

А.М. Бусыгин

СИЛОВОЙ РАСЧЕТ МЕХАНИЗМА РУКОЯТИ ГУСЕНИЧНОГО ЭКСКАВАТОРА С ТРЕМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Изложена методика силового расчета механизма на примере механизма рукояти гусеничного экскаватора с тремя степенями свободы. Целью силового расчета механизма является определение реакций в кинематических парах, а также уравновешивающих сил или уравновешивающих моментов. Знание сил в кинематических парах необходимо для расчета звеньев механизма на прочность, жесткость, вибростойкость, износоустойчивость, для расчетов подшипников на долговечность и для проведения других подобных расчетов, выполняемых при проектировании механизма. Силовой расчет механизма производят используя метод кинетостатики, который позволяет для решения сложной динамической задачи механизма использовать простые уравнения статики.

Ключевые слова: силовой анализ, сила инерции, структурный анализ, уравновешивающий момент, структурная группа, гусеничный экскаватор, ведущее звено механизма.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-133-142

Механизм рукояти гусеничного экскаватора (рис. 1) фактически представляет из себя манипулятор с тремя степенями свободы. Силовой расчет данного механизма является сложной инженерной задачей, пример решения которой будет полезен как для инженеров, занимающихся проектированием данного типа машин, так и для студентов вузов, обучающихся по специальности инженер-механик.

Силовому расчету любого механизма предшествует структурный анализ, который позволяет разбить механизм на ведущее звено или ведущие звенья, в зависимости от степени подвижности механизма — W , и структурные группы.

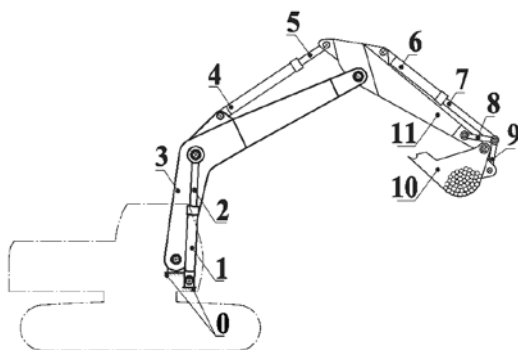


Рис. 1

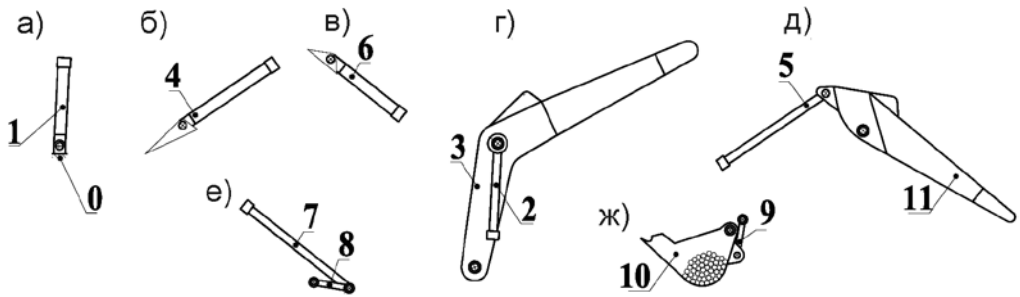


Рис. 2

Также предварительно надо произвести кинематический анализ механизма с целью определения кинематических параметров звеньев, позволяющих определить силы инерции и инерционные моменты звеньев. При проведении кинематического анализа было обусловлено, что угловые скорости ведущих звеньев $\omega_1, \omega_4, \omega_6$ являются величинами постоянными, а также установлено, что угловые ускорения $\varepsilon_2, \varepsilon_4$ равны нулю.

Веса и моменты инерции звеньев, внешние нагрузки, действующие на механизм, все геометрические размеры звеньев считаем заранее определенными. Так как, в данном случае звенья механизма совершают плоскопараллельное движение или вращение вокруг неподвижной оси, то силы инерции, действующие на каждое звено, приводятся к одной силе инерции, приложенной не в центре тяжести звена, а в какой-то другой точке, положение которой легко определяется, используя знания, полученные при изучении курса «Теория машин и механизмов».

Приступим к силовому расчету механизма рукоятки гусеничного экскаватора, изображенного в рис. 1. Данный механизм имеет степень подвижности $W = 3$, со-

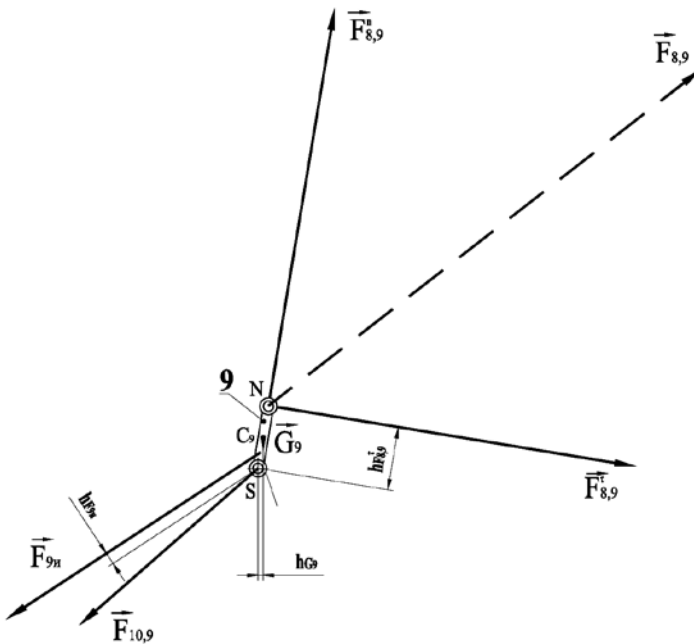


Рис. 3

ответственно механизм имеет три ведущих звена. Разобьем механизм на ведущие звенья и структурные группы. Получили, что данный механизм имеет три ведущих звена и четыре структурные группы второго класса второго порядка (см. рис. 2).

Рассмотрим равновесие звена 9. Силу $\vec{F}_{10,9}$ изобразим произвольно.

Покажем все силы, действующие на него (рис. 3). В дальнейшем в статье будем использовать следующие обозначения сил и плеч сил: \vec{G}_i — вес i -го звена; $\vec{F}_{i,j}$ — сила воздействия i -го звена на j -е звено. Причем по третьему закону Ньютона $\vec{F}_{i,j} = -\vec{F}_{j,i}$; $\vec{F}_{i,i}^n$ — сила инерции i -го звена; $\vec{F}_{i,j}^n$ — нормальная составляющая силы $\vec{F}_{i,j}$; $\vec{F}_{i,j}^\tau$ — тангенциальная составляющая силы $\vec{F}_{i,j}$; h_F — плечо силы \vec{F} . В качестве силы \vec{F} может быть любая из представленных на рисунках сил.

Составим уравнение моментов для звена 9 относительно точки S. Плечи всех сил указаны на рис. 3.

$$\sum_{v=1}^n M_S(\vec{F}_v) = -G_9 \cdot h_{G_9} - F_{8,9}^\tau \cdot h_{F_{8,9}^\tau} + F_{9и} \cdot h_{F_{9и}} = 0, \quad (1)$$

откуда найдем $F_{8,9}^\tau$:

$$F_{8,9}^\tau = \frac{(F_{9и} \cdot h_{F_{9и}} - G_{9,7} \cdot h_{G_9})}{h_{F_{8,9}^\tau}} \quad (2)$$

Рассмотрим равновесие звена 10. Покажем все силы, действующие на него (рис. 4). Силу $\vec{F}_{9,10}$ изобразим произвольно. Составим уравнение моментов для звена 10 относительно точки S. Плечи всех сил указаны на рис. 4.

$$\sum_{v=1}^n M_S(\vec{F}_v) = G_{10} \cdot h_{G_{10}} + G_{гр.} \cdot h_{G_{гр.}} - F_{11,10}^\tau \cdot h_{F_{11,10}^\tau} - F_{10и} \cdot h_{F_{10и}} + F_{гр.и} \cdot h_{F_{гр.и}} = 0, \quad (3)$$

откуда найдем $F_{11,10}^\tau$

$$F_{11,10}^\tau = \frac{(G_{10} \cdot h_{G_{10}} + G_{гр.} \cdot h_{G_{гр.}} - F_{10и} \cdot h_{F_{10и}} + F_{гр.и} \cdot h_{F_{гр.и}})}{h_{F_{11,10}^\tau}} \quad (4)$$

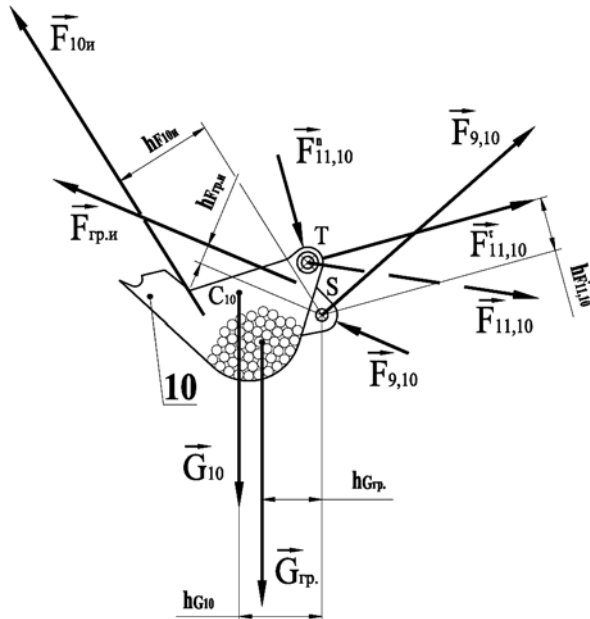


Рис. 4

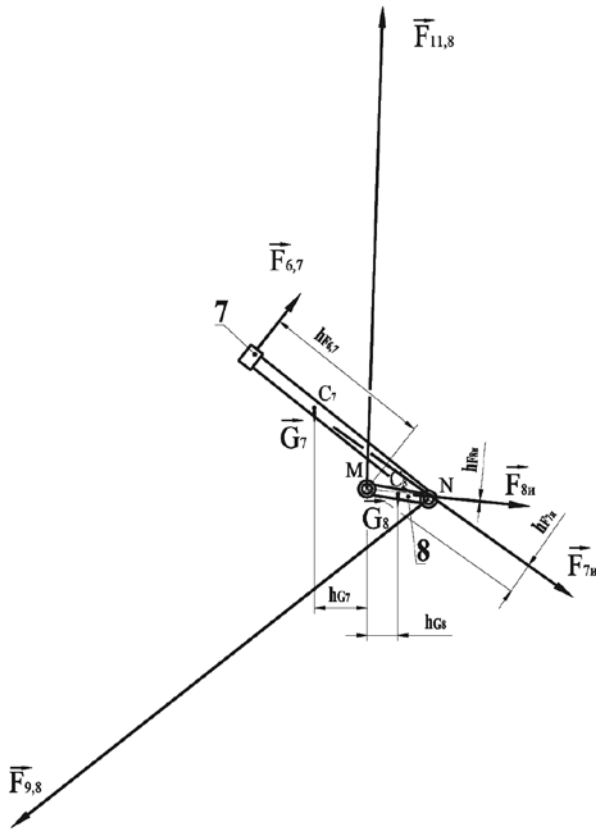


Рис. 8

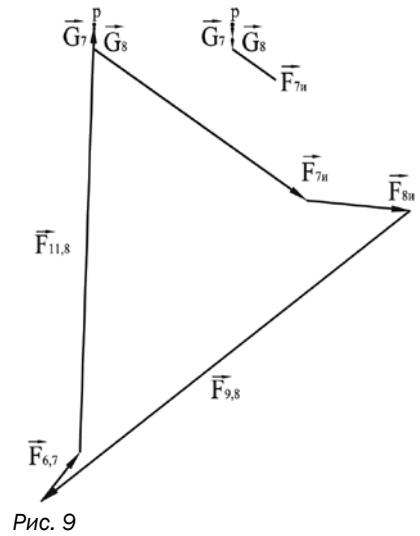


Рис. 9

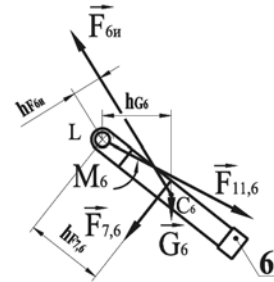


Рис. 10

$$\vec{G}_9 + \vec{F}_{9и} + \vec{F}_{8,9} + \vec{F}_{10,9} = 0 \quad (6)$$

Задавшись масштабом μ_F в соответствии с уравнением (6) построим план сил, откуда и найдем $\vec{F}_{10,9}$ (см. рис. 7).

Изобразим структурную группу, состоящую из звеньев 7 и 8 (см. рис. 8), и покажем все силы, действующие на данную структурную группу. Силу $\vec{F}_{11,8}$ изобразим произвольно. Составим уравнение моментов для данной структурной группы относительно точки M. Плечи всех сил указаны на рис. 8.

$$\sum_{v=1}^n M_M(\vec{F}_v) = G_7 \cdot h_{G_7} - G_8 \cdot h_{G_8} - F_{8и} \cdot h_{F_{8и}} - F_{7и} \cdot h_{F_{7и}} - F_{9,8} \cdot h_{F_{9,8}} - F_{6,7} \cdot h_{F_{6,7}} = 0 \quad (7)$$

Откуда найдем $\vec{F}_{6,7}$.

$$\vec{F}_{6,7} = \frac{(G_7 \cdot h_{G_7} - G_8 \cdot h_{G_8} - F_{8и} \cdot h_{F_{8и}} - F_{7и} \cdot h_{F_{7и}} - F_{9,8} \cdot h_{F_{9,8}})}{h_{F_{6,7}}} \quad (8)$$

Составим уравнение сил, действующих на данную структурную группу 7,8.

$$\vec{G}_7 + \vec{G}_8 + \vec{F}_{7и} + \vec{F}_{8и} + \vec{F}_{9,8} + \vec{F}_{6,7} + \vec{F}_{11,8} = 0 \quad (9)$$

Задавшись масштабом μ_F в соответствии с уравнением (6) построим план сил, откуда и найдем $\vec{F}_{11,8}$ (см. рис. 9).

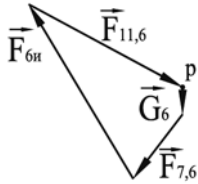


Рис. 11

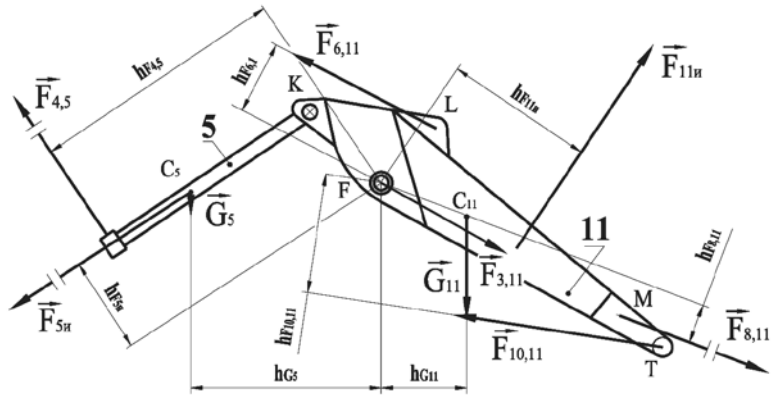


Рис. 12

Изобразим ведущее звено 6 (см. рис. 10), и покажем все силы, действующие на данное звено. Силу $\vec{F}_{11,6}$ изобразим произвольно. На рис. 10 M_6 – уравновешивающий момент, приложенный к ведущему звену 6.

Составим уравнение сил, действующих на ведущее звено 6.

$$\vec{G}_6 + \vec{F}_{7,6} + \vec{F}_{6и} + \vec{F}_{11,6} = 0 \quad (10)$$

Задавшись масштабом μ_F , в соответствии с уравнением (10) построим план сил, откуда и найдем $\vec{F}_{11,6}$ (см. рис. 11).

Для нахождения уравновешивающего момента M_6 составим уравнение моментов сил относительно точки L (см. рис. 10)

$$\sum_{v=1}^n M_L(\vec{F}_v) = -G_6 \cdot h_{G_6} - F_{7,6} \cdot h_{F_{7,6}} + F_{6и} \cdot h_{F_{6и}} + M_6 = 0 \quad (11)$$

откуда

$$M_6 = G_6 \cdot h_{G_6} + F_{7,6} \cdot h_{F_{7,6}} - F_{6и} \cdot h_{F_{6и}} \quad (12)$$

Изобразим структурную группу, состоящую из звеньев 5 и 11 (см. рис. 12), и покажем все силы, действующие на данную структурную группу. Силу $\vec{F}_{3,11}$ изобразим произвольно.

Составим уравнение моментов сил для данной структурной группы относительно точки F. Плечи всех сил указаны на рис. 12.

$$\sum_{v=1}^n M_F(\vec{F}_v) = G_5 \cdot h_{G_5} - G_{11} \cdot h_{G_{11}} + F_{5и} \cdot h_{F_{5и}} + F_{11и} \cdot h_{F_{11и}} + F_{6,11} \cdot h_{F_{6,11}} + F_{8,11} \cdot h_{F_{8,11}} - F_{10,11} \cdot h_{F_{10,11}} - F_{4,5} \cdot h_{F_{4,5}} = 0 \quad (13)$$

откуда найдем $\vec{F}_{4,5}$.

$$F_{4,5} = \frac{(G_5 \cdot h_{G_5} - G_{11} \cdot h_{G_{11}} + F_{5и} \cdot h_{F_{5и}} + F_{11и} \cdot h_{F_{11и}} + F_{6,11} \cdot h_{F_{6,11}} + F_{8,11} \cdot h_{F_{8,11}} - F_{10,11} \cdot h_{F_{10,11}})}{h_{F_{4,5}}} \quad (14)$$

Составим уравнение сил, действующих на данную структурную группу.

$$\vec{G}_5 + \vec{G}_{11} + \vec{F}_{5и} + \vec{F}_{11и} + \vec{F}_{6,11} + \vec{F}_{8,11} + \vec{F}_{10,11} + \vec{F}_{4,5} + \vec{F}_{3,11} = 0 \quad (15)$$

Задавшись масштабом μ_F , в соответствии с уравнением (15) построим план сил, откуда и найдем $\vec{F}_{3,11}$ (см. рис. 13).

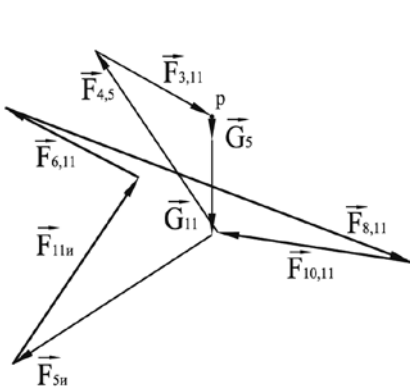


Рис. 13

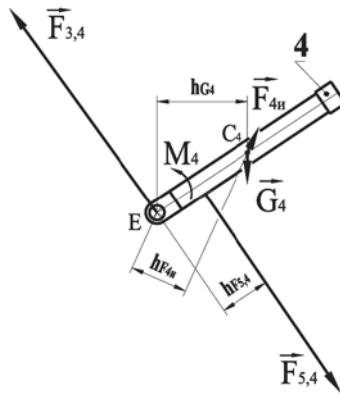


Рис. 14

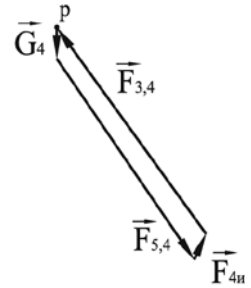


Рис. 15

Изобразим ведущее звено 4 (см. рис. 14), и покажем все силы, действующие на данное звено. Силу $\vec{F}_{3,4}$ изобразим произвольно.

Составим уравнение сил, действующих на ведущее звено 4.

$$\vec{G}_4 + \vec{F}_{4n} + \vec{F}_{3,4} + \vec{F}_{5,4} = 0 \quad (16)$$

Задавшись масштабом μ_F , в соответствии с уравнением (16) построим план сил, откуда и найдем $\vec{F}_{3,4}$ (см. рис. 15). На рис. 14 M_4 — уравновешивающий момент, приложенный к ведущему звену 4.

Для нахождения уравновешивающего момента M_4 (рис. 14) составим уравнение моментов сил относительно точки E (см. рис. 14).

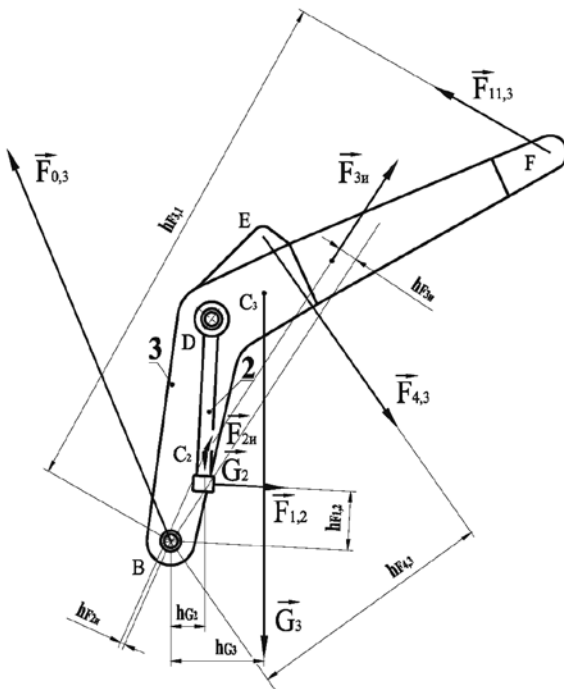


Рис. 16

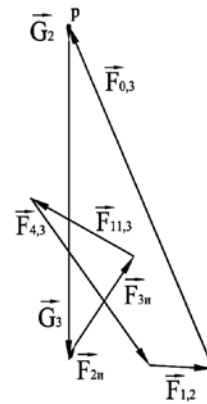


Рис. 17

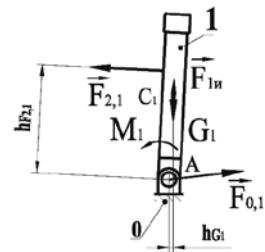


Рис. 18

$$\sum_{v=1}^n M_E(\vec{F}_v) = -G_4 \cdot h_{G_4} - F_{5,4} \cdot h_{F_{5,4}} + F_{4и} \cdot h_{F_{4и}} + M_4 = 0, \quad (17)$$

откуда

$$M_4 = G_4 \cdot h_{G_4} + F_{5,4} \cdot h_{F_{5,4}} - F_{4и} \cdot h_{F_{4и}} \quad (18)$$

Изобразим структурную группу, состоящую из звеньев 2 и 3 (см. рис. 16), и покажем все силы, действующие на данную структурную группу. Силу $\vec{F}_{0,3}$ изобразим произвольно.

Составим уравнение моментов сил для данной структурной группы относительно точки В. Плечи всех сил указаны на рис. 16.

$$\sum_{v=1}^n M_B(\vec{F}_v) = -G_2 \cdot h_{G_2} - G_3 \cdot h_{G_3} - F_{3и} \cdot h_{F_{3и}} - F_{2и} \cdot h_{F_{2и}} - F_{1,2} \cdot h_{F_{1,2}} - F_{4,3} \cdot h_{F_{4,3}} + F_{3,11} \cdot h_{F_{3,11}} = 0 \quad (19)$$

откуда найдем $\vec{F}_{1,2}$

$$F_{1,2} = \frac{(-G_2 \cdot h_{G_2} - G_3 \cdot h_{G_3} - F_{3и} \cdot h_{F_{3и}} - F_{2и} \cdot h_{F_{2и}} - F_{4,3} \cdot h_{F_{4,3}} + F_{3,11} \cdot h_{F_{3,11}})}{h_{F_{1,2}}} \quad (20)$$

Составим уравнение сил, действующих на структурную группу 2,3.

$$\vec{G}_2 + \vec{G}_3 + \vec{F}_{2и} + \vec{F}_{3и} + \vec{F}_{1,2} + \vec{F}_{11,3} + \vec{F}_{4,3} + \vec{F}_{0,3} = 0, \quad (21)$$

Задавшись масштабом μ_r в соответствии с уравнением (21) построим план сил, откуда и найдем $\vec{F}_{0,3}$ (см. рис. 17).

Изобразим ведущее звено 1 (см. рис. 18), и покажем все силы, действующие на данное звено. Силу $\vec{F}_{0,1}$ изобразим произвольно. На рис. 18 M_1 — уравновешивающий момент, приложенный к ведущему звену 1.

Составим уравнение сил, действующих на ведущее звено 1

$$\vec{G}_1 + \vec{F}_{1и} + \vec{F}_{2,1} + \vec{F}_{0,1} = 0. \quad (22)$$

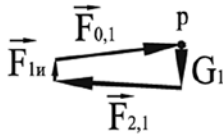


Рис. 19

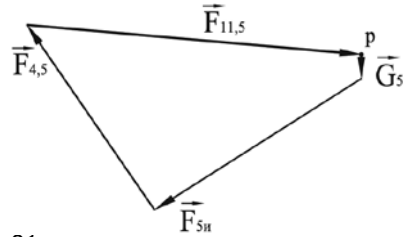


Рис. 21

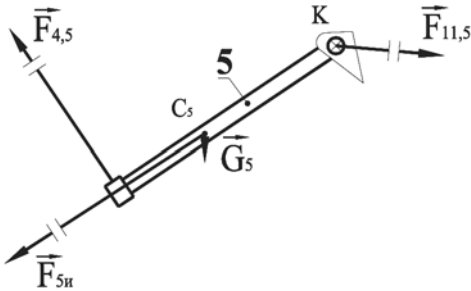


Рис. 20

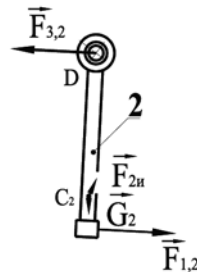


Рис. 22

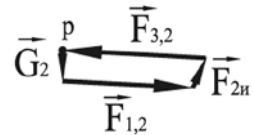


Рис. 23

Задавшись масштабом μ_F , в соответствии с уравнением (22) построим план сил, откуда и найдем $\vec{F}_{0,1}$ (см. рис. 19).

Для нахождения уравновешивающего момента M_1 составим уравнение моментов сил относительно точки А.

$$\sum_{v=1}^n M_A(\vec{F}_v) = -G_1 \cdot h_{G_1} + F_{2,1} \cdot h_{F_{2,1}} + M_1 = 0, \quad (23)$$

откуда

$$M_1 = G_1 \cdot h_{G_1} - F_{2,1} \cdot h_{F_{2,1}} \quad (24)$$

Для нахождения реакции $\vec{F}_{11,5}$ рассмотрим звено 5 (рис. 20). Составим уравнение сил, действующих на звено 5.

$$\vec{G}_5 + \vec{F}_{5и} + \vec{F}_{4,5} + \vec{F}_{11,5} = 0. \quad (25)$$

Задавшись масштабом μ_F , в соответствии с уравнением (25) построим план сил, откуда и найдем $\vec{F}_{11,5}$ (см. рис. 20).

Для нахождения реакции $\vec{F}_{3,2}$ рассмотрим звено 2 (рис. 22). Составим уравнение сил, действующих на звено 2.

$$\vec{G}_2 + \vec{F}_{2и} + \vec{F}_{1,2} + \vec{F}_{3,2} = 0. \quad (26)$$

Задавшись масштабом μ_F , в соответствии с уравнением (26) построим план сил, откуда и найдем $\vec{F}_{3,2}$ (см. рис. 23).

Силовой расчет механизма рукояти гусеничного экскаватора с тремя степенями свободы выполнен полностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артоболевский И. И. Теория машин и механизмов. — М.: Наука, 1988.
2. Фролов К. В., Попов С. А. и др. Теория машин и механизмов. — М.: Высшая школа, 2001.
3. Теория машин и механизмов. Проектирование / Под ред. О. И. Кульбачного. — М.: Высшая школа, 1970.
4. Лабораторный практикум и курсовое проектирование по теории механизмов и машин с использованием ЭВМ / Под ред. А. М. Ашавского. — М.: Машиностроение, 1983.
5. Осецкий В. М., Горбачев Б. и др. Прикладная механика. — М.: Машиностроение, 1977.
6. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов, т. 1. — М.: Наука, 1985.
7. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — М.: Наука, 1965.
8. Koivo A. J., Тома М., Косаоглан Е. и др. Моделирование и управление динамикой экскаватора при копании // Авиакосмическое машиностроение. — 1996(2). — С. 10–18.
9. Хай-Фэн Сонг, Хуан-мин Сюй. Кинематический анализ рабочего устройства экскаватора на основе методологии D-h // Строительная Техника. — 2012(9). — С. 87–90.
10. Дао-Пэн Ху. Исследование траектории управления работой экскаватора. — Южно-китайский технологический университет, 2010. — С. 11–13. **ПТБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Бусыгин Александр Михайлович — кандидат технических наук, доцент, e-mail: Busy9@rambler.ru, Институт Экотехнологий и Инжиниринга («ЭкоТех») НИТУ «МИСиС».

A.M. Busygin

THE FORCE ANALYSIS OF THE CATERPILLAR EXCAVATOR STICK ARRANGEMENT MECHANISM WITH THREE DEGREES OF FREEDOM

The article presents the procedure of the force analysis of a mechanism in terms of the stick arrangement mechanism with three degrees of freedom for a caterpillar excavator. The force analysis of any mechanism is preceded by the structural analysis to divide the mechanism into a driving member, or driving members depending on the mechanism motion freedom W , and structural groups. Then, the kinematic analysis of the mechanism is performed to determine the kinematic parameters of all links for the further estimation of the inertia forces or inertia moments of the links. Weights and inertia moments of the links, external loads applied to the mechanism and all geometric dimensions of the links should be determined beforehand.

The objective of the force analysis of a mechanism is the determination of back actions in kinematic pairs, as well as balancing forces or balancing moments. The data on the forces in kinematic pairs are required to calculate strength, rigidity, vibration resistance and wearability of the mechanism, endurance of bearing groups and for the other design calculations.

The force analysis of mechanisms uses the kinetostatics method that allows solving complex dynamic problems using simple equations of statics.

Key words: force analysis, inertia force, structural analysis, balancing moment, structural group, caterpillar excavator, driving member of mechanism.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-133-142

AUTHOR

Busygin A.M., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: Busy9@rambler.ru, Institute of Ecotechnology and Engineering, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Artobolevskiy I.I. *Teoriya mashin i mekhanizmov* (Theory of machines and mechanisms), Moscow, Nauka, 1988.
2. Frolov K.V., Popov S.A. *Teoriya mashin i mekhanizmov* (Theory of machines and mechanisms), Moscow, Высшая школа, 2001.
3. *Teoriya mashin i mekhanizmov. Proektirovanie*. Pod red. O.I. Kul'bachnogo (Theory of machines and mechanisms. Design. Kul'bachnyy O.I. (Ed.)), Moscow, Vysshaya shkola, 1970.
4. *Laboratornyy praktikum i kursovoe proektirovanie po teorii mekhanizmov i mashin s ispol'zovaniem EVM*. Pod red. A.M. Ashavskogo (Laboratory practical work and course designing on theory of mechanisms and machines using computers. Ashavskyy A.M. (Ed.)), Moscow, Mashinostroenie, 1983.
5. Osetskyy V.M., Gorbachev B. *Prikladnaya mekhanika* (Applied mechanics), Moscow, Mashinostroenie, 1977.
6. Piskunov N.S. *Differentsial'noe i integral'noe ischisleniya dlya vtuzov*, t. 1 (Differential and integral calculus for technical colleges, vol. 1), Moscow, Nauka, 1985.
7. Bronshhteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* (Mathematics reference book for engineers and students of technical colleges), Moscow, Nauka, 1965.
8. Koivo A. J., Toma M., Kocaoglan E. *Aviakosmicheskoe mashinostroenie*. 1996(2), pp. 10–18.
9. Khay-Fen Song, Khuan-min Syuy. *Stroitel'naya tekhnika*. 2012(9), pp. 87–90.
10. Dao-Pen Khu. *Issledovanie traektorii upravleniya rabotoy ekskavatora* (Research on trajectory control of excavator operation), Yuzhno-kitayskiy tekhnologicheskii universitet, 2010, pp. 11–13.