

Яглинский В. П.,
Обайди А. С.,
Фелько Н. В.

ПОВЫШЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ КАБИН ДИНАМИЧЕСКИХ ТРЕНАЖЕРОВ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

Применение предложенной конструкции тренажера на основе гексапода с подвижным базисом позволило увеличить размеры пространственной рабочей зоны и степень подвижности, повысить маневренность и способность осуществления сложных имитационных движений кабины экипажа мобильных машин (ММ). Разработаны математические модели управления параметрами кинематики тренажера, имитирующего движение ММ по воде в условиях килевой и бортовой качки или по суше со сложным рельефом.

Ключевые слова: гексапод, динамическая платформа, рывок, базис, имитация, маневр.

1. Введение

Наиболее эффективным способом индивидуальной и групповой подготовки членов экипажей мобильных машин (ММ) является применение динамических тренажеров. Технический уровень современного тренажера непосредственно зависит от соответствия динамической имитации режимов движения и силового воздействия на экипаж реальным условиям применения ММ. Одним из основных факторов, влияющих на экипажи ММ для выработки навыков вождения в сложных погодных и рельефных условиях, является силовое (акселерационное) воздействие. Наибольшее распространение тренажерные технологии получили там, где ошибки при обучении на реальных объектах приводят к чрезвычайным последствиям, а их устранение — к большим финансовым затратам: в морской навигации, авиации и космосе, в военном деле, в медицине, при ликвидации последствий стихийных бедствий, в атомной энергетике и высокотехнологичном производстве [1].

Управление боевыми ММ весьма сложная и опасная операция, требующая принятия быстрых решений по удержанию курса и мгновенных реакций по изменению движения воздействием на органы управления. Поэтому проблема повышения качества подготовки экипажей ММ является весьма важной, а совершенствование комплекса имитационных движений кабины тренажера, приближение их к реальным условиям функционирования и поведения в экстремальных ситуациях является актуальной проблемой.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В известных учебных тренажерных центрах ВМФ Украины (Одесса, Измаил, Херсон и др.) применяется комплексный серийный тренажер типа «Мостик» компании «Транзас Украина», состоящий из командного мостика с проекционной системой визуализации и трех малых мостиков кораблей тактической группы (рис. 1).

Аналогичные тренажеры типа «Мостик-2000», «Транзас», «3D Ходовой мостик» установлены в учебных центрах Северного и Черноморского флотов РФ. Тренажер предназначен для подготовки расчета «главный командный пункт — боевой информационный пост —

штурман» к обеспечению навигационной безопасности плавания, а также для отработки взаимодействия специалистов командных пунктов и боевых постов корабля. Основным недостатком является то, что силовое (акселерационное) воздействие на экипаж на таких тренажерах не имитируется.



Рис. 1. Морской навигационный тренажер типа «Мостик» (фото с сайта transas.ru)

Известен тренажер по обеспечению безопасности обучения погрузке ММ на средства переправы через водные преграды, отличающийся от существующих тем, что он установлен на суше и имитирует полностью характер колебаний переправочных средств на воде при погрузке ММ, при этом на платформе тренажера может быть оборудован макет любого переправочного средства (рис. 2). Недостатком тренажера является незначительная амплитуда колебаний платформ и невозможность имитирования сложных маневров типа — тангаж, заносы, преодоление препятствий.

Более совершенными являются известные тренажеры экипажей ММ на основе трехступенных динамических платформ с использованием механизмов параллельной структуры типа трипод (рис. 3, а) и (рис. 4, а). Однако они воспроизводят ограниченные угловые положения машины и моделируют кинематику в стесненных пространственных условиях.

В настоящее время все большее применение в составе авиакосмических и танковых тренажеров получают шестиступенные динамические платформы на основе гексапода, например, тренажеры 6ПД8 (рис. 3, б) и ДС6-1 (рис. 4, б) [2].

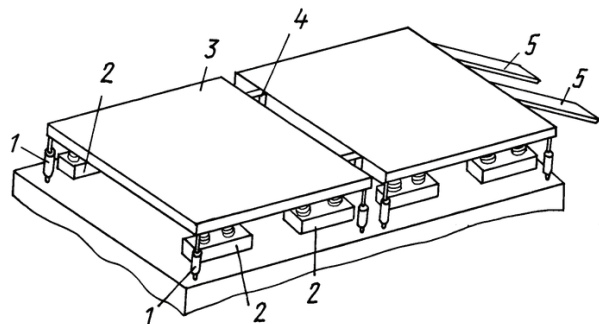


Рис. 2. Тренажер для обучения погрузке боевых машин на средства переправы через водную преграду (Патент RU 2204169, РФ):
1 — гидромортизаторы; 2 — ограничители вертикальных колебаний платформы; 3 — платформа; 4 — шарнирное соединение платформ; 5 — торцевая откидывающаяся аппарель



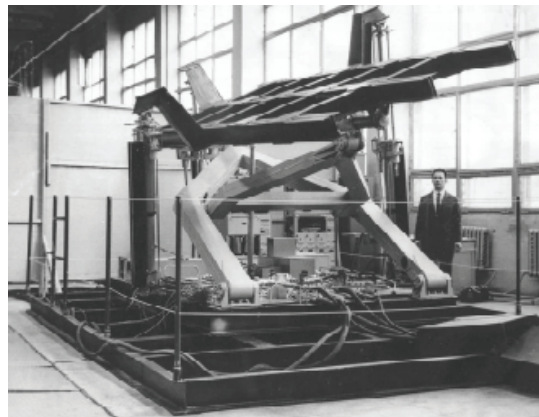
а



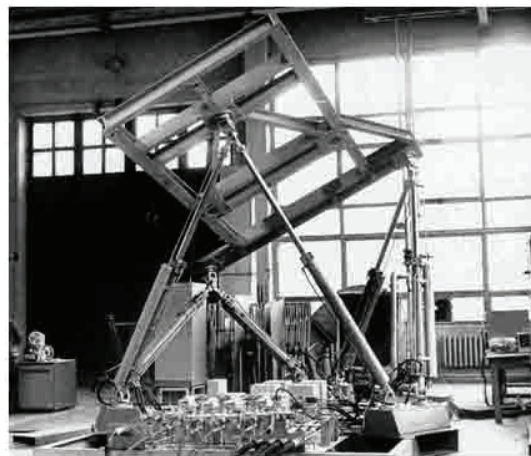
б

Рис. 3. Динамические платформы Научно-производственного предприятия «Энергия 2000» (г. Киев, Украина):
а — трехступенная Д12 на основе трипода;
б — шестиступенная 6ПД8 на основе гексапода

Шестиступенной стенд представляет собой пространственно-кинематическую схему из шести взаимосвязанных исполнительных гидроцилиндров следящих приводов, работающих в телесном угле до 70 градусов относительно вертикальной оси. Конструкция устойчива от сваливания, скручивания относительно вертикальной оси и других несанкционированных перемещений подвижной платформы. Недостатком такой конструкции является взаимовлияние приводов на перераспределение массы подвижной платформы и размещенного на ней груза на каждом из приводов, что значительно ухудшает работу и отрицательно влияет на динамические характеристики приводов.



а



б

Рис. 4. Динамические стенды авиационных тренажеров:
а — трехступенной модели ДСЗ; б — шестиступенной на основе гексапода ДСБ-1

Шестиступенные тренажеры имеют повышенную подвижность по сравнению с трехступенными и могут сообщать платформе, кроме двух угловых перемещений, еще вращательное вокруг вертикальной оси, а также поступательные — вертикальное, продольное и поперечное. Однако эти перемещения остаются весьма ограниченными: вертикальное перемещение ± 100 мм; продольное и поперечное смещения ± 300 мм; углы крена и тангажа ± 20 град; угол поворота вокруг вертикальной оси ± 30 град. Кроме того, недостатком трехступенных и шестиступенных тренажеров является взаимовлияние приводов на перераспределение массы подвижной платформы и размещенного на ней груза на каждом из приводов, что значительно ухудшает работу и отрицательно влияет на динамические характеристики приводов. Для устранения этого недостатка требуется значительно увеличивать запас по усилиям приводов, а, следовательно, и потребляемую мощность.

3. Цель и задачи исследования подвижности кабин тренажеров

Целью исследований является повышение подвижности кабин динамических тренажерных систем и эффективности наземной подготовки экипажей ММ к действиям в условиях нормативных и экстремальных ситуаций, путем всестороннего моделирования, создания и совершенствования систем имитации движения ММ при

отработке нормативных условий маневрирования, а также в условиях килевой и бортовой качки корпуса, заносов на поворотах, предельных углов тангажа и крена. Для соответствия всему комплексу указанных требований базовым условием является увеличение рабочего пространства тренажера с использованием многокоординатной модульной комбинированной тренажерной системы на основе гексапода [3, 4].

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- предложить конструктивные решения по увеличению рабочего пространства тренажерной системы и снижению динамической нагрузки на ее элементы;
- разработать математический аппарат моделирования сложных маневров ММ типа боковых заносов на поворотах и при движении на уклон, а также обеспечить при этом возможность формирования у экипажей ММ необходимых уровней акселерационной нагрузки.

4. Методы и результаты исследования акселерационного воздействия

Основой создания перспективной конструкции многокоординатного тренажера для экипажей ММ является двухкоординатный модульный электромеханический привод, в котором используются широко регулируемые линейные электрические двигатели с высоко форсированной перегрузочной способностью, и динамическая платформа типа гексапод (рис. 5).

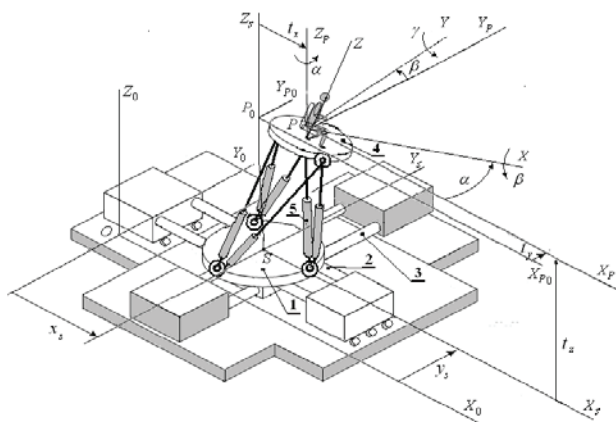


Рис. 5. Расчетная схема кинематики тренажера ММ:
1 — основание (базис) гексапода; 2, 3 — направляющие базиса;
4 — платформа для экипажа; 5 — штанги гексапода

Предлагаемая конструкция тренажера, позволяет увеличить вертикальное перемещение до ± 300 мм; продольное и поперечное смещения до ± 4000 мм; углы крена и тангажа до ± 30 град; угол поворота вокруг вертикальной оси ± 35 град.

На подвижной основе с центром в т. S размещен базис 1 шестистепенной динамической платформы типа гексапод. Две пары опор качения обеспечивают возможность свободного перемещения базиса 1 вдоль координатных направляющих 2 и вместе с ними по направляющим 3. На платформе 4 гексапода в полюсе P расположена кабина тренажера. Базис и платформа соединены между собой посредством сферических шарниров и шести штанг 6 переменной длины. Изме-

нение длин штанг обеспечивают шесть регулируемых линейных электрических двигателей [5, 6].

Введены следующие системы координат:

- неподвижная $OX_0Y_0Z_0$;
- подвижная $SX_sY_sZ_s$, связанная с базисом 1 в центре масс базиса (т. S) и движущаяся поступательно с координатами x_s, y_s относительно неподвижной системы $OX_0Y_0Z_0$;
- подвижная система $PX_pY_pZ_p$ с началом в полюсе P платформы 4, движущаяся поступательно с координатами t_x, t_y, t_z относительно базиса 1 и системы $SX_sY_sZ_s$;
- подвижная система $PXYZ$, связанная неразрывно с подвижной платформой 4 и вращающаяся вокруг полюса P .

Механическая система модульного тренажера (рис. 5) имеет 8 степеней свободы: поступательное движение базиса гексапода вдоль осей OX и OY (координаты x_s и y_s); три поступательных движения системы $PX_pY_pZ_p$ платформы 4 гексапода относительно базиса $SX_sY_sZ_s$ (координаты t_x, t_y и t_z); три вращательных движения платформы (системы $PXYZ$) вокруг осей $PX_pY_pZ_p$ (углы Эйлера-Крылова α, β, γ). Таким образом, указанные 8 обобщенных координат однозначно определяют положение кресла оператора ММ в любой момент времени. Соответствующие уравнения движения платформы имеют вид:

$$x_s = x_s(t), \quad y_s = y_s(t), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_p(t) &= x_s(t) + t_x(t), \quad y_p(t) = y_s(t) + t_y(t), \\ z_p(t) &= t_z(t), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\alpha = \alpha(t), \quad \beta = \beta(t), \quad \gamma = \gamma(t). \quad (3)$$

Для линейных двигателей (координаты x_s, y_s) базиса гексапода предпочтительна позиционная система управления, для которой характерным является подчинение конечной цели — перемещению объекта от начального положения к заданному конечному положению. При этом порядок отработки задания отдельными звеньями и траектории их движения могут быть произвольными либо соответствовать некоторой стратегии движения [7].

Воспроизведение диаграмм движения возможно при использовании аналитических зависимостей, а также методом численного интегрирования (ЧИ) заданной производной высокого порядка. Метод ЧИ и его программная реализация наиболее просты для применения, но, в зависимости от числа точек позиционирования, могут приводить к значительным погрешностям результатов. ЧИ выполняется на интервалах времени, рассчитываемых в зависимости от заданного перемещения, известных ограничений по скорости, ускорению и рывку для линейных электродвигателей с позиционным управлением [7, 8]. Например, при простом методе Эйлера и нулевых начальных условиях в заданном цикле расчетов, получено:

$$a_{i+1} = a_i + \rho_i \cdot \Delta t; \quad v_{i+1} = v_i + a_i \cdot \Delta t; \quad y_{s,i+1} = y_{s,i} + v_i \cdot \Delta t, \quad (4)$$

где Δt — шаг интегрирования; $\rho_i, a_i, v_i, y_{s,i}$ — рывок, ускорение, скорость и координата вдоль оси OY соответственно на i -ом шаге интегрирования.

В общем случае вида диаграммы при позиционном управлении установленные интервалы времени соответствуют: t_1 — положительному скачку рывка (росту ускорения); t_2 — постоянству ускорения; t_3 — отрицательному скачку рывка (уменьшению ускорения); $(t_1+t_2+t_3)$ — разгону; t_4 — движению с постоянной скоростью (установившемуся движению); $(t_5+t_6+t_7)$ — торможению. Цикл отработки двигателем заданной траектории движения представляет собой сумму всех указанных интервалов времени $t_k = \sum_1^7 t_i$ [9].

Циклограмма движения базиса платформы в общем виде содержит 7 последовательных участков и представлена на рис. 6.

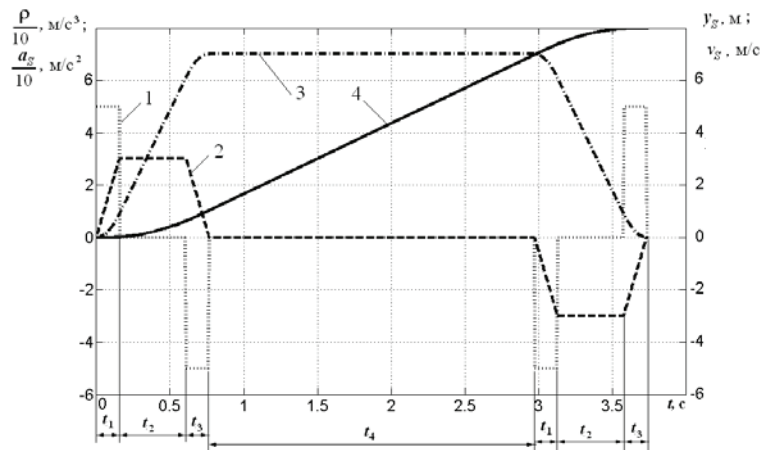


Рис. 6. Кинематические диаграммы для базиса гексапода при перемещении вдоль оси OY : 1 — рывок; 2 — ускорение; 3 — скорость; 4 — перемещение; при следующих установленных ограничениях: $y_{50} = 0$; $y_{5\max} = 8$ м; $v_{\max} = 7$ м/с; $a_{\max} = 5$ м/с²; $\rho_{\max} = 50$ м/с³

Уравнения относительного движения платформы (2) и (3) воспроизводят определенный маневр. Например, уравнения одностороннего бокового заноса ММ с заданным углом бокового крена (рис. 7) имеют вид [10]:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 0(t), \beta = 0, \gamma = \gamma(t), t_2 = h, \\ t_x &= R_p [\sin \gamma_0 - \sin(\gamma_0 - \gamma)], \\ t_y &= R_p [\cos \gamma_0 - \cos(\gamma_0 - \gamma)], \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где γ_0, γ — угол начального и текущего поворота платформы вокруг оси PY (угол бокового крена);

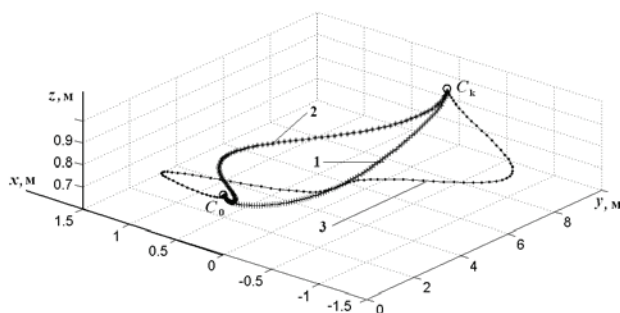


Рис. 7. Траектория центра масс водителя ММ при выполнении бокового заноса: 1 — односторонний занос; 2 — двухсторонний занос; 3 — одновременный двойной занос с движением по уклону 30 град (угол тангажа)

R_p — радиус моделированной траектории бокового заноса; h — высота гексапода, равная расстоянию SP_0 в нулевом положении платформы — при нулевых значениях обобщенных координат (1)–(3).

С учетом уравнений (2) и (5) закон абсолютного движения полюса P платформы при одностороннем боковом заносе определяется решением системы:

$$\left. \begin{aligned} x_p &= x_{pH} + x_s + t_x = R_p [\sin \gamma_0 - \sin(\gamma_0 - \gamma)], \\ y_p &= y_{pH} + t_y = y_s + R_p [\cos \gamma_0 - \cos(\gamma_0 - \gamma)], \\ z_p &= h. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Функция угла бокового крена платформы от времени может быть задана в явном виде (контурное управление), либо посредством циклограммы при таких ограничениях: $\gamma_0 = -30^\circ$; $\gamma_{\max} = 30^\circ$; $\max \dot{\gamma} = 1,5$ с⁻¹; $\max \ddot{\gamma} = 15$ с⁻²; $\max \dddot{\gamma} = 200$ с⁻³.

Уравнения движения центра масс водителя (т. C) с учетом уравнений движения платформы вокруг оси OX , имеют вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_C \\ \dot{y}_C \\ \dot{z}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{x}_{CP} \\ \dot{y}_{CP} \\ \dot{z}_{CP} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где x_{CP}, y_{CP}, z_{CP} — координаты т. C в системе $PXYZ$, связанной с платформой ($x_{CP} = 0$; $y_{CP} = 0$; $z_{CP} = 0,5$ м).

В результате двойного дифференцирования системы (7) по времени получены проекции ускорения т. C на оси неподвижной системы $Ox_0Y_0Z_0$ в виде:

$$\begin{pmatrix} \ddot{x}_C \\ \ddot{y}_C \\ \ddot{z}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot{x}_p \\ \ddot{y}_p \\ \ddot{z}_p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \beta & -\cos \beta \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \end{pmatrix} \cdot \ddot{\beta} - \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \dot{\beta}^2 \cdot \begin{pmatrix} x_{CP} \\ y_{CP} \\ z_{CP} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Уровень акселерационного воздействия на экипаж ММ характеризуется полным ускорением a_c (рис. 8):

$$a_c = \sqrt{\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2 + \dot{z}_c^2}.$$

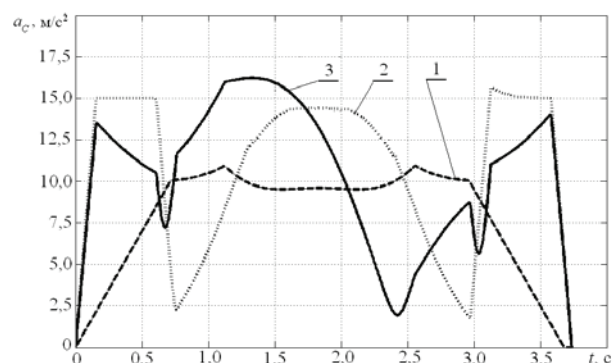


Рис. 8. График акселерационного воздействия на экипаж ММ при выполнении маневра типа «боковой занос»: 1 — односторонний занос; 2 — двухсторонний занос; 3 — двухсторонний занос с уклоном 30 град

Установлено, что при имитации на тренажере бокового заноса с углом крена 30° водитель и экипаж испытывают акселерационные воздействия в диапазоне $2,5...16 \text{ м/с}^2$, что соответствует уровню возможных воздействий при осуществлении нормативных маневров ММ и способствует приобретению навыков вождения в экстремальных условиях.

5. Выводы

1. Предложенная конструкция тренажера на основе гексапода и регулируемых линейных электрических двигателей с высоко форсированной перегрузочной способностью значительно расширяет рабочую зону и объединяет возможности имитации движения ММ по суше со сложным рельефом при отработке нормативных условий маневрования, а также по воде в условиях килевой и бортовой качки корпуса, заносов на поворотах, предельных углов тангажа и крена.

2. Линейный электропривод перемещения основы гексапода расположен на неподвижной площадке, что приводит к уменьшению масс подвижных частей системы и соответствующих сил инерции. Разработана методика определения кинематических характеристик движения основы гексапода при известных ограничениях по скорости, ускорению и рывку для широко регулируемых линейных электрических двигателей с высоко форсированной перегрузочной способностью.

3. На примере воспроизведения тренажером маневра типа боковых заносов при повороте ММ и одновременном движении под уклон выполнено моделирование акселерационного воздействия на экипаж до уровня 16 м/с^2 , что подтверждает возможность управления параметрами движения кабины и применения тренажера для имитации экстремальных режимов маневра.

Литература

- Бачинський, В. В. Оцінка системи рухомості тренажерів бойових машин [Текст] / В. В. Бачинський, В. М. Ярмолюк // Зб. наук. пр. Харківського ун-ту Повітряних Сил. — 2010. — № 1(23). — С. 137–141.
- Прошин, И. А. Тренажер вертолета для подготовки летного экипажа действиям в экстремальных ситуациях [Текст] / И. А. Прошин, В. М. Тимаков, В. Н. Прошкин // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. — 2009. — № 1. — С. 82–87.
- Двокоординатний електромеханічний тренажер стрільця [Електронний ресурс] / Грачов М. М., Толстой О. В., Васильев В. В., Ярмолюк В. М., Поповиченко О. В., Бєліков В. Т. // Патент України № 91298 від 12.07.2010. — Режим доступу: \www/URL: <http://uapatents.com/8-91298-dvokoordinatnijj-elektromekhanichnijj-trenazher-strilzja.html>.
- Багатокоординатний двосторонній модульний електропривод аерокосмічних тренажерних систем [Електронний ресурс] / Яглінський В. П., Васильев В. В., Ковалішин С. С., Фелько М. В., Бєліков В. Т. // Патент України № 104273 від 10.01.2014. — Режим доступу: \www/URL: <http://uapatents.com/16-104273-bagatokoordinatnijj-dvostoronnijj-modulnijj-elektroprivod-aerokosmichnikh-trenazhernikh-sistem.html>.
- Гутиря, С. С. Параметрична надійність механізмів паралельної структури і кінематики типу гексапод [Текст]: матеріали 3-ої міжн. наук. техн. конф. / С. С. Гутиря, В. П. Яглінський, А. Сабах // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудувних конструкцій. — Львів: Кінпатрі ЛТД, 2012. — С. 111–112.
- Gutyrya, S. S. Multi-criterion optimization functional trajectories of industrial robots [Text] / S. S. Gutyrya, V. P. Yaglinsky, O. U. Bezuglenko // Annals of DAAAM International. — Vienna, 2004. — P. 37–38.
- Yaglinsky, V. P. Kinematics of robots with parallel structure [Text] / V. P. Yaglinsky, S. Rost, D. M. Chlizov // MOTROL, Motorization and Power Industry in Agriculture. — Lublin, 2008. — Vol. 10A. — P. 105–114.
- Yaglinsky, V. P. Mechanisms of parallel Structure in modern Machine-Building Manufacture [Text] / V. P. Yaglinsky, S. S. Gutyrya // Les Problemes Contemporains du Technosphere et de la Formation des Cadres D'Ingenieurs, de IV Conf. Intern. Scientifique et Methodique, Hammamet: Tunisie. — Donetsk: DonNTU, 2010. — P. 37–40.
- Yaglinsky, V. P. System criteria analysis and function optimization of industrial robots [Text] / V. P. Yaglinsky, S. S. Gutyrya // TEKA Kom. Mol. Energ. Rohn. — Lublin, 2006. — Vol. 6A. — P. 70–81.
- Яглінський, В. П. Кінематика комбінованого модульного динамічного тренажера [Текст] / В. П. Яглінський, А. Обайді // Технологічний аудит та резерви виробництва. — 2014. — Т. 2, N 1(16). — С. 38–41. — Режим доступу: \www/URL: <http://journals.urau.ua/tarp/article/view/23435>.

ПІДВИЩЕННЯ РУХОМОСТІ КАБІН ДИНАМІЧНИХ ТРЕНАЖЕРІВ МОБІЛЬНИХ МАШИН

Застосування запропонованої конструкції тренажера на основі гексапода з рухомим базисом дозволило збільшити розміри просторової робочої зони та ступінь рухливості, підвищити маневреність і здатність здійснення складних імітаційних рухів кабіни екіпажів мобільних машин (ММ). Розроблено математичні моделі управління параметрами кінематики тренажера, що імітує рух ММ по воді в умовах килевої і бортової качки або по суші зі складним рельєфом.

Ключові слова: гексапод, динамічна платформа, ривок, базис, імітація, маневр.

Яглінський Віктор Петрович, доктор технічних наук, професор, кафедра машинобудування і деталей машин, Одеський національний політехнічний університет, Україна, e-mail: robot8@bk.ru.

Обайді Аїмен Сабах, аспірант, кафедра машинобудування і деталей машин, Одеський національний політехнічний університет, Україна, e-mail: robot8@bk.ru.

Фелько Николай Вячеславович, старший науковий співробітник, Военная Академия, Одесса, Україна, e-mail: stealth72@ukr.net.

Яглінський Віктор Петрович, доктор технічних наук, професор, кафедра машинознавства і деталей машин, Одеський національний політехнічний університет, Україна.

Обайді Аїмен Сабах, аспірант, кафедра машинознавства і деталей машин, Одеський національний політехнічний університет, Україна.

Фелько Микола Вячеславович, старший науковий співробітник, Військова Академія, Одеса, Україна.

Yaglinsky Victor, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: robot8@bk.ru.

Obaidi Aymen Sabach, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: robot8@bk.ru.

Felko Nicholas, Military Academy, Odessa, Ukraine, e-mail: stealth72@ukr.net