

А.С. ОБАЙДИ, аспирант каф. М и ДМ ОНПУ, Одесса

## ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ АКСЕЛЕРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТРЕНАЖЕРЕ-ГЕКСАПОДЕ

Разработаны математические модели управления параметрами кинематики тренажера-гексапода на подвижном основании, имеющего восемь степеней свободы. Управление боевыми мобильными машинами весьма сложная и опасная операция, требующая принятия быстрых решений по удержанию курса и мгновенных реакций по изменению движения воздействием на органы управления. Поэтому имитация процесса управления мобильными машинами и приводными устройствами перемещений кабины тренажера является актуальной проблемой. Определены уровни акселерационной нагрузки на экипаж, возникающие при движении по суше со сложным рельефом с осуществлением маневра.

**Ключевые слова:** динамическая платформа, модель, имитация, маневр.

**Введение.** Одним из основных факторов, влияющих на экипажи мобильных машин (ММ) при выработке навыков вождения в сложных погодных и рельефных условиях, является силовое (акселерационное) воздействие. Ошибки при обучении на реальных объектах приводят к чрезвычайным последствиям и 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 имитация процесса управления ММ приводными устройствами перемещений кабины тренажера должна удовлетворять сложному комплексу противоречивых требований: высокой точности обработки входного сигнала, быстрдействию и плавности реализации всех заданных движений, что является актуальной научной проблемой.

**Анализ известных исследований.** В известных учебных тренажерных центрах Украины (Одесса, Измаил, Херсон и др.) применяются комплексные серийные тренажеры типа "Мостик" компании "Транзас Украина", "Транзас", "3D Ходовой мостик" и др. Основным их недостатком является то, что силовое (акселерационное) воздействие на экипаж на таких тренажерах не имитируется.

Известны также динамические тренажеры на основе гексапода (рисунок 1).

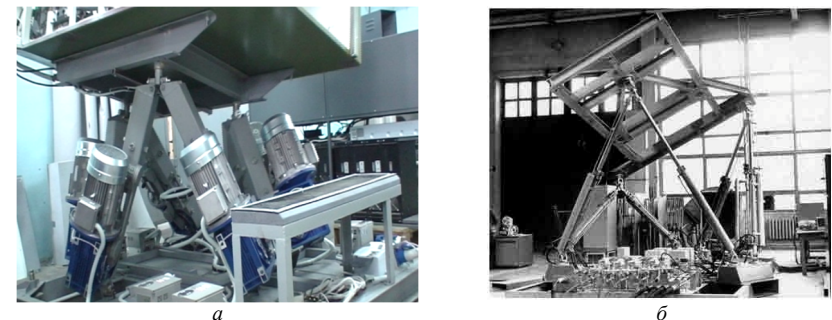


Рисунок 1 – Шестистепенные динамические платформы НПП "Энергия 2000":  
а – тип 6ПД8; б – тип ДС6-1

© А.С. Обайди, 2015

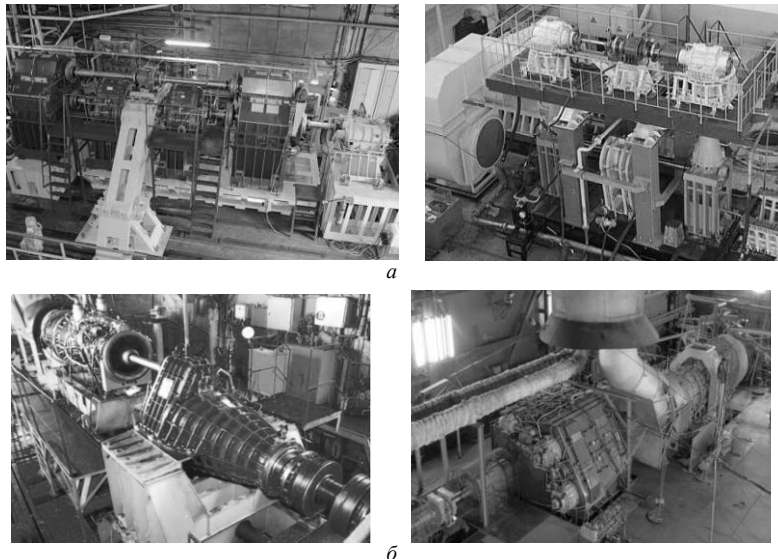


Рисунок 4 – Стенды для испытаний редукторов

а – стенды замкнутого контура; б – стенды со снятием нагрузки на гидротормоз

Кроме того, при создании новых редукторов используются наиболее прогрессивные методы поузловой (поэлементной, опережающей) доводки, когда к моменту изготовления первого образца вновь спроектированного (пилотного) редуктора большинство ее элементов и узлов уже испытаны на специальных статических и динамических стендах. На таких стендах испытывается и проверяется работоспособность подшипников качения и скольжения, уплотнительных элементов; выполняются статические испытания зубчатых зацеплений и различных муфт (дисковых, зубчатых); проверяются собственные частоты колебаний дисков зубчатых колес и муфт методом голографической интерферометрии и т.д.

### Выводы:

1. Созданные в ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект" редукторы по своим характеристикам не уступают лучшим мировым образцам.
2. Мощность редукторного производства и квалификация его сотрудников дают возможность наладить производство зубчатых передач для любых отраслей промышленности Украины, а также выполнять большие объемы зарубежных заказов.

**Список литературы:** 1. Каталог выпускаемых изделий ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект". УкрОборонПром. – Николаев, 2012. – 10с. 2. Николаевские газотурбинные двигатели и установки. История создания // ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект", Центр НИОКР "Машпроект"; Под общ. ред. докт.техн. наук В.И. Романова. – Николаев: Изд-во "Юг-Информ", 2005. – 302с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Katalog vyпускаemym izdelij GP NPKG "Zorja"- "Mashproekt". UkrOboronProm. – Nikolaev, 2012. – 10p. 2. Nikolaevskie gazoturbinnye dvigateli i ustanovki. Istorija sozdaniya // GP NPKG "Zorja"- "Mashproekt", Centr NIOKR "Mashroekt"; Pod obshh. red. dokt.tehn.nauk V.I.Romanova. – Nikolaev: Izd-vo "Jug-Inform", 2005. – 302p.

Поступила (received) 28.04.2015

Шестистепенной стэнд представляет собой пространственно-кинематическую схему из шести механизмов параллельной структуры и кинематики (МПСК) – 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. Шестистепенные тренажеры имеют повышенную подвижность по сравнению с трехстепенными 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  $\pm 100\text{мм}$ ; продольное и поперечное смещения  $\pm 300\text{мм}$ ; углы крена и тангажа  $\pm 20\text{град}$ ; угол поворота вокруг вертикальной оси  $\pm 30\text{град}$ . Недостатком такой конструкции является взаимовлияние приводов на перераспределение массы подвижной платформы и размещенного на ней груза на каждой из приводов, что значительно ухудшает работу и отрицательно влияет на динамические характеристики приводов. Недостатком тренажера также является невозможность имитирования сложных маневров типа тангаж, заносы, преодоление препятствий. Для устранения этого требуется значительно увеличить рабочую зону, запас по усилиям приводов, исследовать имитацию маневра и уровень акселерационной нагрузки на экипаж.

**Цель и задачи исследования.** 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. 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.

**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 (рисунок 2). Предлагаемая конструкция тренажера, позволяет увеличить вертикальное перемещение до  $\pm 300\text{мм}$ ; продольное и поперечное смещения до  $\pm 4000\text{мм}$ ; углы крена и тангажа до  $\pm 30\text{град}$ ; угол поворота вокруг вертикальной оси  $\pm 35\text{град}$ .

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

Введены следующие системы координат (рисунок 3): 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 (см. рисунок 3) 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  $\alpha, \beta, \gamma$ ). Соответствующие уравнения движения платформы имеют вид:

$$x_s = x_s(t); y_s = y_s(t). \quad (1) \quad x_p(t) = x_s(t) + t_x(t); y_p(t) = y_s(t) + t_y(t); z_p(t) = t_z(t). \quad (2)$$

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

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

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

где  $\Delta t$  – шаг интегрирования;  $\rho_i, a_i, v_i, y_{s,i}$  – рывок, ускорение, скорость и координата вдоль оси  $Oy$  соответственно на  $i$ -м шаге интегрирования.

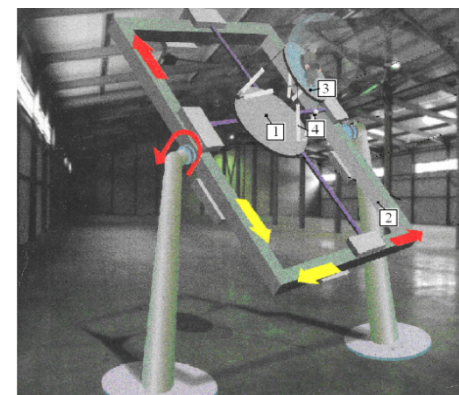


Рисунок 2 – Модель тренажера на основе динамической платформы комбинированного модульного типа (патент Украины, 104273) [8]

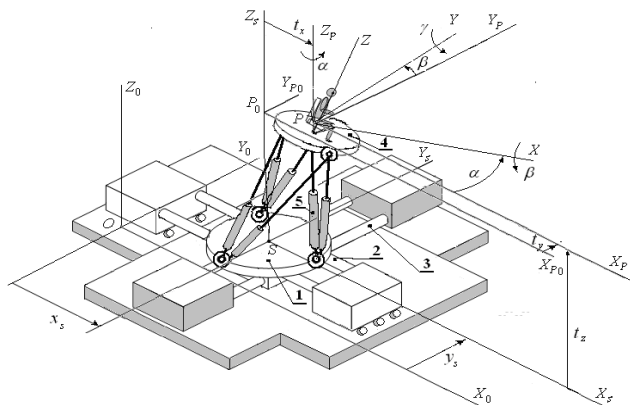


Рисунок 3 – Расчетная схема кинематики тренажера ММ:  
1 – базис гексапода; 2, 3 – направляющие базиса; 4 – платформа для экипажа; 5 – штанги гексапода

можно. Цикл отработки двигателем заданной траектории движения представляет собой сумму всех указанных интервалов времени  $t_k = \sum_1^7 t_i$  [9].

Уравнения относительного движения платформы (2) и (3) воспроизводят определенный маневр. Например, уравнения одностороннего бокового заноса ММ с заданным углом бокового крена (рисунок 4) имеют вид [10]

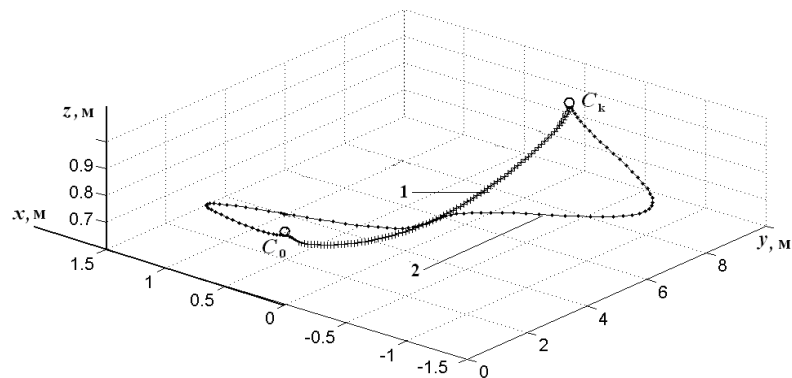


Рисунок 4 – Траектория центра масс водителя ММ при выполнении бокового заноса: 1 – односторонний занос; 2 – одновременный двойной занос с движением по уклону 30 град (угол тангажа)

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

где  $\gamma_0, \gamma$  – угол начального и текущего поворота платформы вокруг оси  $PV$  (угол бокового крена);  $R_p$  – радиус моделированной траектории бокового заноса;  $h$  – высота гексапода, равная расстоянию  $SP_0$  в нулевом положении платформы – при нулевых значениях обобщенных координат (1), (2), (3).

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.

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:  $\beta_0 = -30^\circ; \beta_{\max} = 30^\circ; \max \dot{\beta} = 5c^{-1}; \max \ddot{\beta} = 25c^{-2}; \max \dddot{\beta} = 200c^{-3}$ .

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

$$\begin{pmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{CP} \\ y_{CP} \\ z_{CP} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где  $x_{CP}, y_{CP}, z_{CP}$  – координаты точки  $C$  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 точки  $C$  на оси неподвижной системы  $OX_0Y_0Z_0$  в виде

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

Уровень акселерационного воздействия на экипаж ММ характеризуется полным ускорением  $a_c$  (рисунок 5)

$$a_c = \sqrt{\ddot{x}_C^2 + \ddot{y}_C^2 + \ddot{z}_C^2}.$$

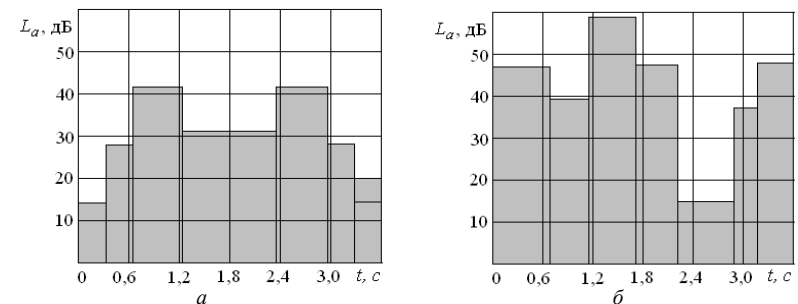


Рисунок 5 – График акселерационного воздействия на экипаж ММ при выполнении маневра типа "боковой занос":  
а – односторонний занос; б – двухсторонний занос с уклоном 30 град

Установлено, что при имитации на тренажере бокового заноса без уклона (тангажа) водитель и экипаж испытывают акселерационные воздействия на уровне, не превышающем 45дБ, а при выполнении тангажа (30град) совместно с двусторонним заносом – в среднем диапазоне 45...60дБ.

При определении уровня акселерационной нагрузки на экипаж базовым значением для ускорений принято  $10^{-4} \text{ м/с}^2$ . Результаты исследований свидетельствуют, что уровни воздействий на экипаж соответствует уровню возможных воздействий при осуществлении нормативных маневров ММ и способствует приобретению навыков вождения в экстремальных условиях.

#### Выводы:

1. Значительное расширение рабочей зоны тренажера-гексапода получено применением предложенной конструкции с высоко форсированной перегрузочной способностью двигателей, что способствует имитации движения ММ по суше со сложным рельефом при отработке нормативных условий маневрирования.

2. Разработана методика определения кинематических характеристик движения основы гексапода и подвижной платформы.

3. На примере воспроизведения тренажером маневра типа боковых заносов при повороте ММ и одновременном движении с уклона и под уклон выполнено моделирование акселерационного воздействия на экипаж до уровня 60дБ, что подтверждает возможность управления параметрами движения кабины и применения тренажера для имитации экстремальных режимов маневра.

**Список литературы:** 1. *Бачинський В.В., Ярмолюк В.М.* Оцінка системи рухомості тренажерів бойових машин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2010. – №1(23). – С.137-141. 2. *Ягліньский В.П., Обайди А.С., Фелько Н.В.* Повышение подвижности кабин динамических тренажеров мобильных машин // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – 3/4(17). – С.44-48. 3. *Кузнецов Ю.М., Дмитриев Д.О., Диневиц Г.Ю.* Компонировки верстаков с механизмами параллельной структуры. – Херсон: ИП Вышемырський В.С., 2009. – 456с. 4. *Глазунов В.А., Колыска А.Ш., Крайнев А.Ф.* Пространственные механизмы параллельной структуры – М.: Наука, 1991. – 95с. 5. *Merlet J.P.* Parallel Robots – The Netherlands, Dordrecht: Springer, 2006. – 417 p. 6. *Ягліньский В.П., Гутыря С.С.* Надійність авіаційного тренажера на основі гексапода при екстремальних навантаженнях // Вісн. СевНТУ. Механіка, енергетика, екологія. – 2011. – Вип.120. – С.196-205. 7. *Ягліньский В.П., Обайди А.С.* Кінематика комбінованого модульного динамічного тренажера // Технологічний аудит і резерви виробництва. – 2014. – №2/1(16). – С.38-41. 8. Патент України № 104273. Багатокоординатний двосторонній модульний електропривод аерокосмічних тренажерних систем / *Ягліньский В.П., Васильев В.В., Ковалішин С.С., Фелько М.В., Беліков В.Т.* // – 10.01.2014. Режим доступу: [www/URL: http://uapatents.com/16-104273-bagatokoordinatnij-dvos-toronnij-modulnij-elektroprivod-aerokosmichnikh-trenazhemikh-sistem.html](http://uapatents.com/16-104273-bagatokoordinatnij-dvos-toronnij-modulnij-elektroprivod-aerokosmichnikh-trenazhemikh-sistem.html). 9. Патент України №108055. Багатокоординатний силовий тренажер стрільця з комбінованими електромеанічними приводами / *Фелько М.В., Ягліньский В.П., Кравчук О.І., Ковалішин С.С., Беліков В.Т.* // – 10.03.2015. Режим доступу: [http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=view\\_details&ldClaim=210056](http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=view_details&ldClaim=210056).

**Bibliography (transliterated):** 1. *Bachyns'kyi V.V., Yarmolyuk V.M.* Otsinka systemy rukhomosti trenazheriv boyovykh mashyn // Zbimyky naukovykh prats' Kharkivskoho universytetu Povitryanykh Syl. – 2010. – №1(23). – P.137-141. 2. *Yaglin'skyi V.P., Obaydy A.S., Fel'ko N.V.* Povyshenye podvyzhnosti kabin dynamicheskyykh trenazherov mobil'nykh mashyn // Tekhnolohycheskyy audyt y rezervy proyzvodstva. – 2014. – 3/4(17). – P.44-48. 3. *Kuznetsov Yu.M., Dmitriyev D.O., Dinevich H.Yu.* Komponenty verstativ z mekhanizmayu paralel'noyi struktury – Kherson: PP Vyshemyr'skyi V.S., 2009. – 456p. 4. *Hlazuinov V.A., Kolyyskor A.Sh., Kraynev A.F.* Prostranstvennyye mekhanizmy paralel'noy struktury – Moscow: Nauka, 1991. – 95p. 5. *Merlet J.P.* Parallel Robots. – The Netherlands, Dordrecht: Springer, 2006. – 417p. 6. *Yaglin'skyi V.P., Gutyrja S.S.* Nadiynist' aviatsiynoho trenazhera na osnovi heksapoda pry ekstremal'nykh navantazhennyakh // Visn. SevNTU. Mekhanika, enerhetyka, ekolohiya. – 2011. – Vol.120. – P.196-205. 7. *Yaglin'skyi V.P., Obaydy A.S.* Kinematyka kombinovanoho modul'nogo dynamichnoho trenazhera // Tekhnolohycheskyy audyt y rezervy proyzvodstva. – 2014. – №2/1(16). – P.38-41. 8. Patent Ukrayiny No 104273. Bahatokoordinatnyy dvostoronniy modul'nyy elektroprivod aerokosmichnykh trenazhemikh system / *Yaglin'skyi V.P., Vasylyev V.V., Kovalishyn S.S., Fel'ko M.V., Belikov V.T.* // – 10.01.2014. Rezhym dostupu: [www/URL: http://uapatents.com/16-104273-bagatokoordinatnij-dvos-toronnij-modulnij-elektroprivod-aerokosmichnikh-trenazhemikh-sistem.html](http://uapatents.com/16-104273-bagatokoordinatnij-dvos-toronnij-modulnij-elektroprivod-aerokosmichnikh-trenazhemikh-sistem.html). 9. Patent Ukrayiny No108055. Bahatokoordinatnyy sylovyy trenazher stril'tsya z kombinovanymy elektromechanichnymy pryvodamy / *Fel'ko M.V., Yaglin'skyi V.P., Kravchuk O.I., Belikov V.T.* // – 10.03.2015. Rezhym dostupu: [www/URL: http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=view\\_details&ldClaim=210056](http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=view_details&ldClaim=210056).

Поступила (received) 19.05.2015

**А.П. ПОПОВ**, д.т.н., проф., заведующий каф. механики и конструирования машин НУК им. адм. Макарова, Николаев;  
**Л.А. ПОПОВА**, научный сотрудник НУК им. адм. Макарова  
**А.М. МЕДВЕДОВСКИЙ**, к.т.н., профессор НУК им. адм. Макарова;  
**О.И. САВЕНКОВ**, ассистент НУК им. адм. Макарова

## НЕЛИНЕЙНАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАЦЕПЛЕНИЮ ПРЯМЫХ ЗУБЬЕВ

Впервые представлены результаты теоретических исследований контактной прочности традиционных зубчатых передач с прямыми зубьями с учётом нелинейной взаимосвязи между упругими перемещениями (деформациями) зубьев и возникающими при этом напряжениями. При этом определены зависимости максимальных контактных напряжений  $\sigma_H$  и полуширины  $b_0$  прямоугольной площадки контакта. Показано, что величина напряжений  $\sigma_H$  в рассматриваемом случае несколько превышает таковую, имеющую место при отсутствии указанной нелинейности. В соответствии со сказанным величина  $b_0$ , наоборот, несколько превышает аналогичную ширину, характерную для случаев отсутствия рассматриваемой нелинейности.

**Ключевые слова:** зубчатая передача, зубья, контакт, напряжения, нагрузочная способность.

**Постановка проблемы.** Контактная прочность зубьев является одним из основных критериев работоспособности зубчатых передач. Следует отметить, что расчет зубчатых передач на контактную прочность, предусматривающий определение максимальных контактных напряжений, осуществляется по общеизвестной формуле Герца применительно к модели контакта двух упруго сжатых цилиндров с радиусами  $\rho_1$  и  $\rho_2$  в полюсе зацепления [1].

Однако расчет указанных напряжений по формуле Герца не сразу нашел своё применение. Так, например, А.И. Петрусевич [2] в тридцатые годы прошлого столетия предлагал определять максимальные контактные напряжения в зубчатых передачах, исходя не из эллиптического закона распределения деформаций, положенного в основу решения задачи Герца, а из параболического. При параболическом законе изменения контактных деформаций и, как следствие, контактных напряжений, максимальные контактные напряжения выше таковых при эллиптическом законе изменения напряжений при коэффициентах Пуассона  $\nu_1 = \nu_2 = \nu$  и модулях упругости материалов  $E_1 = E_2 = E$  в 0,454/0,418 = 1,086 раза [3].

Из сказанного и анализа существующих источников информации по зубчатым передачам следует, что метод расчета контактных напряжений не претерпел каких-либо изменений, связанных с увеличением либо уменьшением определяемых величин максимальных контактных напряжений. В связи с этим предлагаемое ниже решение контактной задачи является первой попыткой по установлению влияния нелинейной зависимости между деформациями и напряжениями на определяемые величины максимальных контактных напряжений.

**Анализ последних исследований.** Наиболее полно исследования по данной проблеме изложены в [3]. Данные исследования базируются на основе новой теории контактной прочности упруго сжатых тел, разработанной проф. А.П. Поповым, а также на новых технических решениях, защищенных патентами на изобретения.

**Цель работы.** Основная цель работы – доказательство влияния нелинейной зависимости между упругими контактными деформациями зубьев и возникающими при этом напряжениями. Основа доказательства построена на

© А.П. Попов, Л.А. Попова, А.М. Медведовский, О.И. Савенков, 2015