

6. Зимин, М. И. Прогнозирование опасных процессов на основе бионического подхода и его использование в системах автоматизации проектирования /М. И. Зимин // Естественные и технические науки. – 2011. – № 3. – С. 407 – 414.

7. Колемаев, В. А. Теория вероятностей в примерах и задачах / В. А. Колемаев. – М.: Государственный университет управления, 2001. – 87 с.

8. Пискунов, Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисление/ Н. С. Пискунов. – Т. 2. – М.: Наука, 1978. – 576 с.

SELECTION OF CONCEPT OF ROADS PROTECTION AGAINST AVALANCHES

M. I. Zimin

Abstract. The article dwells upon the conceptual design of antiavalanche protection of roads in highlands. The developed technologies allow to optimize protection against avalanches and avoid unjustified losses. Indeterminate-stochastic analysis is used. Relief, meteorological and seismic factors are taken into account. Weather databases are worked out for each avalanche site on each data. Besides, the relieves' database is developed for zones of origin and transit. According to them, for all years there is calculated a degree of situation's belonging to different levels of avalanche's danger. The avalanche pressure on the road is calculated. Example of analysis is given.

Keywords: road, avalanche, protection, earthquake, snow, optimization.

Reference

1. Voikovskiy K. F. *Lavinovedenie* [Avalanche studies]. Moscow, MGU, 1989. 158 p.

2. Poljakov, S. V. *Posledstviya sil'nyh zemletrjasenij* [Consequences of strong earthquakes]. Moscow, Strojizdat, 1978. 311 p.

3. Soburn A. Earthquake protection / A. Coburn, R. Spence. Chichester: John Wiley&Sons Ltd., 1992. – 355 p.

4. Zimin M. I. *Prognozirovanie lavinnoj opasnosti. Rukovodjashhij dokument RD 52.37.612-2000* [Forecasting of avalanche danger. The leading document RD 52.37.612-2000]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2000. 16 p.

5. Ontario's 2006 Building Code. V. 1. - Toronto: Ministry of Municipal Affairs and Housing, 2008.

6. Zimin M. I. *Prognozirovanie opasnyh processov na osnove bionicheskogo podhoda i ego ispol'zovanie v sistemah avtomatizacii proektirovanija* [Forecasting of dangerous processes on the basis of bionic approach and its use in computer-aided engineering systems]. *Estestvennye i tehicheskie nauki*, 2011, no 3. pp. 407 – 414.

7. Kolemaev V. A. *Teorija verojatnostej v primerah i zadachah* [Probability theory in examples and tasks]. Moscow, Gosudarstvennyj universitet upravlenija, 2001. 87 p.

8. Piskunov N. S. *Differencial'noe i integral'noe ischislenie* [Differential and integrated calculus]. Moscow, Nauka, 1978. 576 p.

Зимин Михаил Иванович (Канада, г. Торонто) – кандидат технических наук, доктор РАЕН, профессор РАЕН, инженер(Канада, Торонто, e-mail: ziminz7@yandex.ru).

Zimin Mikhail Ivanovich (Canada, Toronto) – candidate of technical sciences, doctor of the Russian Academy of Natural Sciences, professor of the Russian Academy of Natural Sciences, the engineer (Canada, Toronto, e-mail: ziminz7@yandex.ru).

УДК 681.5:621.878.23-182.38

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БУЛЬДОЗЕРА С ПОЛУЖЕСТКОЙ ПОДВЕСКОЙ

И. В. Лазута, Е. Ф. Лазута
ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

Аннотация. В данной статье приводится математическое описание сложной динамической системы бульдозера с полужесткой подвеской рамы. Автором предложена математическая модель, состоящая из уравнений геометрических связей элементов машины и дифференциальных уравнений перемещения рамы машины и рабочего органа при внешних кинематических и динамических воздействиях. Значительное внимание в представленной математической модели уделяется зависимостям между множеством конструктивных параметров машины.

Ключевые слова: динамика, математическая модель, бульдозер, полужесткая подвеска, дифференциальное уравнение, кинематическая связь.

Введение

Современное развитие машиностроения в Российской Федерации должно соответствовать и даже опережать зарубежные направления в данной области. Для этого необходимо при разработке новых

образцов техники использовать весь научный потенциал высших школ. Современное проектирование строительных и дорожных машин должно опираться как на классические методы расчета конструкции, так и на передовые методы компьютерного

моделирования, анализа и синтеза сложных динамических систем, таких как бульдозерный агрегат. Только так можно повысить конкурентоспособность и эффективность отечественной техники. Поэтому актуальность математического моделирования в области машиностроения не вызывает сомнения.

Математическое описание бульдозера с полужесткой подвеской рамы

При математическом описании бульдозера благодаря допущениям рассматривается минимальное число параметров, оказывающих принципиальное воздействие на изменение динамики базовой машины и рабочего органа [1]. Бульдозер представлен упрощенно в виде многосвязника (рис. 1), содержащего рабочий орган (отвал), навесное оборудование, ходовое оборудование, подвеску ходового оборудования и раму машины [2, 3, 4, 5].

Ходовое оборудование бульдозера, как для правой, так и для левой колеи движется по поверхности, сформированной кромкой рабочего органа [1]:

$$Z_H(t) = Z_{PO}(t - \tau_{L1}); \quad (1)$$

$$\tau_{L1} = L_1/V_{BA}, \quad (2)$$

где Z_H – вертикальная координата не сглаженной обработанной поверхности по колее движения; τ_{L1} – время транспортного запаздывания от кромки рабочего органа до передних опорных катков, V_{BA} – скорость движения машины.

Сглаживающая способность гусеничного ходового оборудования при движении по поверхности, сформированной рабочим органом, как для правой, так и для левой колеи движения заключается в усреднении координат неровностей на площадке контакта, равной расстоянию между передним и задним катком тележки L и описывается уравнением [1]:

$$Z_C(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_{t_0}^{t_0+\tau_L} Z_H(t) dt; \quad (3)$$

$$\tau_L = L/V_{BA}, \quad (4)$$

где Z_C – вертикальная координата сглаженных воздействий обработанной поверхности на опорные катки; τ_L – время транспортного запаздывания от передних до задних опорных катков.

Для определения изменения положения опорных катков при изменении вертикальной координаты сглаженной опорной поверхности $Z_C(t)$ воспользуемся методикой Кузина [6]. Будем рассматривать опорные катки в

качестве абсолютно жесткой балки, имеющей следующие координаты Z_A – вертикальное перемещение переднего опорного катка, Z_B – вертикальное перемещение заднего опорного катка (рис. 2).

Рассмотрев изменение положения балки АВ при различных значениях координаты X_0 точки А, Составим систему дифференциальных уравнений в операторной форме, описывающую перемещение катков тележки при вертикальной координате сглаженных воздействий обработанной поверхности $Z_C(t) \geq 0$ и при $Z_C(t) < 0$ [1]:

$$Z_A = \begin{cases} Z_C \left[1 + \frac{k_1}{p} (1 - e^{-\tau_K \cdot p}) - k_2 \cdot e^{-\tau_K \cdot p} \right] n p u Z_C(t) \geq 0; \\ Z_C e^{-\tau_K \cdot p} n p u Z_C(t) < 0; \end{cases} \quad (5)$$

$$Z_B = \begin{cases} Z_C e^{-\tau_K \cdot p} n p u Z_C(t) \geq 0; \\ Z_C \left[k_3 \cdot e^{-\tau_K \cdot p} + \frac{k_4}{p} (e^{-\tau_K \cdot p} - e^{-\tau_L \cdot p}) + e^{-\tau_L \cdot p} \right] n p u Z_C(t) < 0; \end{cases} \quad (6)$$

$$k_1 = \frac{V_{BA}}{L - l_K}; k_2 = \frac{l_K}{L - l_K}; k_3 = -\frac{L - l_K}{l_K};$$

$$k_4 = \frac{V_{BA}}{l_K}; \tau_K = \frac{l_K}{V_{BA}}; \tau_L = \frac{L}{V_{BA}}, \quad (7)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты передачи; τ_K – время транспортного запаздывания от переднего опорного катка до точки опрокидывания; τ_L – время транспортного запаздывания от переднего до заднего опорного катка, p – оператор Лапласа.

При математическом описании динамических свойств полужесткой подвески рамы машины применяется расчетная схема (рис. 3). Подвеска бульдозера в виде упруго-вязкого элемента с приведенными коэффициентами жесткости $c_{пп}$ и вязкого трения $b_{пп}$ (элемент Кельвина-Фохта) воспринимает силу реакции грунта на рабочий орган, вызывая его заглубление или выглубление и перемещения рамы через навесное оборудование.

Для вертикальных перемещений точки подвески, как для правой, так и для левой стороны рамы воспользуемся принципом Даламбера для одномассовой колебательной системы [1, 7]:

$$F_P = F_{cпп} + F_{bпп} + F_Z, \quad (8)$$

где F_P – сила, действующая на элемент подвески со стороны подрессоренной массы БА; $F_{cпп}$ – сила сопротивления упругого элемента подвески; $F_{bпп}$ – сила сопротивления вязкого элемента подвески; F_Z

– сила, прикладываемая к раме через навесное оборудование от вертикальной составляющей силы реакции грунта на рабочий орган F_{ZPO} .

Сила, действующая на элемент подвески со стороны подрессоренной рамы, вычисляется исходя из пропорционального распределения массы рамы M_P между левой и правой стороной машины [1]:

$$F_P = \frac{1}{2} M_P \left(\frac{L - l_K}{L} \right) \frac{d^2 Z_{II}}{dt^2}. \quad (9)$$

Силы, возникающие при деформации упруго-вязкого элемента подвески Δ_Z , как для правой, так и для левой стороны рамы машины:

$$F_{cnn} = c_{nn} \cdot \Delta_Z; \quad (10)$$

$$F_{bnn} = b_{nn} \cdot \frac{d\Delta_Z}{dt}, \quad (11)$$

$$\Delta_Z = Z_A - Z_{II}. \quad (12)$$

Сила, прикладываемая к правой и левой стороне рамы машины через навесное оборудование от рабочего органа, вычисляется через плечи сил относительно заднего опорного катка [1]:

$$F_Z = \frac{F_{Zpp}(L_1 + L)}{2L}. \quad (13)$$

После подстановки выражений (9 – 13) в уравнение (8) и выполнения некоторых преобразований получим:

$$\begin{aligned} \frac{M_P}{2} \left(\frac{L - l_K}{L} \right) \frac{d^2 Z_{II}}{dt^2} + b_{nn} \frac{dZ_{II}}{dt} + c_{nn} Z_{II} = \\ = c_{nn} Z_A + b_{nn} \frac{dZ_A}{dt} + \frac{F_{Zpp}(L_1 + L)}{2L}. \end{aligned} \quad (14)$$

В операторном виде уравнение (14) запишется в виде:

$$(T_{1n}^2 \cdot p^2 + T_{2n} \cdot p + 1) \cdot Z_{II} = Z_A (1 + T_{2n} \cdot p) + k_{1n} \cdot F_{Zpp}, \quad (15)$$

где T_{1n} и T_{2n} – постоянные времени динамической системы; k_{1n} – коэффициент передачи.

Продольные и поперечные колебания рамы бульдозера оказывают непосредственное воздействие на положение рабочего органа, так как он жестко связан с рамой навесным оборудованием. Пространственная расчетная схема бульдозера (рис. 1) позволяет выявить нужные уравнения геометрических связей [1]:

$$Z_{PO} = (Z_{POП} + Z_{POЛ}) / 2; \quad (16)$$

$$\beta_{PO} = \arctg((Z_{POП} - Z_{POЛ}) / L_2); \quad (17)$$

$$Z_{POП} = Z_K + (L_1 + l_K) \cdot \tg \alpha_{BA} + \frac{L_2}{2} \cdot \tg \beta_{BA} + S_{ШТП} \cdot K_{gz}; \quad (18)$$

$$Z_{POЛ} = Z_K + (L_1 + l_K) \cdot \tg \alpha_{BA} - \frac{L_2}{2} \cdot \tg \beta_{BA} + S_{ШТП} \cdot K_{gz}. \quad (19)$$

$$K_{gz} = \cos \theta \cdot l_B / l_{PO}, \quad (20)$$

$$\beta_{BA} = \arctg((Z_{ВП} - Z_{ВЛ}) / L_2); \quad (21)$$

$$Z_K = Z_{П} - \tg \alpha_{BA} \cdot l_K = Z_{П} - l_K ((Z_{П} - Z_B) / L); \quad (22)$$

$$\alpha_{BA} = \arctg((Z_{П} - Z_B) / L), \quad (23)$$

$$Z_{П} = (Z_{ПП} + Z_{ПЛ}) / 2; \quad (24)$$

$$Z_B = (Z_{ВП} + Z_{ВЛ}) / 2, \quad (25)$$

где α_{BA} – угол продольного наклона рамы машины относительно оси X_0 , β_{BA} – угол поперечного наклона рамы машины, $S_{ШТП}$ и $S_{ШТЛ}$ – перемещение штока правого и левого гидроцилиндра соответственно, L – расстояние от передних до задних опорных катков (опорная база машины), L_1 – расстояние от кромки рабочего органа до передних опорных катков; L_2 – ширина базы машины, l_K – расстояние от передних опорных катков до центра масс машины, $Z_{ПП}$ и $Z_{ПЛ}$ – координата переднего правого и переднего левого края подрессоренной рамы, $Z_{ВП}$ и $Z_{ВЛ}$ – координата заднего правого и заднего левого опорного катка, K_{gz} – коэффициент передачи навесного оборудования от выдвижения штока гидроцилиндра, θ – угол наклона гидроцилиндра к оси Z_0 , l_B – горизонтальное расстояние от шаровой опоры бруса до кромки рабочего органа, l_{PO} – горизонтальное расстояние от шаровой опоры бруса до точки крепления гидроцилиндра к навесному оборудованию.

Выражения (15) и (21-23) позволяют составить структурную схему математической модели вертикальных и угловых перемещений рамы бульдозера при внешних кинематических и динамических воздействиях (рис. 4) [8]. Таким образом, разработанная математическая модель трехточечной подвески рамы бульдозера может применяться как для полужестких, так и для жестких ходовых систем промышленных тракторов.

Общая математическая модель бульдозера с полужесткой подвеской рамы может быть представлена в виде блок-схемы (рис. 5) [8]. Модель позволяет учитывать множество конструктивных особенностей машины при изучении её динамических свойств и процесса формирования обрабатываемой поверхности рабочим органом.

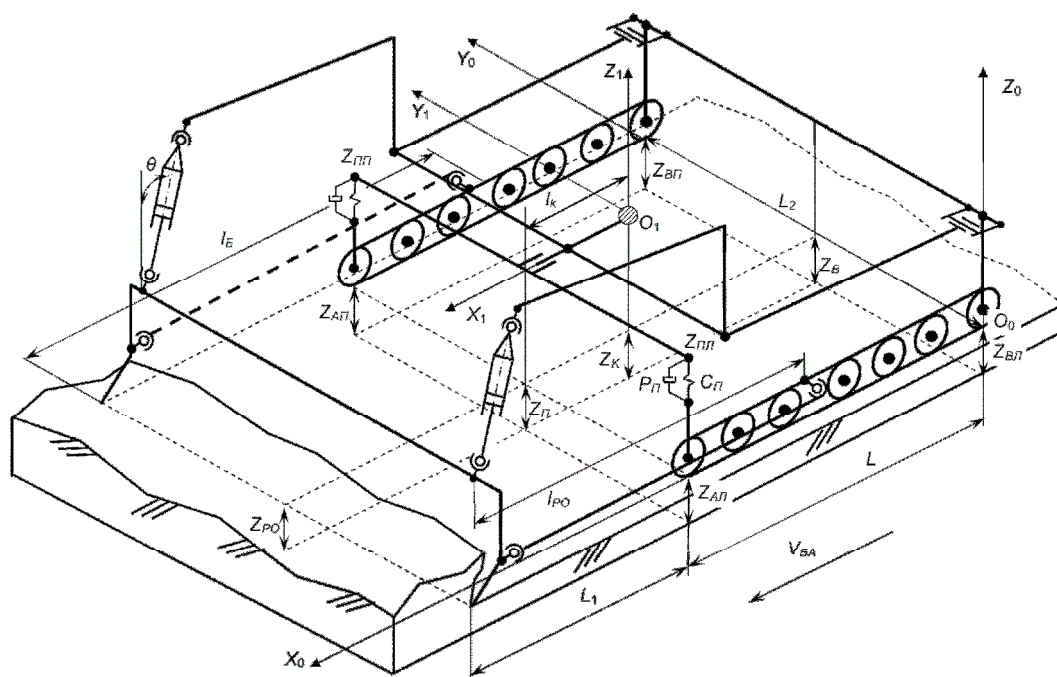


Рис. 1. Пространственная расчетная схема бульдозера

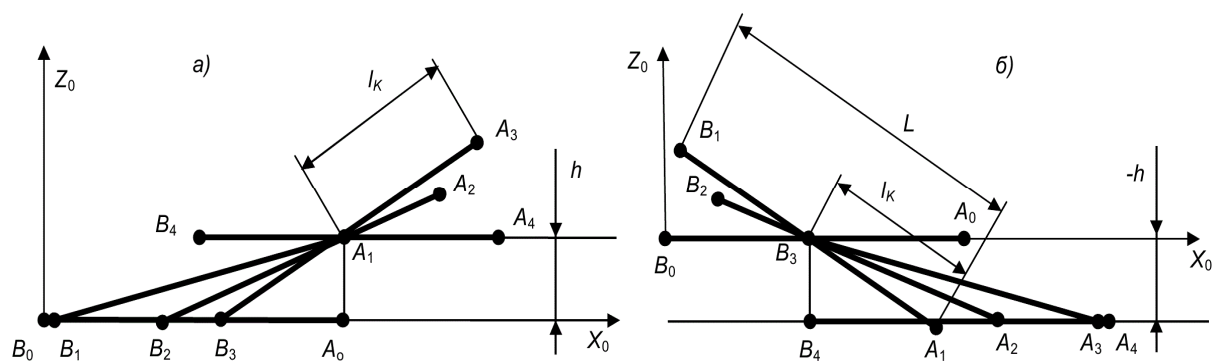


Рис. 2. Расчетные схемы перемещение опорных катков:
а) при наезде на ступенчатую неровность; б) при съезде со ступенчатой неровности

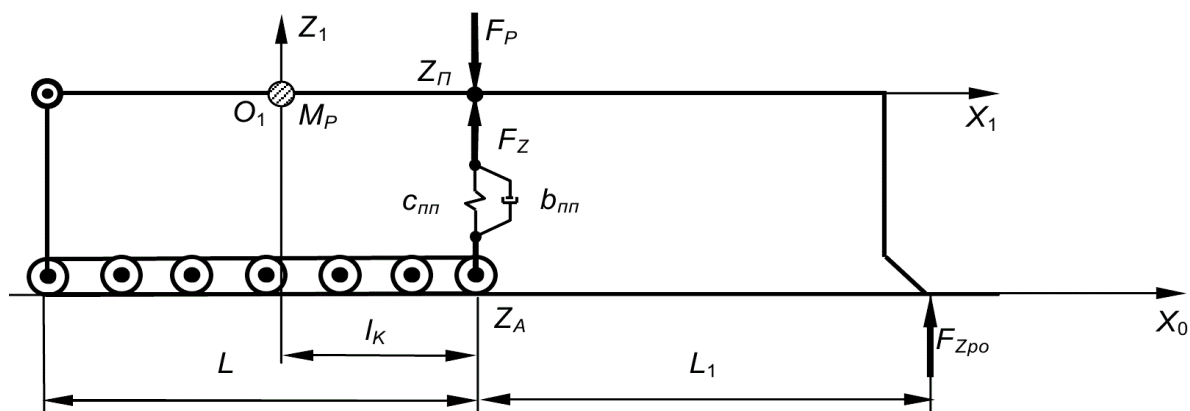


Рис. 3. Расчетная схема полужесткой подвески рамы бульдозера

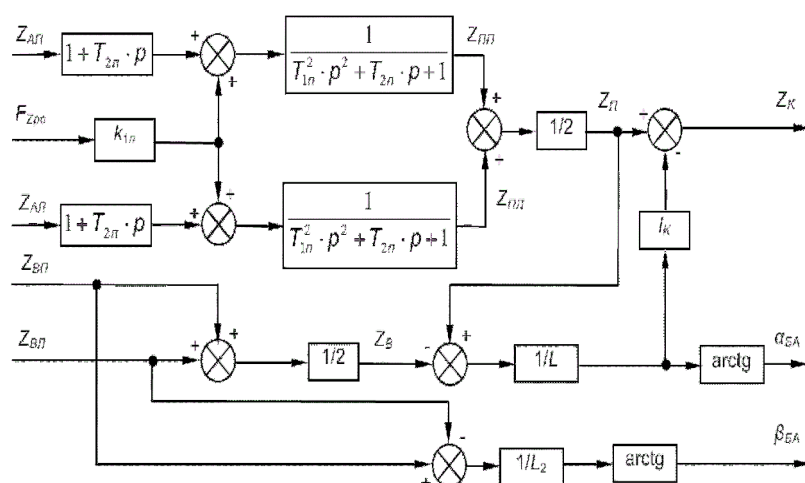


Рис. 4. Структурная схема математической модели перемещений рамы бульдозера

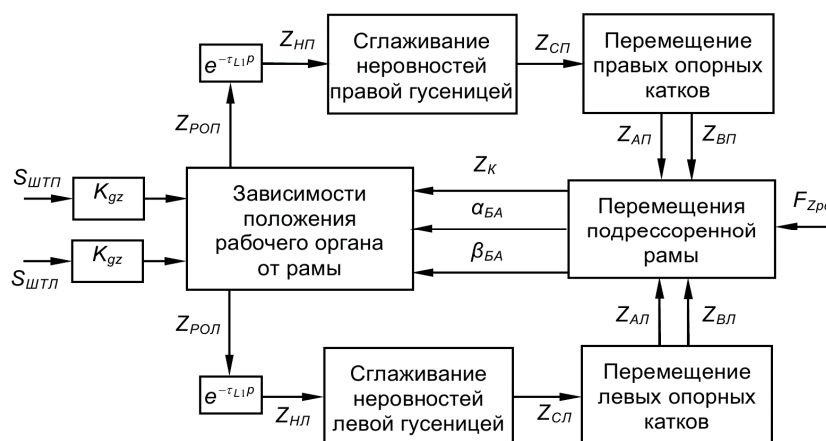


Рис. 5. Структурная схема математической модели бульдозера с полужесткой подвеской

Заключение

Таким образом, полученные аналитические зависимости и схемы математической модели бульдозера с полужесткой подвеской рамы могут быть с некоторой степенью точности использованы для решения задач компьютерного моделирования, анализа и синтеза конструктивных параметров машины на стадии её проектирования.

Библиографический список

1. Лазута, И. В. Автоматизация проектирования основных параметров устройства управления рабочим органом бульдозерного агрегата: монография / И. В. Лазута, В. С. Щербаков, Е. Ф. Денисова. – Омск: СибАДИ, 2012. – 128 с.
2. Болотов, А. К. Конструкция тракторов и автомобилей: учебное пособие / А. К. Болотов, А. А. Лопарев, В. И. Судницын. – М.: КолосС, 2006. – 352 с.
3. Гаврилов, К. Л. Дорожно-строительные машины иностранного и отечественного производства: устройство, диагностика и ремонт:

научно-производственное издание / К. Л. Гаврилов, Н. А. Забара. – М.: Майор, 2006. – 480 с.

4. Кутьков, Г. М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства: учебник / Г. М. Кутьков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Инфра-М, 2014. – 506 с.

5. Челябинский тракторный завод «ЧТЗ-УРАЛТРАК»: [Электронный ресурс]. М., 2005 - 2012. URL: <http://chtz-uraltrac.ru/>. (Дата обращения: 19.10.2014).

6. Кузин, Э. Н. Повышение эффективности землеройных машин непрерывного действия на основе увеличения точности позиционирования рабочего органа: дис. ... доктора техн. Наук / Э.Н. Кузин. – М., ВНИИ Стройдормаш, 1984. – 446 с.

7. Дементьев, Ю. В. САПР в автомобиле- и тракторостроении: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Ю.В. Дементьев, Ю.С. Щетинин; ред. В. М. Шарипов. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 224 с.

8. Щербаков, В. С. Составление структурных схем землеройно-транспортных машин как объектов автоматизации: учебное пособие / В.С. Щербаков. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2001. – 47 с.

A DYNAMIC MODEL OF A BULLDOZER WITH A SEMI-RIGID SUSPENSION

I. V. Lazuta, E. F. Lazuta

Abstract. This article provides a mathematical description of a complex dynamic system of a bulldozer with a semi-rigid frame's suspension. The authors have proposed a mathematical model that consists of geometric relations' equations of the machine elements and differential equations of moving machine frame and operating device under external kinematic and dynamic impacts. The considerable attention in the presented mathematical model is paid to the dependencies between varieties of machine's structural parameters.

Keywords: dynamics, mathematical model, bulldozer, semi-rigid suspension, differential equation, kinematic connection.

References

1. Lazuta I. V. *Avtomatizatsiya proektirovaniya osnovnykh parametrov ustroystva upravleniya rabochim organom bul'dozernogo agregata* [Computer-aided engineering of basic parameters of the unit controlling operating device of a bulldozer]. Omsk, SibADI Publ., 2012. 128 p.
2. Bolotov A. K., Sudnitsyn V. I., Loparev A. A. *Konstruktsiya traktorov i avtomobiley* [The structure of tractors and automobiles]. Moscow, Kolos Publ., 2006. 352 p.
3. Gavrilov K. L., Zabara N. A. *Dorozhno-stroitel'nye mashiny inostrannogo i otechestvennogo proizvodstva: ustroystvo, diagnostika i remont* [Road construction machinery of foreign and domestic production: device, diagnostics and repair]. Moscow, Mayor Publ., 2006. 480 p.
4. Kutkov G. M. *Traktory i avtomobili. Teoriya i tekhnologicheskie svoystva* [Tractors and automobiles. The theory and technological properties]. Moscow, Infra-M Publ., 2014. 506 p.
5. Chelyabinskii traktornyj zavod «ChTZ-URALTRAK» [Chelyabinsk Tractor Plant "ChTZ-

Uraltrak"]. URL: <http://chitz-uraltrak.ru/> (accessed: 19.10.2014).

6. Kuzin E. N. *Povyshenie effektivnosti zemleroynykh mashin nepreryvnogo deystviya na osnove uvelicheniya tochnosti pozitsionirovaniya rabocheho organa*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Improving the efficiency of continuously working earthmoving machines on the basis of increasing the accuracy of positioning operating device]. Moscow, VNII Stroydormash Publ., 1984. 446 p.

7. Dementiev Y. V., Shchetinin Y. S. *SAPR v avtomobile- i traktorstroenii* [CAD system in the motorcar and tractor building]. Moscow, Akademiya Publ., 2004. 224 p.

8. Shcherbakov V. S. *Sostavlenie strukturnykh skhem zemleroyno-transportnykh mashin kak ob'ektov avtomatizatsii* [Structural charting of earthmoving machines as automation's objects]. Omsk, SibADI Publ., 2001. 47 p.

Лазута Иван Васильевич (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехника» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: livne@mail.ru)

Лазута Екатерина Федоровна (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: denisova_ef@mail.ru)

Lazuta Ivan Vasilievich (Omsk, Russian Federation) – candidate of technical sciences, associate professor of the department "Automation of industrial processes and electrical engineering", of the Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI) (644080, Russia, Omsk, Mira st., 5, e-mail: livne@mail.ru)

Lazuta Ekaterina Fedorovna (Omsk, Russian Federation) – candidate of technical sciences, associate professor of the department "Mechanics", of the Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI) (644080, Russia, Omsk, Mira st., 5, e-mail: denisova_ef@mail.ru)

УДК 629.424.1

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ДИЗЕЛЬНЫХ ЛОКОМОТИВОВ НА ЗАДАННОМ УЧАСТКЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ

В. А. Михеев

Омский государственный университет путей сообщения «ОмГУПС», Россия, г. Омск.

Аннотация. В статье показана возможность применения математического моделирования для формирования режимов работы тепловозов и оценки эксплуатационной экономичности дизельной энергетической установки для заданного участка обращения и ожидаемых условий эксплуатации с учетом индивидуальных тягово-энергетических и экономических характеристик локомотивов. Приводятся результаты моделирования распределения времени эксплуатационной работы дизель-генераторной установки тепловоза по позициям контроллера машиниста и ее эксплуатационной экономичности для принятого участка обращения и ожидаемых условий эксплуатации.

Ключевые слова: дизельный локомотив, тяговые расчеты, эксплуатационная экономичность.