ i-го конечного элемента или ЦМ комплектующего относительно осей системы координат $OXYZ$ (в частности, $\Delta x_i = \Delta x_{изм} + \Delta x_{изг}/2 + \Delta x_{баз}$, а погрешности Δy_i, Δz_i определяют аналогичным образом); $\Delta x_{изм}$ - погрешность измерения; $\Delta x_{изг}$ - погрешность изготовления; $\Delta x_{баз}$ - погрешность базирования.

Тогда формулы для определения частных абсолютных погрешностей переносных осевых и центробежных моментов инерции СДПМ в окончательном виде будут следующими:

$$\Delta I_{xм}^{nIII} = \sum_{i=1}^{f}\left|\left(y_i^2 + z_i^2\right)\Delta m_i\right| + 2\sum_{i=1}^{f}\left|y_i m_i \Delta y_i\right| + 2\sum_{i=1}^{f}\left|z_i m_i \Delta z_i\right|; \tag{44}$$

$$\Delta I_{yм}^{nIII} = \sum_{i=1}^{f}\left|\left(x_i^2 + z_i^2\right)\Delta m_i\right| + 2\sum_{i=1}^{f}\left|x_i m_i \Delta x_i\right| + 2\sum_{i=1}^{f}\left|z_i m_i \Delta z_i\right|; \tag{45}$$

$$\Delta I_{zм}^{nIII} = \sum_{i=1}^{f}\left|\left(x_i^2 + y_i^2\right)\Delta m_i\right| + 2\sum_{i=1}^{f}\left|x_i m_i \Delta x_i\right| + 2\sum_{i=1}^{f}\left|y_i m_i \Delta y_i\right|; \tag{46}$$

$$\Delta I_{xyм}^{nIII} = \sum_{i=1}^{f}\left|x_i y_i \Delta m_i\right| + \sum_{i=1}^{f}\left|m_i y_i \Delta x_i\right| + \sum_{i=1}^{f}\left|m_i x_i \Delta y_i\right|; \tag{47}$$

$$\Delta I_{xzм}^{nIII} = \sum_{i=1}^{f}\left|x_i z_i \Delta m_i\right| + \sum_{i=1}^{f}\left|m_i z_i \Delta x_i\right| + \sum_{i=1}^{f}\left|m_i x_i \Delta z_i\right|; \tag{48}$$

$$\Delta I_{yzм}^{nIII} = \sum_{i=1}^{f}\left|y_i z_i \Delta m_i\right| + \sum_{i=1}^{f}\left|m_i z_i \Delta y_i\right| + \sum_{i=1}^{f}\left|m_i y_i \Delta z_i\right|. \tag{49}$$

В общем случае предельные относительные погрешности вычислений осевых и центробежных моментов инерции СДПМ в третьем приближении определяются зависимостью [5]

$$\delta I_{j м}^{III} = \frac{\Delta I_{j м}^{III}}{I_{j м}^{III}}. \tag{50}$$

В отличие от осевых моментов инерции (всегда имеющих ненулевые значения) центробежные моменты инерции СДПМ имеют ненулевые значения, как правило (в силу симметрии), только относительно осей OX и OY. Поэтому зависимость (50) для центробежных моментов инерции необходимо использовать осмотрительно.

Практически вероятную абсолютную погрешность вычислений осевых и центробежных моментов инерции СДПМ в третьем приближении можно определить следующим образом [5]:

$$\left(\Delta I_{j м}^{III}\right)_{п.в} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i=1}^{n} \left|\Delta I_{j м}^{iIII}\right| = \frac{1}{\sqrt{n}} \Delta I_{j м}^{III}, \tag{51}$$

где n - число аргументов, входящих в формулу; $\Delta I_{j м}^{iIII}$ - частная абсолютная погрешность одного из аргументов.

При определении числа аргументов n за единицу следует считать слагаемые входящие в состав $I_{j м}^{III}$. К этим слагаемым относятся $I_{j м}^{cIII}$ и $I_{j м}^{пIII}$. Каждое из данных слагаемых необходимо принимать как конкретную систему в целом. Связано это с тем, что формулы для определения практически вероятных погрешностей вычислений могут быть достаточно успешно использованы при удовлетворении следующих упрощающих условий: абсолютные погрешности аргументов должны быть независимы, подчинены нормальному закону распределения с одинаковой мерой точности и близки между собой [2]. При рассмотрении осевых и центробежных моментов инерции, как указано выше, число аргументов $n = 2$.

Практически вероятная относительная погрешность вычислений осевых и центробежных моментов инерции СДПМ в третьем приближении [5]

$$\left(\delta I_{j м}^{III}\right)_{п.в} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i=1}^{n} \delta I_{j м}^{iIII} = \frac{1}{\sqrt{n}} \delta I_{j м}^{III}, \tag{52}$$

где $\delta I_{j м}^{iIII}$ - частная относительная погрешность одного из аргументов.

В качестве примера приведем результаты расчетов предельной и практически вероятной абсолютной и относительной погрешностей вычислений осевых моментов инерции СДПМ БП10С самолета Су-27 в третьем приближении.

Используя данные работ [3, 6, 7] для определения частных абсолютных погрешностей вычислений осевых и центробежных моментов инерции СДПМ БП10С в третьем приближении, получим следующие результаты:

$$\Delta I_{x м}^{III}\left(I_{x м 1}^{cIII}\right) = 0{,}0061 кг \cdot м^2;\ \Delta I_{у м}^{III}\left(I_{у м 1}^{cIII}\right) = 0{,}0121 кг \cdot м^2;$$

$$\Delta I_{z м}^{III}\left(I_{z м 1}^{cIII}\right) = 0{,}0061 кг \cdot м^2;\ \Delta I_{x м}^{III}\left(I_{x м 2}^{cIII}\right) = 0{,}0038\, кг \cdot м^2;$$

$$\Delta I_{yм}^{III}\left(I_{yм2}^{cIII}\right) = 0{,}0073\,кг \cdot м^2;\ \Delta I_{zм}^{III}\left(I_{zм2}^{cIII}\right) = 0{,}00698\,кг \cdot м^2;$$

$$\Delta I_{xyм}^{III}\left(I_{xyм}^{cIII}\right) = \Delta I_{xzм}^{III}\left(I_{xzм}^{cIII}\right) = \Delta I_{yzм}^{III}\left(I_{yzм}^{cIII}\right) = 0\,кг \cdot м^2;$$

$$\Delta I_{xм}^{III}\left(I_{xм}^{пIII}\right) = 1{,}6435\,кг \cdot м^2;\ \Delta I_{yм}^{III}\left(I_{yм}^{пIII}\right) = 6{,}605\,кг \cdot м^2;$$

$$\Delta I_{zм}^{III}\left(I_{zм}^{пIII}\right) = 5{,}233\,кг \cdot м^2;\ \Delta I_{xyм}^{III}\left(I_{xyм}^{пIII}\right) = 0{,}462\,кг \cdot м^2;$$

$$\Delta I_{xzм}^{III}\left(I_{xzм}^{пIII}\right) = 1{,}2484\,кг \cdot м^2;\ \Delta I_{yzм}^{III}\left(I_{yzм}^{пIII}\right) = 0{,}171\,кг \cdot м^2.$$

Подставив эти значения в (13), получим, что предельные абсолютные погрешности вычислений осевых и центробежных моментов инерции СДПМ БП10С в третьем приближении

$$\Delta I_{xм}^{III} = 1{,}6534\,кг \cdot м^2;\ \Delta I_{yм}^{III} = 6{,}6244\,кг \cdot м^2;\ \Delta I_{zм}^{III} = 5{,}2461\,кг \cdot м^2;$$

$$\Delta I_{xyм}^{III} = 0{,}462\,кг \cdot м^2;\ \Delta I_{xzм}^{III} = 1{,}2484\,кг \cdot м^2;\ \Delta I_{yzм}^{III} = 0{,}171\,кг \cdot м^2.$$

Тогда согласно зависимости (50) предельные относительные погрешности вычислений осевых и центробежных моментов инерции СДПМ БП10С в третьем приближении

$$\delta I_{xм}^{III} = 6{,}49\,\%;\ \delta I_{yм}^{III} = 4{,}7\,\%;\ \delta I_{zм}^{III} = 4{,}45\,\%;\ \delta I_{xyм}^{III} = 15{,}2\,\%.$$

Предельные относительные погрешности вычислений $\delta I_{xzм}^{III}$ и $\delta I_{yzм}^{III}$ определять не имеет смысла, так как $I_{xzм}^{III} = I_{yzм}^{III} = 0\,кг \cdot м^2$.

Практически вероятные абсолютные и относительные погрешности вычислений осевых и центробежных моментов инерции СДПМ БП10С в третьем приближении в соответствии с (51) и (52) будут иметь следующие значения:

$$\left(\Delta I_{xм}^{III}\right)_{п.в} = 1{,}173\,кг \cdot м^2;\ \left(\Delta I_{yм}^{III}\right)_{п.в} = 4{,}698\,кг \cdot м^2;$$

$$\left(\Delta I_{zм}^{III}\right)_{п.в} = 3{,}72\,кг \cdot м^2;\ \left(\Delta I_{xyм}^{III}\right)_{п.в} = 0{,}33\,кг \cdot м^2;$$

$$\left(\Delta I_{xzм}^{III}\right)_{п.в} = 0{,}883\,кг \cdot м^2;\ \left(\Delta I_{yzм}^{III}\right)_{п.в} = 0{,}121\,кг \cdot м^2;$$

$$\left(\delta I_{xм}^{III}\right)_{п.в} = 4{,}6\,\%;\ \left(\delta I_{yм}^{III}\right)_{п.в} = 3{,}33\,\%;\ \left(\delta I_{zм}^{III}\right)_{п.в} = 3{,}2\,\%;$$

$$\left(\delta I_{xyм}^{III}\right)_{п.в} = 10{,}78\,\%.$$

Выводы

1. Получены зависимости для определения предельной и практически вероятной абсолютной и относительной погрешностей вычислений осевых и центробежных моментов инерции СДПМ в третьем приближении.

2. Выполнен расчет предельных и практически вероятных абсолютных и относительных погрешностей вычислений осевых и центробежных моментов инерции СДПМ БП10С самолета Су-27 в третьем приближении.

Список литературы

1. Бетин Д.А. Определение погрешностей вычислений моментов инерции свободнолетающей модели самолета в первом приближении / Д.А. Бетин // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. – Вып. 1(52). – Х., 2008. – С. 108-122.
2. Бетин Д.А. Определение погрешностей вычислений моментов инерции свободнолетающей модели самолета во втором приближении / Д.А. Бетин // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. – Вып. 5(56). – Х., 2008. – С. 96-110.
3. Определение размеров и массово-инерционных параметров свободнолетающих динамически подобных моделей самолетов: учеб. пособие / А.И. Рыженко, А.В. Бетин, В.И. Рябков, О.Р. Черановский; Мин-во просвещения Украины, Харьк. авиац. ин-т. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1992. – 101 с.
4. Яблонский А.А. Курс теоретической механики: в 3 ч. / А.А. Яблонский. – М.: Высш. шк., 1971. – Ч. II. Динамика. – 448 с.
5. Шейнин В.М. Весовое проектирование и эффективность пассажирских самолетов: Справочник / В.М. Шейнин, В.И. Козловский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1984. – 552 с.
6. Автоматизированный расчет основных параметров свободнолетающих динамически подобных моделей самолетов / А.И. Рыженко, А.В. Бетин, В.И. Рябков, О.Р. Черановский; Мин-во просвещения Украины, Харьк. авиац. ин-т. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1992. – 68 с.
7. Бетин Д.А. Определение погрешностей вычислений стартовой массы свободнолетающей модели самолета в третьем приближении / Д.А. Бетин // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. – Вып. 2(53). – Х., 2008. – С. 144-158.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Рыженко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.