

629.735.33.018.3.015

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОДВИЖНОСТИ ПИЛОТАЖНОГО СТЕНДА

С.А. Сорокин

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского
Российская Федерация, 140180, Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1
E-mail: sergey.a.sorokin@tsagi.ru

А.Д. Тимофеева

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского
Российская Федерация, 140180, Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1
E-mail: anastasiya.timofeeva@tsagi.ru

А.В. Ситников

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского
Российская Федерация, 140180, Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1
E-mail: a.sitnikov@tsagi.ru

Ключевые слова: модель системы подвижности, пилотажный стенд, динамика платформы Стюарта.

Аннотация: Создание цифрового двойника системы подвижности обусловлено сложностью ее настройки, а также стоимостью изготовления. Разрабатываемая математическая модель системы подвижности должна описывать искажение заданного сигнала линейных ускорений и угловых скоростей, которое возникает в процессе работы ее агрегатов. При описании математической модели системы подвижности на базе платформы Стюарта необходимо учитывать взаимное влияние, которое оказывают приводы друг на друга через подключенную к ним подвижную платформу.

1. Введение

Воспроизведение акселерационной информации, т.е. угловых ускорений и линейных перегрузок, действующих на летчика в полете, возложено на систему подвижности пилотажного стенда. Однако любая система подвижности обладает одним главным недостатком, – ограниченностью в перемещениях. Это означает, что угловые ускорения и линейные перегрузки (далее, для краткости, ускорения) в принципе невозможно точно воспроизвести на наземных пилотажных стендах. Неизбежно возникающие искажения воспроизводимых ускорений существенным образом снижают качество и достоверность получаемых результатов. Наличие достаточно точной математической модели системы подвижности позволило бы провести предварительную оценку качества воспроизводимой акселерационной информации с учетом динамических характеристик агрегатов и систем, входящих в систему подвижности, определить источники искажений динамических характеристик системы подвижности, а также провести настройку алгоритмов управления системой подвижности (АУДК).

2. Исходные данные и постановка задачи

Создаваемая математическая модель в первую очередь ориентирована на системы подвижности на базе платформы Стюарта, структурная схема которой представлена на рис. 1. Функционирование системы подвижности происходит следующим образом. Сигналы линейных перегрузок и угловых скоростей поступают в блок АУДК, который преобразует их в требуемое положение станда. Сигнал из АУДК преобразуется в сигнал положения привода в блоке расчета кинематики (АРК) и после модуля управления и контроля поступает непосредственно на каждое приводное звено, которое отрабатывает заданное положение привода. Воспроизводимые перемещения приводов формируют акселерационные сигналы, которые воспринимаются легчиком.

Для описания работы системы подвижности на базе платформы Стюарта необходимо учесть ее ключевую особенность – параллельную структуру подключения приводов, при которой они оказывают влияние друг на друга через присоединенную к ним подвижную платформу.

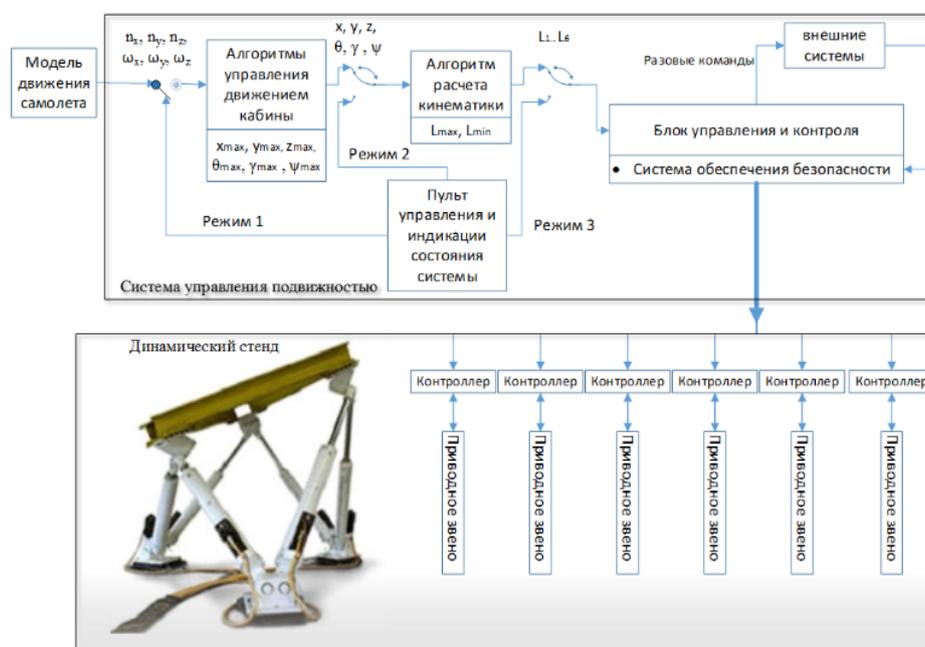


Рис. 1. Структурная схема типовой системы подвижности.

Создаваемый цифровой двойник системы подвижности предназначен для решения следующих задач:

- синтез АУДК для различных режимов полета;
- выбор характеристик агрегатов системы подвижности для улучшения ее динамических свойств;
- для использования в контуре управления при полунатурном моделировании.

3. Математическая модель механики системы подвижности

На рис. 2 приведена кинематическая схема системы подвижности, которая состоит из 6 приводов, закрепленных при помощи 3-х степенных шарниров к неподвижной платформе снизу и к подвижной платформе сверху.

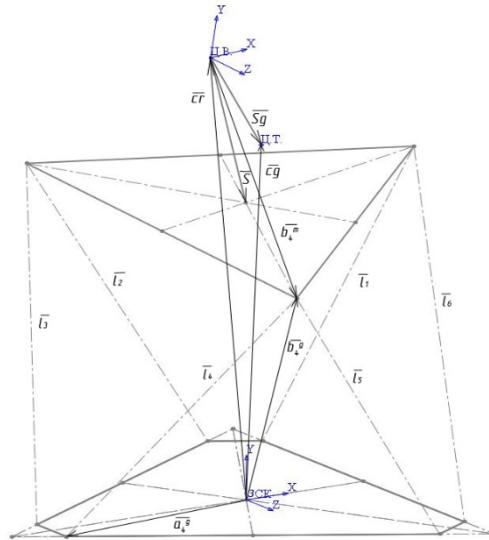


Рис. 2. Кинематическая схема системы подвижности на базе платформы Стюарта.

Уравнения, описывающие положение приводов в векторной форме, а также нормализованные векторы приводов представлены формулами 1-3:

$$(1) \quad \bar{l}_i = \bar{c}\vec{r} + R_m^g \bar{b}_i^m - \bar{a}_i^g,$$

$$(2) \quad |\bar{l}_i| = \sqrt{\bar{l}_i^T \bar{l}_i},$$

$$(3) \quad \bar{l}_{ni} = \frac{\bar{l}_i}{|\bar{l}_i|}.$$

При описании связанной с подвижной платформой системы координат используются углы Эйлера.

При дифференцировании уравнения преобразования координат верхнего шарнира (формула 1) можно определить якобиан, который будет использован при описании модели:

$$(4) \quad \bar{v}_{bi} = \dot{\bar{c}}\vec{r} + \bar{\omega} \times R_m^g \bar{b}_i^m,$$

$$(5) \quad \dot{\bar{l}}_i = \bar{l}_{n,i}^T \bar{v}_{bi} = \bar{l}_{n,i}^T \dot{\bar{c}}\vec{r} + \bar{l}_{n,i}^T (\bar{\omega} \times R_m^g \bar{b}_i^m),$$

$$(6) \quad \dot{\bar{l}} = L_n^T \dot{\bar{c}}\vec{r} + (R_m^g B^m \times L_n)^T \bar{\omega} = J_{l,x} \dot{\bar{x}} = L_n^T V_b,$$

$$(7) \quad J_{l,x} = [L_n^T \quad (R_m^g B^m \times L_n)^T].$$

Данный якобиан имеет два важных свойства:

- его столбцы $J_{l,x}$ определяют требуемые скорости приводов для получения единичного вектора скорости платформы.
- строки матрицы $J_{l,x}$ дают обобщенные силы в координатах платформы при заданном единичном усилии в приводе.

Определив кинематику механической системы, можно описать ее динамику. Вся рассматриваемая в данном разделе механика основана на теории полуравновесия, задаваемой вторым законом Ньютона.

Использование якобианов позволяет записать системы уравнений динамики в краткой матричной форме, где матрица масс M_c , кориолисовых/центробежных эффектов C_c и вектор гравитации \bar{G}_c зависят от углового положения платформы:

$$(8) \quad \begin{bmatrix} L_n \\ R_m^g A^m \times L_n \end{bmatrix} \bar{f}_a = \begin{bmatrix} m_c & 0 \\ 0 & I_{cr}^g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\bar{c}}\vec{r} \\ \dot{\bar{\omega}}^g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \tilde{\Omega}^g I_{cr}^g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\bar{c}}\vec{r} \\ \bar{\omega}^g \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_c \bar{g} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$(9) \quad J_{i,x}^T(\bar{s}\bar{x})\bar{f}_a = M_c(\bar{s}\bar{x})\ddot{\bar{x}} + C_c(\dot{\bar{x}}, \bar{s}\bar{x})\dot{\bar{x}} + \bar{G}_c.$$

Таким образом составлена система уравнений, описывающая механику системы подвижности, которая учитывает ее геометрические параметры и инерционно-массовые характеристики.

4. Обобщенная модель системы подвижности с учетом динамики приводов

Динамика гидравлической части системы обусловлена сжимаемостью масла. Относительное уменьшение объема \dot{V}/V , вызывает рост давления \dot{P} , линейно зависящий от эффективного модуля объемной упругости масла E .

Определение основных параметров модели гидравлического привода, представленной на рис. 3 с использованием системы координат, в которых положение поршня равно нулю в точке, где объемы камер равны приведено в матричной форме:

$$(10) \quad \begin{bmatrix} P_m & \Phi_m & \Phi_{lm} & C_m \\ \Delta P & \Delta \Phi & \Delta \Phi_l & \Delta C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{o1} & \Phi_{o1} & \Phi_{l1} & E/V_1 \\ P_{o2} & \Phi_{o2} & \Phi_{l2} & E/V_2 \end{bmatrix}.$$

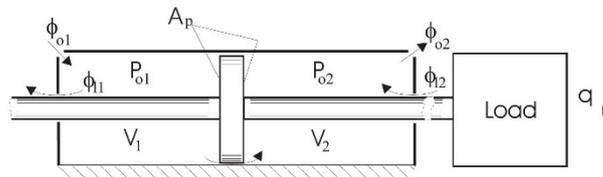


Рис. 3. Общий вид модели гидравлического привода с присоединенной нагрузкой.

Отбросив незначительные составляющие можно описать одно из основных уравнений для описания базовой механической системы с гидравлическим приводом:

$$(11) \quad \Delta \dot{P} = 2C_m(q)(\Phi_m - L_{lm}\Delta P - A_p \dot{q}).$$

Модель гидравлического привода также имеет модульную структуру и включает модель электронного блока управления приводом, который преобразует сигналы заданного и текущего положения привода в заданный сигнал положения золотника.

Далее заданный сигнал положения золотника преобразуется в его текущее положение при помощи модели электронного блока управления клапаном. На рис. 4 представлены динамические характеристики моделируемого клапана.

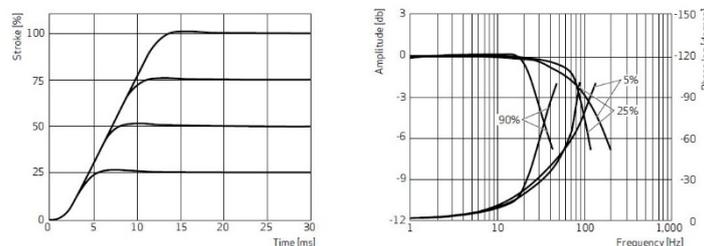


Рис. 4. Динамические характеристики клапана привода системы подвижности

Модель управления клапаном описывает ламинарное течение через золотник. В данной модели учитываются физические свойства рабочей жидкости, геометрические параметры гидрораспределителя, давление напора и слива, а также внешняя нагрузка и рабочая площадь поршня:

$$(12) \quad \Phi_m = \mu \sqrt{\frac{2}{\rho}} b_m x_m \sqrt{\frac{1}{2} \left(P_s - P_t - \frac{F_{ext}}{A_p} \text{sign}(x_m) \right)},$$

$$(13) \quad \Phi_{lm} = L_{lm} \left(P_s - P_t - \frac{F_{ext}}{A_p} \text{sign}(x_m) \right).$$

Таким образом модель гидравлического привода под нагрузкой можно описать дифференциальным уравнением перепада давлений (уравнение 11), а также дифференциальным уравнением второго порядка, учитывающего инерционную составляющую груза, демпфирование и внешнюю нагрузку:

$$(14) \quad \ddot{q} = M_{act}^{-1} A_p \Delta \bar{P} - M_{act}^{-1} \dot{q} B - M_{act}^{-1} J_{l,x} \bar{G}.$$

Обобщенная модель системы подвижности представляет собой набор из моделей 6 гидравлических приводов, работающих под нагрузкой, при этом инерционно-массовые характеристики, а также внешние нагрузки на каждом шаге моделирования пересчитываются с учетом текущего положения кабины:

$$(15) \quad M_{act}^{-1} = J_{l,x} M_t^{-1} J_{l,x}^T.$$

Следует отметить, что для вычисления текущего положения платформы, текущие скорости привода при помощи якобиана преобразуются в вектор скорости платформы, далее вектор скорости численными методами интегрируется.

$$(16) \quad \dot{x} = J_{l,x}^{-1} \dot{q}.$$

5. Заключение

Создана обобщенная модель, описывающая динамику системы подвижности на базе платформы Стюарта с использованием гидравлических приводов.

Модель имеет модульную структуру и при необходимости может уточняться.

Модель описывает физические процессы механики и гидравлики, а также работы программно-аппаратных модулей, оказывающих влияние на динамику системы.

Модель является параметрической и для дальнейшего ее использования требует настройки и верификации.

Список литературы

1. Dynamic Characteristics of Flight Simulator Motion Systems. AGARD-AR-144. September 1979.
2. Thomas R. Kane and David A. Levinson. Dynamics: Theory and Applications. McGraw-Hill Book Company, 1985.
3. Lewis F., Abdallah C., Dawson D. Control of Robot Manipulators. Macmillan, 1993.
4. Murray R.M., Li Z., Sastry S.S. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. CRC, 1994.
5. Roberson R.E., Schwertassek R. Dynamics of multibody systems. Springer, 1988.
6. Merrit H.E. Hydraulic Control Systems. Wiley, 1967.
7. Van Schothorst G. Modelling of long-stroke hydraulic servo-systems for flight simulator motion control and system design. PhD thesis, Delft University of Technology, 1997.
8. Ермаков С.А., Оболенский Ю.Г., Сухоруков Р.В. Введение в проектирование систем авиационных рулевых приводов. М.: 2010.