

УДК 621.01

Исманов М.М.*д.т.н., проф. Кыргызско-Узбек. Межд. универ. им. Б.Сыдыкова, Кыргызская Республика***Абдраимов Э.С.***д.т.н., профессор, гл. научный сотрудник ИМиА НАН Кыргызской Республики***Пакирдинов Р.Р.***к.т.н., доцент Ошского технологичес. универ. им. М. Адышева, Кыргызская Республика***Абсамат кызы Г.***препод. Ошского технологичес. универ. им. М. Адышева, Кыргызская Республика*

ГИДРАВЛИКАЛЫК ПРИВОДУ БАР ТАПТООЧУ МАШИНАНЫН УРГУЛООЧУ МЕХАНИЗМИНИН ДИНАМИКАСЫ

Бул жумушта гидравликалык приводу бар таптоочу машинанын ургулоочу механизмдин динамикасы изилдөөнүн предмети болуп эсептелинет. Изилдөөнүн максаты болуп гидравликалык приводу бар таптоочу машинанын ургулоочу механизмдин динамикалык моделин иштеп чыгуу жана талдоо эсептелинет. Изилдөөлөрдө механизмдердин жана гидравликалык приводдордун динамикалык моделин иштеп чыгуу методдору колдонулган. Изилдөөлөрдүн жыйынтыгында гидравликалык приводу бар таптоочу машинанын ургулоочу механизмдин кыймылынын математикалык жазылышы Лагранждын теңдемелеринин негизинде алынган. Бир массалык системага келтирилген гидравликалык приводу бар таптоочу машинанын ургулоочу механизмдин жалпыланган динамикалык модели иштелип чыгылган. Гидравликалык приводу бар таптоочу машинанын валынын бурулуу бурчунун коромыслонун бурчтук ылдамдыгынан көз карандылыгы сандык интегрлөөнүн негизинде компьютерде эсептөө программасы түзүлгөн. Гидравликалык приводу бар таптоочу машинанын ургулоочу механизмдин ургулоосунун жыштыгынын жана энергиясынын чоңдуктары аныкталган.

Негизги сөздөр: ургулоочу механизмдин динамикасы; гидравликалык привод; таптоочу машина; динамикалык модель; бурулуу бурчу; инерция моменти; ургулоо энергиясы жана жыштыгы.

ДИНАМИКА УДАРНОГО МЕХАНИЗМА ТРАМБОВОЧНОЙ МАШИНЫ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

В данной работе предметом исследования является динамика ударного механизма трамбовочной машины с гидравлическим приводом. Цель исследования - разработка и анализ динамической модели ударного механизма трамбовочной машины с гидравлическим приводом. Используются методы построения динамических моделей механизмов и гидравлических приводов машин. На основе уравнений Лагранжа получено математическое описание движения ударного механизма трамбовочной машины с гидравлическим приводом. Разработана обобщенная динамическая модель ударного механизма трамбовочной машины с гидравлическим приводом, приведенная в одномассовую систему. Составлена программа расчета на компьютере и на основе численного интегрирования получена зависимость предударной угловой скорости коромысла ударного механизма от угла поворота вала гидродвигателя трамбовочной машины. Определены величины энергии и частоты ударов ударного механизма трамбовочной машины с гидравлическим приводом. Выявлено, что средняя угловая скорость вала гидродвигателя не отличается от номинальной, так как ее вал в цикле имеет скорость как меньшую, так и большую величину угловой скорости.

Ключевая слова: динамика ударного механизма; гидравлический привод; трамбовочная машина; динамическая модель; угол поворота; момент инерции; энергия и частота ударов.

DYNAMICS OF THE IMPACT MECHANISM OF A HYDRAULIC-DRIVEN RAMMING MACHINE

In this paper, the subject of research is the dynamics of the impact mechanism of a hydraulic-driven ramming machine. The purpose of the study is to develop and analyze a dynamic model of the impact mechanism of a hydraulic-driven ramming machine. Methods of constructing dynamic models of mechanisms and hydraulic drives of machines are used. Based on the Lagrange equations, a mathematical description of the motion of the impact mechanism of a hydraulic-driven ramming machine is obtained. A generalized dynamic model of the impact mechanism of a hydraulic-driven ramming machine, brought into a single-mass system, has been developed. A computer calculation program has been compiled and, based on numerical

integration, the dependence of the pre-impact angular velocity of the rocker arm of the impact mechanism on the angle of rotation of the shaft of the hydraulic motor of the ramming machine has been obtained. The values of the energy and frequency of impacts of the impact mechanism of the hydraulic-driven ramming machine are determined; It is revealed that the average angular velocity of the hydraulic motor does not differ from the nominal one, since its shaft in the cycle has a speed of both a smaller and a larger angular velocity.

Key words: dynamics of the impact mechanism; hydraulic drive; ramming machine; dynamic model; angle of rotation; moment of inertia; energy and frequency of impacts.

Как известно, что в строительной индустрии широко используются трамбовочные машины с механическими, взрывными, пневматическими и компрессионно-вакуумными ударными механизмами, а также виброплиты с дебалансным вибровозбудителем. Каждая из перечисленных машин имеет свои преимущества, недостатки и области рационального применения.

В связи с этим анализ процесса трамбовки и динамики этих машин, совершенствование имеющихся конструкций и создание новых высокоэффективных их видов является одной из актуальных задач.

В работах [1,2,3] подтверждены эффективность работы трамбовочных машин с механизмом переменной структуры на основе электрического привода. Также анализируя работу [3], поставлена задача, где выявлена возможность использования гидравлического двигателя типа НШ-10Е в качестве основного привода трамбовочных машин.

Известно, что основным параметром в трамбовочных машинах является энергия и частота ударов. Указанные параметры в достаточной степени характеризуют эффективность работы ударных машин и может быть принята как основной критерий качества ударного механизма трамбовочных машин [4,5].

Учитывая вышеизложенные обстоятельства возникает необходимость проведения исследований и анализа динамики трамбовочных машин с гидравлическим приводом. Главной целью проведения исследований является определение основных характеристик ударного механизма: энергия удара, частота удара, суммарная момент инерции всех звеньев ударного механизма; крутящий момент вала гидродвигателя и другие кинематические величины данного механизма.

Известно, что процесс взаимодействия коромысла-бойка с волноводом и передачи энергии в уплотняемый грунт представляют собой отдельную задачу и в данной работе не рассматривается. Откуда, в данной работе разрабатывается динамическая модель силовой трансмиссии от гидродвигателя до коромысла-ударного элемента трамбовочной машины. Следует отметить, что частота ударов существующих ручных грунтоуплотняющих машин составляет около 9 Гц [6,7,8,9]. Учитывая это, динамический анализ проводим для передаточного отношения от гидродвигателя к кривошипу: $i=3$, так как это передаточное отношение соответствует частоты ударов 8 Гц. На рисунке 1 представлена кинематическая схема ударного узла ручной трамбовочной машины с гидравлическим приводом.

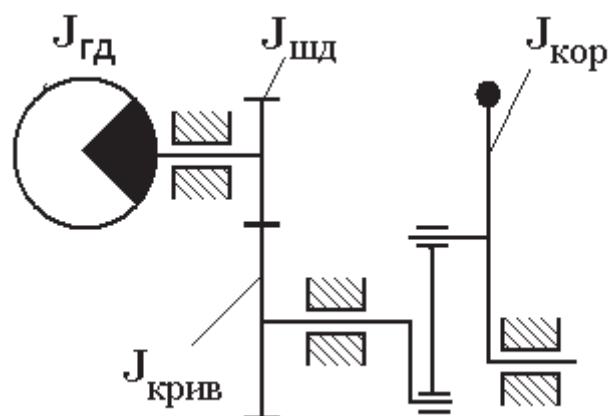


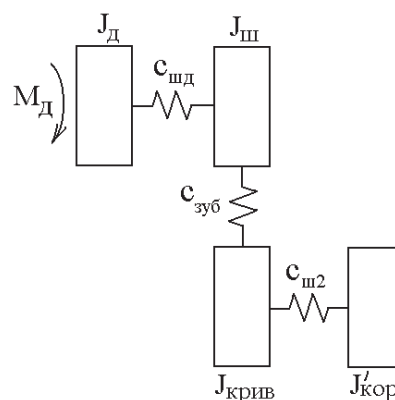
Рисунок 1 – Кинематическая схема ручной трамбовочной машины с гидравлическим приводом

В ней внутренние шестерни гидродвигателя (без учета момент инерции жидкости гидродвигателя) представлены в виде жесткой массы с моментом инерции $J_{\text{д}}$. На валу гидродвигателя установлена ведущая шестерня с моментом инерции $J_{\text{шд}}$ посредством шпоночных соединений с коэффициентом жесткости $c_{\text{шд}}$. Ведущая шестерня, в свою очередь зацеплена с зубчатым колесом $J_{\text{крив}}$, которая установлена на валу кривошипа с помощью шпоночного соединения с коэффициентом жесткости $c_{\text{ш2}}$. Кривошип соединен с коромыслом $J_{\text{кор}}$ через шатун. Коромысло имеет переменный момент инерции, зависящий от угла поворота кривошипа.

Составляем динамическую модель данной трамбовочной машины, состоящей из гидродвигателя, зубчатых шестерен и коромысла (рисунок 2):

1. Используя известную методику расчета, приведенное в работе [6,10,11], находим инерционные моменты шестерни гидродвигателя, зубчатой шестерни и колеса. Так как жесткость этих звеньев значительно больше жесткостей остальных звеньев, то представляем их с определенными моментами инерции как жесткие массы;

2. Определяем коэффициенты жесткости звеньев. К таким звеньям относятся шпоночное соединение и зубчатое зацепление шестерни и колеса.



$J_{\text{д}}$ - момент инерции двигателя; $J_{\text{ш}}$ - момент инерции ведущей шестерни; $J_{\text{крив}}$ - момент инерции зубчатого колеса, установленного на валу кривошипа; $J_{\text{кор}}$ - переменный момент инерции коромысла, зависящий от угла поворота кривошипа; $c_{\text{шд}}$ - коэффициент жесткости шпонки вала двигателя, на котором установлена ведущая шестерня; $c_{\text{зуб}}$ - коэффициент жесткости зубчатого зацепления между шестерней и зубчатым колесом; $c_{\text{ш2}}$ - коэффициент жесткости шпонки зубчатого колеса;

Рисунок 2 – Общая динамическая модель ударного механизма трамбовочной машины

В таблице 1 приведены инерционные моменты звеньев механизма, коэффициенты жесткости.

Таблица 1 - Инерционные моменты звеньев ударного механизма, коэффициенты жесткости и податливости

Момент инерции, J $10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	$J_{\text{д}}$	$J_{\text{ш}}$	$J_{\text{крив}}$	$J'_{\text{кор}}$
	8	10	96	18.94
Жесткость, $c_{\text{ш1}}$, $10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$C_{\text{шд}}$	$C_{\text{зуб}}$	$C_{\text{шк}}$	
	7,56	116	30,5	

Приведение характеристики всех звеньев этой модели к валу гидродвигателя имеет вид, который показан на рисунке 3.

В таблице 2 представлены инерционные моменты звеньев и коэффициенты жесткости механизма, приведенные к валу гидродвигателя.

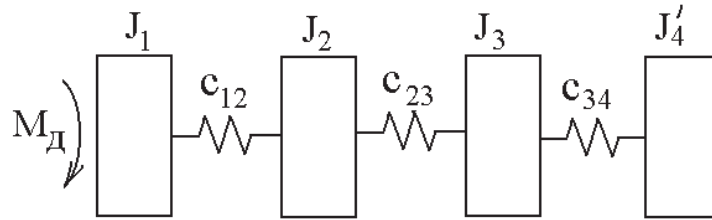


Рисунок 3 – Динамическая модель ударного механизма трамбовочной машины

Таблица 2 - инерционные моменты звеньев и коэффициенты жесткости ударного механизма, приведенные к валу гидродвигателя

Момент инерции, J_0 $10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	J_1	J_2	J_3	J_4
	8	10	10,6	2,1
Жесткость, c_{u1} $10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}$	C_{12}	C_{23}	C_{34}	
	7,56	84	3,8	

Анализируя работы [3,4] динамическую модель рассматриваемой трамбовочной машины можно рассматривать в виде одномассовой системы с переменным моментом инерции (рисунок 4), зависящим от угла поворота двигателя, соблюдая следующее неравенство:

$$K^2 \gg (2\pi f)^2 \tag{1}$$

Квадрат наименьшей частоты составляет:

$$K^2 = \frac{J_1 + J_2}{e \cdot J_1 \cdot J_2} = 1673 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$$

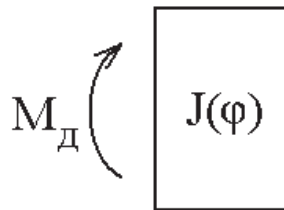


Рисунок 4 – Обобщенная динамическая модель ударного механизма, приведенная в одномассовую систему

Квадрат исследуемой частоты ударов при 10 Гц составляет $(2\pi f)^2 = 3943 \text{ с}^{-1}$, что значительно меньше квадрата собственных частот парциальных систем.

В одномассовой системе момент инерции всех звеньев состоит из постоянных моментов инерции звеньев (момент инерции двигателя, шестерни и приведенного момента инерции кривошипа к валу двигателя) и переменного момента инерции коромысла, приведенного к валу двигателя, который зависит от угла поворота гидродвигателя:

$$J_{\Sigma} = J_{const} + J_{kop}(\omega) \tag{2}$$

На основе данного уравнения (2) с помощью компьютерной программы EXCEL построена диаграмма (рисунок 5) зависимости момента инерции ударного механизма одномассовой системы (J_{Σ}) от угла поворота основного вала гидродвигателя (j).

Для составления уравнения движения одномассовой системы с переменным моментом инерции используем уравнения Лагранжа 2-го рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\omega}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = M_a - M_c, \tag{3}$$

где $T=J\omega^2/2$ - кинетическая энергия механизма; j и w - соответственно угол поворота и угловая скорость ротора гидродвигателя; M_d - момент движущих сил; M_c - момент сил сопротивления на валу гидродвигателя.

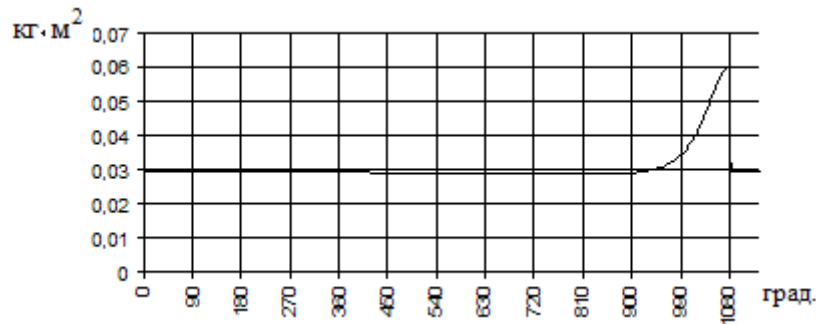


Рисунок 5 – Зависимость момента инерции одномассовой системы (J_{Σ}) от угла поворота вала гидродвигателя (j)

Подставляя выражения для кинетической энергии в уравнение Лагранжа (3), учитывая, что момент инерции механизма, приведенный к валу гидродвигателя, является функцией от угла поворота гидродвигателя, пренебрегая силами трения в механизмах, получим следующее уравнение движения трамбовочной машины:

$$J \cdot \ddot{\omega} + \frac{1}{2} \frac{dJ}{d\varphi} \omega^2 = M_d \tag{4}$$

Для решения этого уравнения использована известная методика, изложенная в работе [5]. Составлена программа численного расчета на ЭВМ (Excel) и получены зависимости угловой скорости гидродвигателя (ω) от угла поворота ротора (j), которые представлены на рисунках 6 и 7. Как видно из рисунка 6, что угловая скорость гидродвигателя примерно на пятом-шестом цикле входит в установившийся режим.

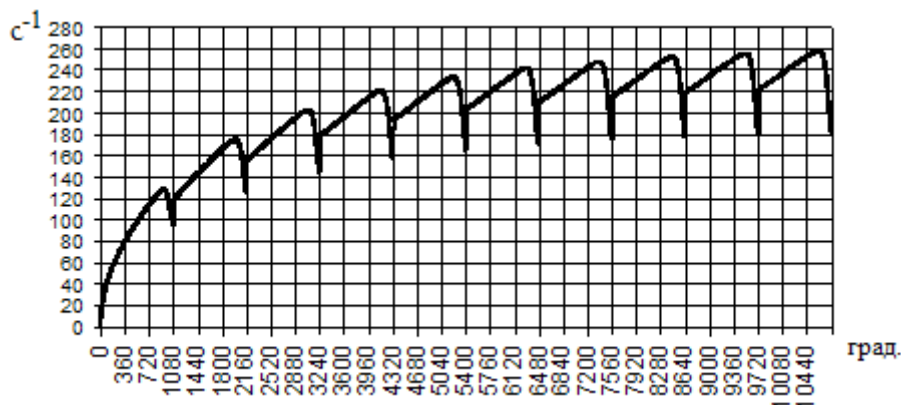


Рисунок 6 – Зависимость угловой скорости гидродвигателя (ω) от угла поворота ротора (j)

Из полученных диаграмм видно, что угловая скорость гидродвигателя после удара мгновенно увеличивается, и за короткий промежуток времени движения вала гидродвигателя угловая скорость резко возрастает до $\omega = 210 \text{ c}^{-1}$. Затем угловая скорость вала гидродвигателя возрастает в связи с уменьшением передаточного отношения ударного механизма. После небольшого промежутка времени угловая скорость гидродвигателя снова уменьшается, в связи с резким увеличением передаточного отношения ударного механизма трамбовки до $\omega = 170 \text{ c}^{-1}$

и в этот момент происходит удар коромысла.

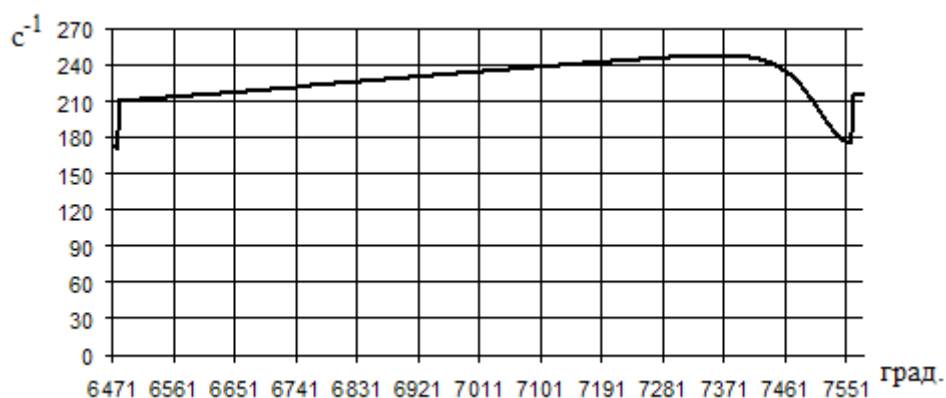


Рисунок 7 – Зависимость угловой скорости гидродвигателя (ω) от угла поворота ротора (j) в одном установившемся режиме

Проанализировав представленные диаграммы и числовых данных, можно определить величину энергии единичного удара трамбовочной машины. Средняя угловая скорость гидродвигателя не отличается от номинальной угловой скорости, т.к. вал гидродвигателя в одном установившемся режиме имеет угловую скорость как меньшую, так и большую величину.

В таблице 3 приведены основные характеристики ударного механизма трамбовочной машины, полученные на основе проведенных исследований.

Таблица 3 - Основные характеристики ударного механизма трамбовочной машины с гидравлическим приводом

№	Наименование	Величины
1	Предударная угловая скорость кривошипа, с ⁻¹	56
2	Частота ударов, Гц	8
3	Энергия удара, Дж	150
4	Номинальная мощность двигателя, кВт	2
5	Номинальный момент гидродвигателя, Нм	15

Выводы:

1. На основе уравнений Лагранжа получено математическое описание движения ударного механизма трамбовочной машины с гидравлическим приводом;
2. Разработана обобщенная динамическая модель ударного механизма трамбовочной машины с гидравлическим приводом, приведенная в одномассовую систему;
3. Составлена программа расчета на компьютере и на основе численного интегрирования получена зависимость предударной угловой скорости коромысла ударного механизма от угла поворота вала гидродвигателя трамбовочной машины;
4. Определены величины энергии и частоты ударов ударного механизма трамбовочной машины с гидравлическим приводом;
5. Выявлено, что средняя угловая скорость гидродвигателя не отличается от номинальной, так как ее вал в цикле имеет скорость как меньшую, так и большую величину угловой скорости.

Список литературы:

1. Пакирдинов, Р.Р. Разработка и создание ручных грунтоуплотняющих машин на основе механизма переменной структуры [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Р. Р. Пакирдинов. – Бишкек, 2008. – 19 с.
2. Исманов, М.М. Особенности конструкций ручных трамбовочных машин [Текст] / М.М. Исманов,

- Р.Р. Пакирдинов, Абсамат кызы Г. // Наука. Образование. Техника. – Ош: КУМУ, 2022. – №2. – С. 5 – 13.
3. **Молдокеев, М. Т.** Разработка и создание отбойного молотка на основе механизма переменной структуры с гидроприводом [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / М. Т. Молдокеев. – Бишкек, 2000. – 19 с.
 4. **Касымбеков, С.Н.** Особенности конструкции опытного образца ударного механизма переменной структуры [Текст] / С.Н. Касымбеков// Наука. Образование. Техника. – Ош: КУУ, 2019. – №3. – С. 11– 17.
 5. **Абидов А.О.** Определение рациональных параметров звеньев электромеханического перфоратора с ударно-поворотным действием [Текст] /А.О.Абидов, О.М. Исманов // Наука. Образование. Техника. – Ош: КУМУ, 2021 – №1. – С.16 – 25.
 6. **Исманов, М.М.** Построение динамической модели ударного механизма виброплиты на основе механизма переменной структуры с ременной передачей [Текст] / Э.С. Абдраимов, М.М. Исманов, Р.Р. Пакирдинов, Абсамат кызы Г. // Машиноведение. – Бишкек: ИМаш НАН КР, 2021. - № 2 (14). – С. 10 – 17.
 7. **Зиялиев, К.Ж.** Кинематический и динамический анализ шарнирно-четырёхзвенных механизмов переменной структуры с созданием машин высокой мощности [Текст]: под общей редакцией С. Абдраимова / К. Ж. Зиялиев. – Бишкек: Илим, 2005. – 196 с.
 8. **Абдраимов, С.** Безмуфтовые прессы с механизмами переменной структуры [Текст]: автореф. дисс. ... докт. техн. наук / С. Абдраимов. – Фрунзе, 1985. – 32 с.
 9. **Абидов, А.О.** Динамика отбойного молотка с ударным механизмом переменной структуры [Текст] / А. О. Абидов. – Бишкек: Илим, 2001. – 115 с.
 10. **Еремьянц, В.Э.** Построение и анализ динамических моделей механизмов [Текст]: учебно-методическое пособие. Часть 1 / В. Э. Еремьянц. – Бишкек: КРСУ, 2000. - 43 с.
 11. **Еремьянц, В.Э.** Построение и анализ динамических моделей механизмов [Текст]: учебно-метод. пособие. Часть 2 / В. Э. Еремьянц. – Бишкек: КРСУ, 2001. - 51 с.

DOI:10.54834/16945220_2022_3_15

Поступила в редакцию 18.05.2022 г.