

УДК 62-523.2:004.896

DOI: 10.22213/2410-9304-2017-1-60-65

Р. А. Ганин

Д. В. Казунин, доктор технических наук, доцент
АО «Кронштадт Технологии», г. Санкт-ПетербургСРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ПОДВИЖНОСТИ
ТРЕНАЖЕРОВ АВТОТРАНСПОРТА И СПЕЦТЕХНИКИ

Актуальным направлением разработки систем подвижности тренажеров автотранспорта и спецтехники является совершенствование алгоритмов управления системой подвижности, что позволяет значительно улучшить качество воспроизведения акселерационных воздействий на рабочем месте оператора. В большинстве случаев применяется простой и надежный кинематический подход к управлению платформой, подразумевающий решение обратной задачи кинематики в режиме реального времени. Регулятор в данном случае декомпозируется на локальные системы управления приводами звеньев, обрабатывающие в следящем режиме рассчитанные положения входных звеньев механизма. Локальные системы автоматического регулирования для электромеханических приводов строятся по принципу подчиненного управления параметрами исполнительного двигателя. Однако данный принцип не обеспечивает требуемого качества управления при наличии таких внешних факторов, как превышение номинальной нагрузки на валах двигателей, высоко расположенный центр масс объекта на подвижном основании, нелинейности регуляторов системы управления приводом. В таком случае улучшение показателей качества системы возможно за счет применения более сложных алгоритмов, учитывающих динамику объекта. В статье проведен сравнительный анализ моделей систем управления трехступенной динамической платформы подвижности тренажера автотранспорта и спецтехники с целью последующего синтеза регулятора. Выведены уравнения обратной и прямой задач кинематики, уравнения прямой задачи динамики, описаны допущения, принятые при составлении уравнений. В соответствии с полученными уравнениями построены упрощенная и полная динамическая модели системы управления платформой. По имеющимся данным, поступающим от математической модели техники, подобраны тестовые входные воздействия для исследования переходных и установившихся процессов. На основе результатов моделирования сделаны выводы о применимости упрощенной и полной моделей при анализе и синтезе систем управления динамическими платформами.

Ключевые слова: система подвижности, динамическая модель, контроллер движения, тренажерный комплекс.

Система подвижности (СП) тренажера представляет собой динамическую платформу, предназначенную для имитации тактильных воздействий на обучаемого и выработки необходимых при управлении техникой моторных навыков. Типовыми акселерационными воздействиями, воспроизводимыми в тренажерах автотранспорта и спецтехники (АТ и СТ), являются:

- имитация неровностей рельефа (изменения положения техники в пространстве);
- имитация удара, столкновения с препятствием;
- имитация виброактивности машины, высокочастотные колебания;
- имитация центростремительных ускорений – повороты, вращение (например, для тренажеров экскаватора);
- специальные эффекты, характерные для конкретного типа АТ и СТ, такие как тряска при копании, высыпание грунта из ковша карьерного экскаватора.

Для удовлетворения целей обучения к СП предъявляются следующие требования, типичные для следящих систем:

- минимальное фазовое запаздывание в полосе частот до 2–3 Гц (СП ведущих российских производителей имеет фазовый сдвиг 10–30° на частоте 1 Гц [1]);
- минимальная транспортная задержка в канале орган управления – исполнительное устройство СП (не более 100–200 мс в зависимости от возможностей системы визуализации тренажера [2]);
- отсутствие перерегулирования в системе в режиме слежения и при обработке различных типовых сигналов.

Очевидно, что на указанные выше характеристики СП оказывает влияние множество факторов, в которые входят статические и динамические характеристики приводов СП; механические параметры объекта, закрепленного на подвижном основании (положение центра масс, момент инерции и др.); па-

раметры системы управления и особенности конкретной СП (люфты в сочленениях, задержки передачи управляющих воздействий, пр.).

Для выбора структуры и корректной настройки параметров системы управления СП целесообразно применение современных методов компьютерного моделирования.

Целью данной работы является сравнение и анализ двух подходов к моделированию систем подвижности с тремя степенями свободы на кривошипно-шатунных опорах:

1. С применением упрощенной модели СП.
2. С применением полной динамической модели.

В работе рассматривается трехступенная электромеханическая платформа как наиболее распространенная в своем классе система подвижности, обеспечивающая приемлемое качество имитации акселерационных воздействий и оптимальная по энергопотреблению и затратам на обслуживание.

Упрощенная модель системы подвижности. Для моделирования СП первостепенной задачей является решение обратной задачи кинематики (ОЗК). Кинематическая схема трехступенной СП приведена на рис. 1.

Решение ОЗК состоит в нахождении углов поворота кривошипов q_1, q_2, q_3 по заданным положениям платформы α, β, z_p и сводится к решению квадратного уравнения, которое имеет корни:

$$q_i^{1,2} = -2 \arctg \frac{\bar{B}_i \pm \sqrt{\bar{B}_i^2 + \bar{C}_i^2 - \bar{A}_i^2}}{\bar{A}_i - \bar{C}_i}, \quad i = 1 \dots 3, \quad (1)$$

где коэффициенты

$$\begin{aligned} \bar{A}_i &= (x_{Ci} - x_{Bi})^2 + (y_{Ci} - y_{Bi})^2 + (z_{Ci} - z_{Bi})^2 + R^2 + L^2, \\ \bar{B}_i &= -2R(y_{Ci} - y_{Bi}), \\ \bar{C}_i &= 2R(z_{Ci} - z_{Bi}) \end{aligned} \quad (2)$$

зависят от α, β, z_p согласно следующим формулам:

$$\begin{pmatrix} x_{C1} \\ y_{C1} \\ z_{C1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b \sin \alpha \sin \beta - a \cos \beta \\ b \cos \alpha \\ z_p + a \sin \beta + b \cos \beta \sin \alpha \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} x_{C2} \\ y_{C2} \\ z_{C2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a \cos \beta - b \sin \alpha \sin \beta \\ -b \cos \alpha \\ z_p + a \sin \beta - b \cos \beta \sin \alpha \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_{C3} \\ y_{C3} \\ z_{C3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c \cos \beta \\ 0 \\ z_p - a \sin \beta \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_{B1} \\ y_{B1} \\ z_{B1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a \\ b \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_{B2} \\ y_{B2} \\ z_{B2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a \\ -b \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_{B3} \\ y_{B3} \\ z_{B3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ c \end{pmatrix} \quad (3)$$

Решение уравнений ПЗК позволяет выполнить прямое преобразование углов поворота (q_1, q_2, q_3) в (α, β, z_p), что необходимо в условиях отсутствия датчиков, непосредственно измеряющих крен, тангаж и подъем платформы.

Аналитические формулы решения ПЗК имеют вид

$$h \approx \frac{-R}{1+c/a} \left[\cos q_3 + \frac{c}{2a} (\cos q_1 + \cos q_2) + \frac{R}{2L} \left(\sin^2 q_3 + \frac{c}{2a} (\sin^2 q_1 + \sin^2 q_2) \right) \right],$$

$$\alpha \approx \frac{R}{2b} \left[\cos q_2 - \cos q_1 + \frac{R}{2L} (\cos^2 q_1 - \cos^2 q_2) \right],$$

$$\beta \approx \frac{R}{a+c} \left[\cos q_3 - \frac{1}{2} (\cos q_1 + \cos q_2) \right]. \quad (4)$$

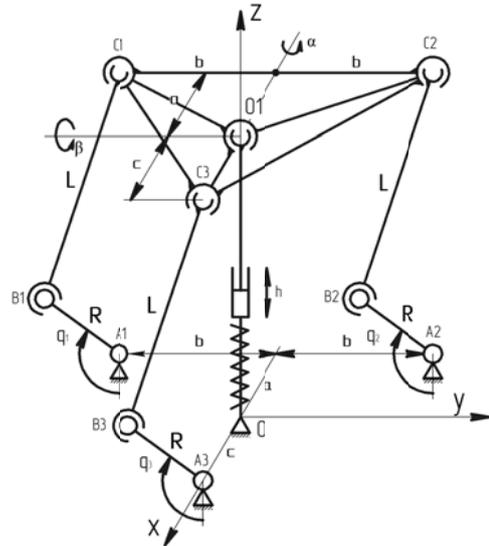


Рис. 1. Кинематическая схема платформы 3DOF

Данные зависимости были получены путем разложения исходных трансцендентных уравнений ПЗК в ряд по степеням R/L до второго порядка. Величина R/L выбрана исходя из того, что при проектировании КШМ она находится в пределах 0,1–0,3 [3], вследствие чего высокими порядками R/L можно пренебречь. Максимальная ошибка решения ПЗК по всей допустимой области составила до $\sim 0,5^\circ$ для углов α, β и 0,1 см для подъема z_p , что является допустимым для дальнейших расчетов.

Полученные уравнения позволяют построить упрощенную модель СП, показанную на рис. 2.

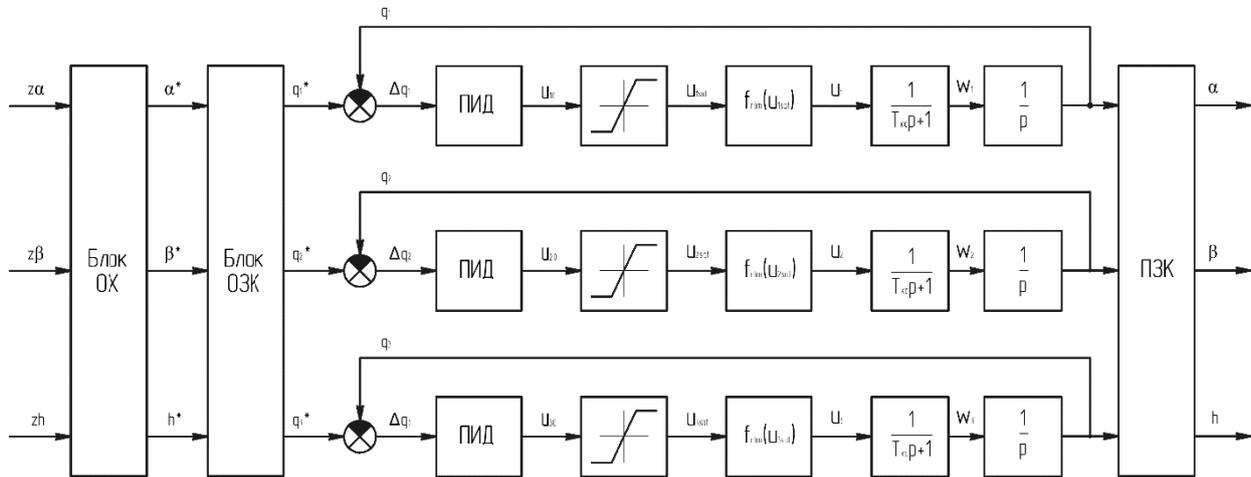


Рис. 2. Структурная схема упрощенной модели системы управления СП

Модель состоит из следующих блоков:

- блок ограничительной характеристики осуществляет проверку существования решения ОЗК для тройки (z_α, z_β, z_h) заданных значений крена, тангажа и подъема. В случае наличия комплексных корней в решении (1) осуществляется поиск ближайшего допустимого решения (α^*, β^*, h^*) в соответствии с рассчитанными кинематическими ограничениями [4];

- блок ОЗК осуществляет расчет углов поворота кривошипов q_1^*, q_2^*, q_3^* в соответствии с формулами (1)–(3);

- ПИД-регуляторы углов поворота кривошипов с ограничением управляющего воздействия реализуют локальные контуры управления положением приводов СП;

– блок ограничения ускорения $f_{\text{rlim}}(u_{\text{isat}})$, имеющий следующую передаточную характеристику:

$$y = f_{\text{rlim}}(u) = \begin{cases} u, & \text{если } |\dot{u}| < \dot{u}_{\text{max}}, \\ \text{sign}(\dot{u})\dot{u}_{\text{max}}t, & \text{если } |\dot{u}| > \dot{u}_{\text{max}}; \end{cases}$$

– аperiodическое звено, реализующее постоянную времени контура скорости привода $T_{\text{к.с.}}$.

В данной модели вводятся следующие допущения:

- не учитывается динамика платформы подвижности и приводных звеньев;
- люфт передач, транспортные задержки считаются несущественными;
- частота дискретизации цифрового ПИД-регулятора считается постоянной.

Модель системы управления СП с учетом динамики подвижной платформы

Для устранения указанных выше недостатков требуется ввести в модель динамику подвижной платформы и приводных звеньев. С целью решения этой задачи были выведены аналитические уравнения прямой задачи динамики (ПЗД). Рассмотрим результат решения ПЗД – вращающие моменты Q_1, Q_2, Q_3 в функции от заданных движений $\alpha(t), \beta(t), z_p(t)$.

Схема СП 3DOF с указанием сил приведена на рис. 3.

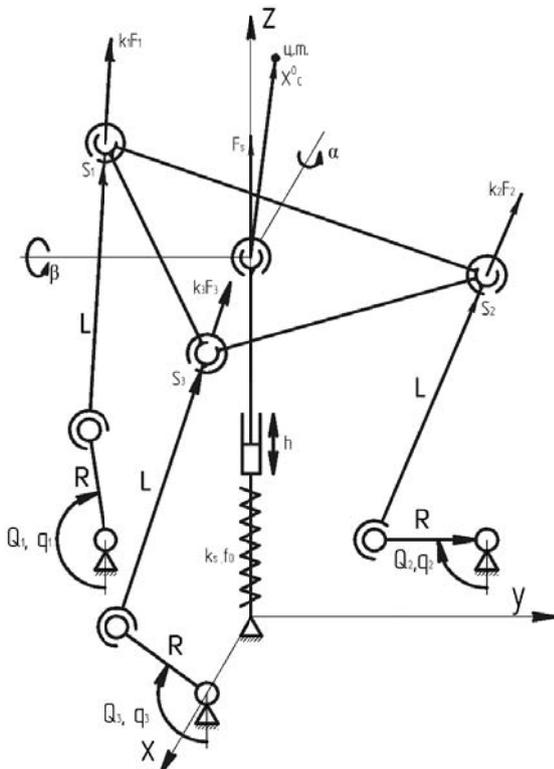


Рис. 3. Схема к модели динамики 3DOF СП

При заданных движениях $\alpha(t), \beta(t), z_p(t)$ (и, следовательно, $q_1(t), q_2(t), q_3(t)$) вращающие моменты Q_1, Q_2, Q_3 определяются по следующей формуле:

$$Q_i = k_i G_i; \quad i = 1, 2, 3,$$

$$\begin{aligned} G_1 = & R \{ L \sin q_1 - R \sin q_1 \cos q_1 - \\ & - R^2 \left[\frac{1}{8b} (\cos q_1 - \cos q_2)^2 \cos q_1 + \frac{1}{2L} \sin^3 q_1 \right] + \\ & + \frac{R^3}{8Lb} (\cos q_1 - \cos q_2)^2 (\cos 2q_1 + \cos q_1 \cos q_2) \}, \\ G_2 = & R \{ L \sin q_2 - R \sin q_2 \cos q_2 - \\ & - R^2 \left[\frac{1}{8b} (\cos q_1 - \cos q_2)^2 \cos q_2 + \frac{1}{2L} \sin^3 q_2 \right] + \\ & + \frac{R^3}{8Lb} (\cos q_1 - \cos q_2)^2 (\cos 2q_2 + \cos q_1 \cos q_2) \}, \\ G_3 = & R \left\{ L \sin q_3 - R \sin q_3 \cos q_3 - R^2 \frac{1}{2L} \sin^3 q_3 \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где коэффициенты k_i определяются из системы линейных уравнений:

$$\begin{pmatrix} F_1 & F_2 & F_3 \\ bD_1 & -bD_2 & 0 \\ aD_1 & aD_2 & -cD_3 \end{pmatrix} k + \begin{pmatrix} 0 \\ S_y^0 k z_c - y_c E k \\ -S_x^0 k z_c + x_c E k \end{pmatrix} = \frac{1}{L} \begin{pmatrix} m\ddot{h} + k_s h - f_0 + mg \\ m_\alpha + y_c (m\ddot{h} + mg) \\ m_\beta - x_c (m\ddot{h} + mg) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$m_\alpha = I_x \ddot{\alpha} \cos \beta + (I_x - I_y - I_z) \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \beta,$$

$$m_\beta = I_y \ddot{\beta} (I_z - I_x) \dot{\alpha}^2 \cos \beta \sin \beta,$$

В системе (6) $k = [k_1 \ k_2 \ k_3]^T$ – искомые коэффициенты (суть модули сил реакции шатунов на подвижную платформу); S_i^0 – векторы положения шатунов в земной системе координат; F_i – нормированные к L векторы от точек B_i к C_i , D_i – нормированные к L векторы от центра тяжести X_c к точкам крепления шатунов к подвижной платформе C_i ; m_α и m_β – инерционные моменты, зависящие от угловых скоростей и ускорений платформы моментов инерции J_x, J_y, J_z ; $X_c = [x_c, y_c, z_c]^T$ – вектор положения центра масс в системе координат подвижной платформы; m – масса объекта, закрепленного на подвижной платформе; k_s – коэффициент упругости пружины; f_0 – значение подъемной силы при $h = -R$; $h = z_p - L$ – смещение точки O_1 относительно среднего положения; $E = F - D$ – вспомогательная переменная, характеризующая горизонтальные смещения центра тяжести.

Структура модели с учетом динамики платформы представлена на рис. 4.

грузок на мотор-редукторы (МР) переходные процессы затягиваются, возникает значительное перерегулирование, которое может приводить к потере устойчивости. Причиной возникновения перерегуловок в реальной СП является некорректный выбор МР по мощности и моменту, высоко расположенный центр масс кабины, а также малый коэффициент жесткости пружины.

Помимо этого, в реализованном алгоритме коррекции траектории не учитывается динамическая ограничительная характеристика. Таким образом, ничто не ограничивает платформу от движений в зоне $q_i > 90^\circ$. В данных положениях подъемная сила пружины уменьшается, что приводит к возрастанию нагрузки на двигатели.

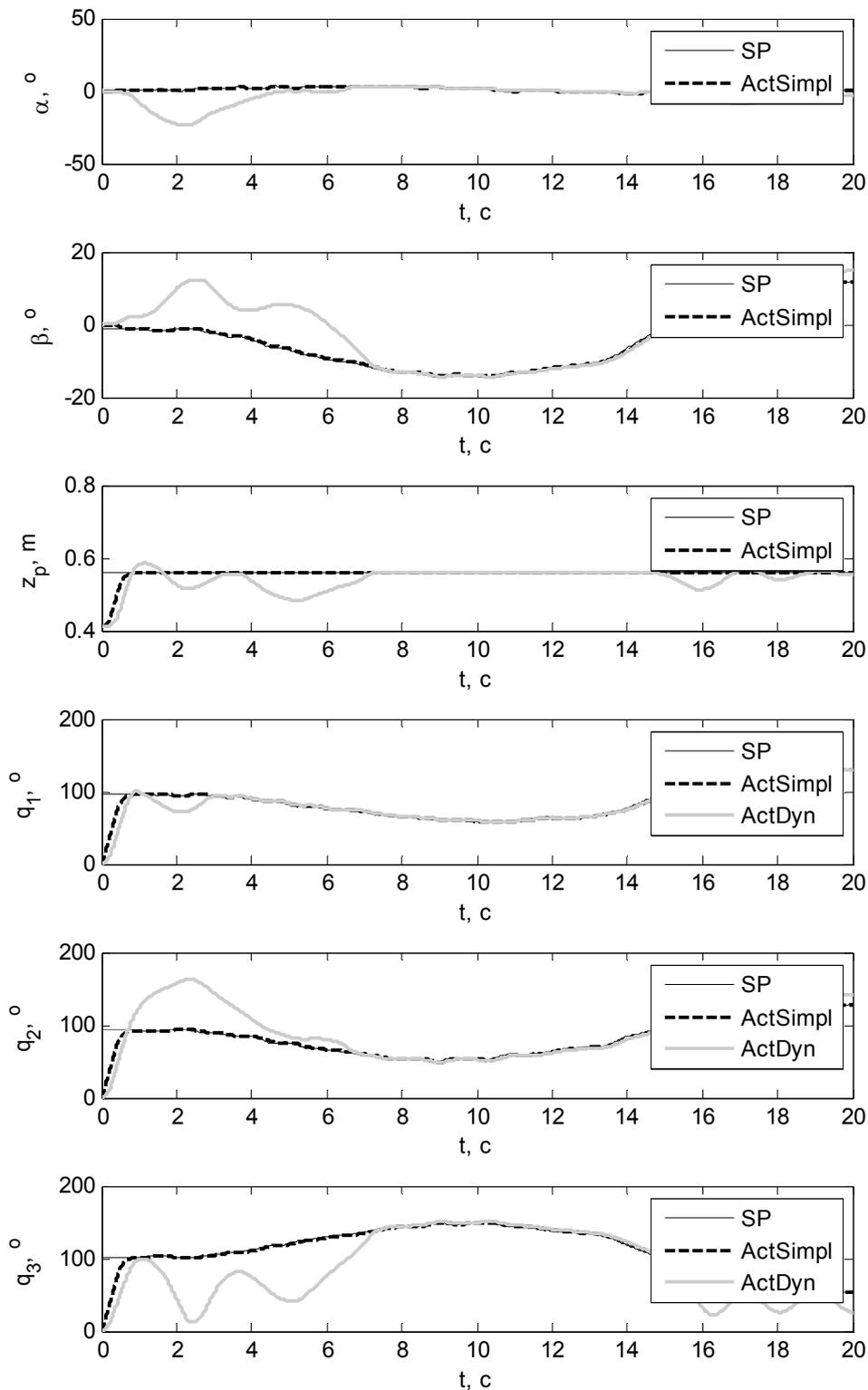


Рис. 6. Результаты моделирования прохождения СП по тестовой траектории

Заключение

В ходе работы были построены две отличающиеся по структуре модели СП. По результатам моделирования построены графики переходных процессов при прохождении типовой тестовой траектории. Данные моделирования свидетельствуют о том, что:

1) упрощенная модель подходит для анализа нагруженных СП, мотор-редукторы которых работают в пределах номинальных нагрузок. Для управления такими СП целесообразно использовать ПИД-регулятор с введенными кинематическими ограничениями на задающие траектории;

2) в случае, если объект, закрепленный на подвижной платформе, обладает значительными массоинерционными характеристиками, необходимо вводить в систему управления дополнительный модуль коррекции траектории, учитывающий динамические ограничения объекта управления.

Библиографические ссылки

1. Новое поколение систем подвижности. – URL: <http://www.dinamika-avia.ru/mcenter/forum/detail.php?id=2503>.
2. Шиббаев В. М. Методика определения запаздывания ответной реакции систем авиационного тренажера. – URL: http://fstd.info/doc/metod_td.pdf.
3. Гоц А. Н. Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма поршневых двигателей : учеб. пособие. – Владимир : Редакционно-издательский комплекс ВлГУ, 2005. – 114 с.
4. Ming H., Jia Shun S. The Kinematic analyses of the 3-DOF parallel machine tools // International Journal of Automation and Computing. – 2011. – Т. 8 – № 1 – С. 107–111.
5. Фираго Б. И., Павлячик Л. Б. Теория электропривода : учеб. пособие. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 527 с.
6. Игнатова Е. И., Ростов Н. В. Компьютерное моделирование исполнительных систем роботов : учеб. пособие. – Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 160 с.

R. A. Ganin, Engineer, JSC «Kronshtadt Technologies», Saint-Petersburg

D. V. Kazunin, DSc in Engineering, Associate Professor, JSC «Kronshtadt Technologies», Saint-Petersburg

Comparative Study of Dynamic Models of Vehicle Simulator Motion Platform

Improvement of motion platform control algorithms is an actual problem of modern vehicle simulators development, which solution may significantly increase the reproducing quality of motion effects at the operator workplace. For general purposes, the simple and robust kinematic approach to control the platform is implemented; it implies the solution of the inverse kinematic task in real-time modes. The controller in this architecture is decomposed to separate local systems of controlling the drives of elements that produce the calculated positions of input elements of the mechanism in the tracking mode. Local systems of computer-aided regulation for electric mechanical drives are designed according to the principle of subordinate control of parameters of the actuating motor. However, such architecture is ineffective in case of significant motor loads, high center of gravity position and nonlinear behavior of local drive controllers. For these cases, system performance can be improved with more complicated algorithms, which consider platform dynamics. In this paper, the dynamic models of 3DOF motion platform of vehicle simulator are studied for the purposes of controller synthesis. The obtained equations of inverse and direct kinematics and direct dynamics equations are discussed. According to the obtained equations, the simplified and complete dynamic models of the system for platform control are developed. Using the information available due to the mathematical model of the device, testing input effects are selected for investigating the transient and stationary processes. Based on computer simulation, common recommendations about using simplified or full dynamic model in synthesis and analysis of control system are given.

Keywords: motion platform, dynamic model, motion controller, simulator complex.

Получено: 13.02.17