

В.С. Лысенко 

Казахский Национальный педагогический университет имени Абая, г. Алматы, Казахстан

*e-mail: vikstel.777@mail.ru

ЦИРКУЛЯЦИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЭКСЦЕНТРИЧЕСКИХ МАСС САТЕЛЛИТОВ МОДЕЛЕЙ ПРОСТЫХ ПЛАНЕТАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Аннотация

В статье с целью поиска альтернативных механических источников энергии в результате кинематического анализа двух математических моделей конструкций простых зубчатых планетарных механизмов с вращающимися эксцентрическими массами сателлитов получены аналитические зависимости циркуляции кинетической энергии этих масс в зависимости от скорости вращения водило, эксцентрической массы, геометрических размеров механизма и угла поворота водило, а также проведен анализ изменения кинетической энергии механизмов в соответствии с законом сохранения момента количества движения в зависимости от изменения момента инерции вращающихся элементов механизма в экстремальных положениях. Полученные аналитические зависимости отражают циклическое изменение кинетической энергии эксцентрических масс за период вращения механизма. Результаты работы применимы для проектирования простых планетарных механизмов как в плане оценки влияния эксцентрических масс сателлитов на вибрацию механизмов, так и в плане проектирования альтернативных планетарных передаточных механизмов для энергетических установок.

Ключевые слова: Кинематический анализ, механизм с эксцентрическими массами, планетарный механизм, циркуляция кинетической энергии, момент количества движения.

В.С. Лысенко

Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, г.Алматы, Қазақстан

ҚАРАПАЙЫП ПЛАНЕТАРЛЫҚ МЕХАНИЗМДЕР МОДЕЛЬДЕРІ ЭКЦЕНТРИКАЛЫҚ МАССАЛАРЫНЫҢ КИНЕТИКАЛЫҚ ЭНЕРГИЯСЫНЫҢ АЙНАЛЫМЫ

Аңдатпа

Мақалада механикалық энергияның баламалы көздерін табу мақсатында, екі математикалық моделін кинематикалық талдау нәтижесінде спутниктердің айналмалы эксцентрлік массалары бар қарапайым тісті планетарлық механизмдердің конструкциясы, тасымалдаушының айналу жылдамдығына, массаның айналу бұрышының геометриялық және геометриялық механизмінің өлшеміне байланысты осы массалардың кинетикалық энергиясының циркуляциясының аналитикалық тәуелділіктері, тасымалдаушы алынады, сонымен қатар шеткі позициялардағы механизмнің айналу элементтерінің инерция моментінің өзгеруіне байланысты бұрыштық импульстің сақталу заңына сәйкес механизмдердің кинетикалық энергиясының өзгеруіне талдау жүргізіледі. Алынған аналитикалық тәуелділіктер механизмнің айналу периодындағы эксцентрлік массалардың кинетикалық энергиясының циклдік өзгеруін көрсетеді. Жұмыстың нәтижелері қарапайым планетарлық механизмдерді жобалау үшін спутниктердің эксцентрлік массаларының механизмдердің діріліне әсерін бағалау тұрғысынан да, электр станциялары үшін альтернативті планетарлық беріліс механизмдерін жобалау тұрғысынан да қолданылады.

Түйін сөздер: Кинематикалық талдау, эксцентрлік массалары бар механизм, планетарлық механизм, кинетикалық энергияның айналымы, бұрыштық импульс.

V.S. Lyssenko

Kazakh National Pedagogical University named after Abai, Almaty, Kazakhstan

CIRCULATION OF KINETIC ENERGY OF ECCENTRIC MASSES OF SATELLITES OF MODELS OF SIMPLE PLANETARY MECHANISMS

Abstract

In the article, with the aim of finding alternative mechanical energy sources, as a result of kinematic analysis of two mathematical models of the designs of simple toothed planetary mechanisms with rotating eccentric masses of satellites, analytical dependencies of the circulation of the kinetic energy of these masses depending on the rotation speed of the carrier, the eccentric mass, the geometric dimensions of the mechanism and the angle of rotation of the carrier are obtained, and an analysis of the change in the kinetic energy of the mechanisms in accordance with the law of conservation of angular momentum depending on the change in the moment of inertia of the rotating elements of the mechanism in extreme positions is also carried out. The obtained analytical dependences reflect the cyclic change of the kinetic energy of the eccentric masses during the period of rotation of the mechanism. The results of the work are applicable for designing simple planetary mechanisms both in terms of assessing the influence of the eccentric masses of the satellites on the vibration of the mechanisms and in terms of designing alternative planetary transmission mechanisms for power plants.

Keywords: Kinematic analysis, mechanism with eccentric masses, planetary mechanism, circulation of kinetic energy, angular momentum.

Введение

Разработка альтернативных энергетических экологически чистых установок является весьма актуальной проблемой. Одним из путей создания альтернативных энергетических установок является использование известного эффекта циркуляции мощности, создаваемой эксцентрическими массами спутников планетарных механизмов. В этой связи исследования циркуляции кинетической энергии эксцентрических масс спутников планетарных механизмов являются актуальными. Известны вибрационные машины, широко применяемые в строительной индустрии. Принцип работы которых основан на использовании в качестве вибрационного привода вращающихся эксцентрических масс, которые создают вибрацию за счет центробежных сил инерции [1]. Теоретические и экспериментальные исследования этих механизмов показали наличие циркуляции мощности, которая в одном полупериоде вращения нагружает привод, а в другом полупериоде разгружает привод [2, 3], а также возможность возрастания амплитуды вибраций за счет резонанса в зависимости от частоты вращения привода [4]. В последние годы появились разработки, использующие отмеченные эффекты для создания конструкций инерционных приводов для энергетических и силовых машин [5, 6]. В работе [7] проведен анализ одной из возможных кинематических схем зубчатого планетарного механизма с эксцентрической массой и показано влияние циркуляции кинетической энергии эксцентрической массы на динамику механизма. В статье [8] показана картина циркуляции кинетической энергии в спутниках зубчатых механизмов даже без эксцентрической массы и сделано заключение, что изменение кинетической энергии связано с работой внешних сил, которые дополнительно нагружают конструкцию спутников. В научных работах зарубежных ученых [9-11] уделяется большой научный интерес к вопросу исследования планетарных механизмов в плане влияния эксцентрических масс на динамику этих механизмов. Задачей данной работы является анализ циркуляции кинетической энергии эксцентрических масс спутников двух разных конструкций простых планетарных механизмов.

Методология исследования

Для анализа циркуляции кинетической энергии эксцентрической массы спутника рассмотрим вариант конструкции простого планетарного механизма, схема которого представлена на рисунке 1. Механизм состоит из жестко закрепленной солнечной шестерни 1 радиусом r_0 , вращающегося с постоянной угловой скоростью ω_H вокруг неподвижного центра

О водило 2 радиусом R_2 , который через шарнир в точке O_1 приводит в движение обкатывающего шестерню 1 спутник 3 радиусом r_1 с закрепленной на расстоянии R_1 эксцентрической массы m . При этом спутник 3 вращается с угловой скоростью ω_1 относительно центра O_1 . Эксцентрическая масса m совершает сложное движение – относительно вокруг центра O_1 и переносное вокруг центра O .

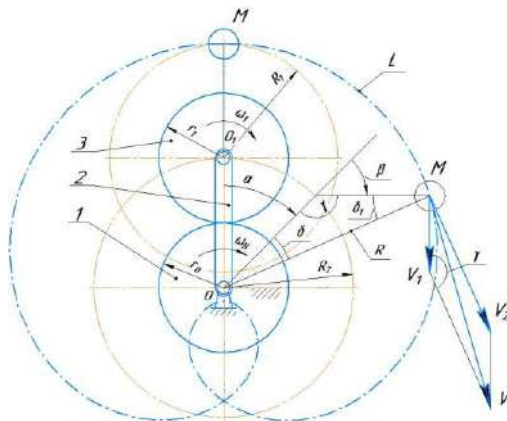


Рисунок 1. Схема механизма

Для сравнения картины циркуляции кинетической энергии эксцентричных масс спутников проанализируем модифицированную конструкцию планетарно-зубчатого механизма со спаренными спутниками, схема которой представлена на рис. 2.

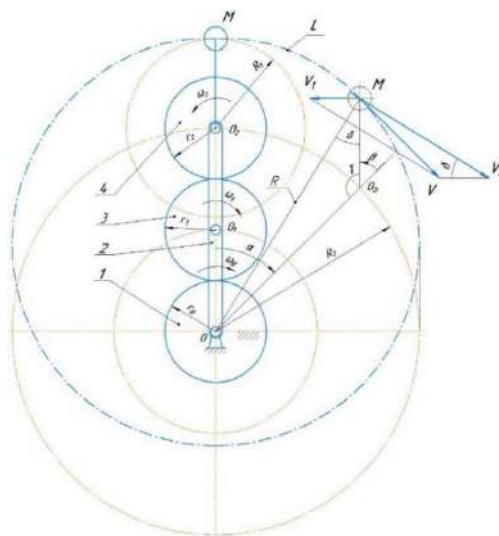


Рисунок 2. Схема планетарного механизма со спаренными спутниками

Механизм состоит из жестко закрепленной солнечной шестерни 1 радиусом r_0 , вращающегося с постоянной угловой скоростью ω_H вокруг неподвижного центра O водило 2 радиусом R_2 , который через шарнир в точке O_1 приводит в движение обкатывающего шестерню 1 спутник 3 радиусом r_1 , а также через шарнир в точке O_2 дополнительный находящийся в зацеплении с спутником 3 спутник 4 с закрепленной на расстоянии R_1 эксцентрической массы M . При этом спутник 3 вращается с угловой скоростью ω_1 относительно центра O_1 , а спутник 4 вращается с угловой скоростью ω_2 . Эксцентрическая масса M совершает сложное движение – относительно вокруг центра O_2 и переносное вокруг центра O .

Теория. Анализ механизма, схема которого представлена на рисунке 1. Рассмотрим движение эксцентрической массы M . При соответствующих радиусах колес r_0 и r_1 , радиус $R_2 = (r_0 + r_1)$ и угловая скорость сателлита 3

$$\omega_1 = \frac{r_0}{r_1} \omega_H. \quad (1)$$

Угол поворота сателлита β будет связан с углом поворота водила α аналогичной зависимостью

$$\beta = \frac{r_0}{r_1} \alpha. \quad (2)$$

Движение центра массы M будет совершать перемещение по траектории L . Радиус вектор R этой траектории по модулю можно определить по следующей зависимости

$$R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos \gamma}, \quad (3)$$

где $\gamma = \pi - \beta$.

Линейная скорость центра масс M относительного движения будет пропорциональна угловой скорости ω_l и радиусу R_l , то есть

$$V_1 = \omega_1 R_1. \quad (4)$$

Линейная скорость центра масс M переносного движения будет равна

$$V_2 = \omega_H R. \quad (5)$$

Суммарная скорость точки центра масс M будет определяться векторной суммой относительной скорости V_1 и переносной скорости V_2 , а по модулю она будет равна

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos \gamma}. \quad (6)$$

Кинетическая энергия эксцентрической массы M

$$T = 0,5MV^2. \quad (7)$$

Так как кинетическая энергия движения эксцентрической массы M в зависимости от угла α поворота водила 2 является величиной не постоянной в связи с изменением радиус вектора R и, соответственно переносной скорости V_2 , то будет переменное поле кинетической энергии.

Подставляя в формулу (7) выражение (6) и, учитывая зависимости (1) – (5), получим зависимость кинетической энергии от угла поворота α водило 2

$$T = 0,5 M \omega_H^2 R_2^2 \left\{ 1 + A^2(1 + B^2) + 2A \cos(B\alpha) \left[1 + B(1 + A^2 + 2A \cos(B\alpha))^{0,5} \right] \right\}, \quad (8)$$

где $A = R_1/R_2$, $B = r_0/r_1$.

На рисунке 3 представлены графики зависимости кинетической энергии от угла α поворота водило за один оборот вычисленные по формуле (8) при $r_0 = r_1 = 0,03\text{м}$, $\omega_H = 50 \text{ с}^{-1}$, $R_2 = 0,06\text{м}$, $m = 0,5 \text{ кг}$, при разных значениях угловой скорости водило: при $R_l = 0,05\text{м}$ – сплошная линия, при $R_l = 0,03\text{м}$ – точечная линия и при $R_l = 0,01\text{м}$ – пунктирная линия.

Из графика рисунка 2 видно, что максимальное значение кинетической энергии эксцентрической массы сателлита при положении механизма при максимальном значении переменного R . Следует отметить, что при этом положении механизма, очевидно, будет и максимальный момент инерции.



Рисунок 3. График зависимости кинетической энергии эксцентрисеской массы сателлита от угла поворота водило

Также графики показывают возрастание отношения максимальных значений кинетической энергии к их минимальным значениям при увеличении эксцентриситета R_1 массы M .

Анализ механизма, схема которого представлена на рисунке 2. Рассмотрим движение эксцентрисеской массы M механизма, схема которого представлена на рисунке 2. При соответствующих радиусах колес r_0 , r_1 и r_2 , радиус $R_2 = (r_0 + 2r_1 + r_2)$ и угловая скорость сателлита 3 и сателлита 4

$$\omega_1 = \frac{r_0}{r_1} \omega_H, \quad \omega_2 = \frac{r_0}{r_2} \omega_H. \quad (9)$$

Угол поворота сателлита 4 β будет связан с углом поворота водила α аналогичным соотношением угловых скоростей зависимостью

$$\beta = \frac{r_0}{r_2} \alpha. \quad (10)$$

Движение центра массы M будет совершать перемещение по траектории L . Радиус вектор R этой траектории можно определить по следующей зависимости

$$R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos \gamma}, \quad (11)$$

где $\gamma = \pi - \beta$.

Линейная скорость центра масс M относительного движения будет пропорциональна угловой скорости ω_1 и радиусу R_1 , то есть

$$V_1 = \omega_2 R_1. \quad (12)$$

Линейная скорость центра масс M переносного движения будет равна

$$V_2 = \omega_H R. \quad (13)$$

Суммарная скорость точки центра масс M будет определяться векторной суммой относительной скорости V_1 и переносной скорости V_2 , а по модулю она будет равна

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos \delta}. \quad (14)$$

$$\delta = \arccos\{(R_1/R_2 + \cos \beta)/[1 + (R_1/R_2)^2 + 2R_1/R_2 \cos \beta]^{0,5}\}. \quad (15)$$

Кинетическая энергия эксцентрисеской массы M

$$T = 0,5MV^2. \quad (16)$$

Так как кинетическая энергия движения эксцентрической массы M в зависимости от угла α поворота водило 2 является величиной не постоянной в связи с изменением радиус вектора R и, соответственно переносной скорости V_2 , то будет переменное поле кинетической энергии.

Подставляя в формулу (16) выражение (14) и, учитывая зависимости (9) – (13), получим зависимость кинетической энергии эксцентрической массы от угла поворота α водило 2

$$T = 0,5 M\omega_H^2 R_2^2 [1 + C^2(1 + D)^2 + 2C(1 + D) \cos \delta], \quad (17)$$

где $C = R_1/R_2$, $D = r_0/r_2$.

На рисунке 4 представлены графики зависимости кинетической энергии от угла α поворота водило за один оборот вычисленные по формуле (17) с учетом зависимости (15) при $r_0 = r_1 = r_2 = 0,03\text{м}$, $\omega_H = 50 \text{ с}^{-1}$, $R_2 = 0,12\text{м}$, $M = 0,5 \text{ кг}$, при разных значениях R_1 : при $R_1 = 0,05\text{м}$ – сплошная линия, при $R_1 = 0,03\text{м}$ - пунктирная линия и при $R_1 = 0,01\text{м}$ штрих пунктирная линия.

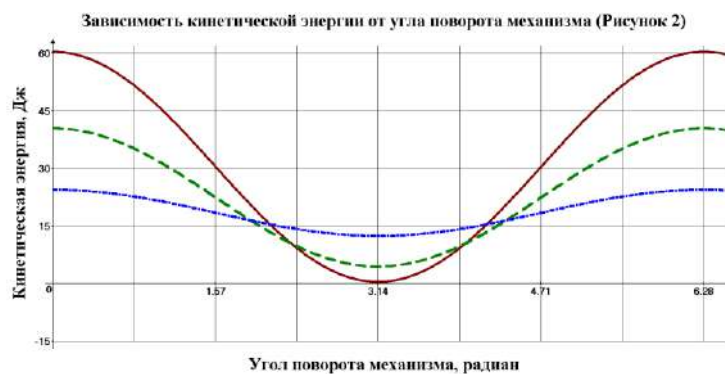


Рисунок 4. График зависимости кинетической энергии эксцентрической массы сателлита от угла поворота водило для механизма со спаренными сателлитами

Графики аналитической зависимости кинетической энергии рисунка 4 показывают возрастание амплитуды циркуляции с увеличением эксцентриситета R_1 массы M .

При идеальной балансировки колеса 4 (рисунок 2), то есть при $R_1 = 0$ циркуляция кинетической энергии массы M не будет, так как зависимость (17) принимает вид

$$T = 0,5 M\omega_H^2 R_2^2. \quad (18)$$

Для анализа влияния циркуляции кинетической энергии важно знать степень изменения угловой скорости вращения. Это связано с тем, что мощность вращательных приводов определяется произведением крутящего момента на угловую скорость. Циркуляцию кинетической энергии эксцентрической массы M анализируемых механизмов можно также показать аналогично [7] в соответствии с законом сохранения момента количества движения.

Для данного механизма (рисунок 1) в силу закона сохранения момента количества движения ($J\omega = \text{const}$, где J – суммарный момент инерции системы) угловые скорости вращения подвижных звеньев не будут постоянными из-за изменения момента инерции эксцентрической массы сателлитов. Суммарный момент инерции вращающихся элементов механизма (рис.1) относительно центра вращения O можно определить по известным зависимостям

$$J = \sum J_n + mR^2, \quad (19)$$

где $\sum J_n$ – суммарный момент инерции составляющих звеньев механизма с постоянным моментом инерции, mR^2 – приведенный момент инерции центра масс, который изменяется в

зависимости от значения R . Из выражения (3) для механизма с одним сателлитом (рис.1) видно, что радиус вектор центра масс изменяется в пределах $(R_1 + R_2) < R < (R_2 - R_1)$, что позволяет определить минимальное и максимальное значения суммарного момента инерции.

$$J_{max, min} = \sum J_n + mR(1 + b) + [R_2 \pm R_1]^2. \quad (20)$$

Таким образом, в соответствии с законом сохранения момента количества движения, угловая скорость в положении механизма с минимальным моментом инерции будет максимальна и, наоборот – в положении механизма с максимальным моментом инерции угловая скорость будет минимальна, то есть $J_{max}\omega_{min} = J_{min}\omega_{max}$. Из этого выражения, учитывая (20), определим максимальную угловую скорость

$$\omega_{max} = \omega_{min} \frac{\sum J_n + m[R_2 + R_1]^2}{\sum J_n + m[R_2 - R_1]^2}. \quad (21)$$

Это означает, что угловая скорость в процессе движения механизма в каждом цикле вращения будет импульсно меняться от максимального значения до минимального и обратно. Соответственно будет импульсно изменяться кинетическая энергия механизма. Определим кинетические энергии механизма T_1 в положении механизма с максимальным радиус вектором R и T_2 в положении механизма с минимальным радиус вектором R , которые по известным зависимостям можно записать в виде

$$T_1 = \frac{1}{2} J_{max} \omega_{min}^2 = \frac{1}{2} \{ \sum J_n + m[R_2 + R_1]^2 \} \omega_{min}^2, \quad (22)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} J_{min} \omega_{max}^2 = \frac{1}{2} \{ \sum J_n + m[R_2 - R_1]^2 \} \omega_{max}^2. \quad (23)$$

Подставим в выражение (23) значение (21) и, учитывая зависимость (22) получим

$$T_2 = T_1 \frac{\sum J_n + m[R_2 + R_1]^2}{\sum J_n + m[R_2 - R_1]^2}. \quad (24)$$

Выражение (24) показывает степень изменения кинетической энергии механизма при переходе его из положения с максимальным радиус вектором R в положение с минимальным радиус вектором R , а также существенного влияния на циркуляцию этой энергии суммарного момента инерции составных звеньев механизма. Для механизма со спаренными сателлитами (рис. 2) картина импульсного изменения кинетической энергии будет аналогична описанной выше.

Результаты исследования

Полученные аналитические зависимости циркуляции кинетической энергии эксцентрической массы M исследуемых механизмов показывают пропорциональную зависимость степени этой циркуляции от квадратов угловой скорости водила и соотношения геометрических размеров механизмов. Эта циркуляция также показана из анализа в соответствии с законом сохранения момента количества движения из-за изменения момента инерции механизмов за счет переменных положений его эксцентрических масс. При этом происходит соответственное импульсное увеличение скорости вращения водила 4.

Особенностью механизма с двумя сателлитами (рисунок 2) в том, что направление вращения сателлита 4 механизма не совпадает с направлением вращения водила 2. Поэтому описание картины импульсного изменения кинетической энергии будет несколько иной, требующей учета влияния гироскопического эффекта. Рассмотрение этого эффекта будет проведено после комплексных экспериментальных исследований механизма со спаренными сателлитами и выходит за рамки этой статьи.

Дискуссия

Полученные зависимости циркуляции кинетической энергии эксцентрических масс сателлитов разных моделей простых планетарных механизмов показывают разную картину изменения кинетической энергии. Таким образом, конструкция планетарного механизма влияет на циркуляцию кинетической энергии, и соответственно мощности. Кроме того, графики циркуляции кинетической энергии имеют симметричный характер. В работах [5] авторами показано использование циркуляции мощности за счет использования обгонных муфт, а авторы работы [6] используют эффект циркуляции мощности за счет создания асимметричности периодов изменения кинетической энергии. Перспектива использования результатов и методологии данной работы связаны с разработкой конструкций и способов оптимизации эффекта циркуляции кинетической энергии эксцентрических масс сателлитов с минимальной нагрузкой на привод и максимальной мощности на выходном валу.

Выводы

Полученные аналитические зависимости линейных скоростей и циркуляции кинетической энергии эксцентрических масс сателлитов будут весьма полезны для динамического анализа исследованных конструкций планетарных механизмов и оптимизации геометрических параметров (соотношения диаметров колес) этих механизмов в соответствии с технологическими целями их использования. В продолжении данной работы изготавливаются экспериментальные стенды с целью сопоставления опытных данных с аналитическими зависимостями.

Благодарность

Работа выполнена и финансировалась в рамках внутривузовского гранта Ректора КазНПУ имени Абая в 2024 году. (Приказ № 05.04/326 от 14.05.2024 года)

Список использованных источников

- [1] Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Физматлит, 1994. 400с. URL: <https://djvu.online/file/MMtgkzdP5feE> (дата обращения: 04.06.2025).
- [2] Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники. – М., Машиностроение, 1968. – 362 с. // URL: <https://djvu.online/file/hLSIMtADdYUh2> (дата обращения: 04.06.2025).
- [3] Быховский И.И. Энергетические соотношения при колебаниях // Справочник «Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов». – М., изд-во Машиностроение, 1970. – 538 с. // URL: <https://elima.ru/books/?id=6285> (дата обращения: 04.06.2025).
- [4] Быховский И.И., Попов С.И. Автоматизация резонансных вибромашин. – М.: ЦНИИИ и ТЭИСДКМ. Серия II, 1972. – 45 с. // URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007283220> (дата обращения: 04.06.2025).
- [5] Линевиц Э.И. Применение центробежной силы в качестве источника мощности. // URL: <http://www.dlinevitch.narod.ru/pages.htm> (дата обращения: 11.12.2024).
- [6] FelexWurth, Flichkraft – Energiequelle, Raum&Zeit, 124/2003, s.16-19. // URL: http://www.borderlands.de/net_pdf/NET0904S25-30.pdf (дата обращения: 04.06.2025).
- [7] Лысенко В.С., Пралиев С.Ж., Сулейменов Б.Т., Баубексов С.Д. Анализ инерционного механизма // Современные наукоемкие технологии. – 2012. – №12 – С.20-23. // URL: www.rae.ru/snt/?section=content&op=show_article&article_id=10000339 (дата обращения: 11.12.2024)
- [8] Коляда А.Ф., Кожмякин К.С. Циркуляция кинетической энергии в сателлитах зубчатых механизмов. Вестник двигателестроения № 1, 2014. С. 41-43. // URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsirkulyatsiya-kineticheskoy-energii-v-satellitah-zubchatyh-mehanzimov> (дата обращения: 11.12.2024)
- [9] Xuezong Bai, Hu-zi Qiu, Jian-fei Shi, De-wang Li. Nonlinear dynamic modeling and global instability analyses of planetary gear trains considering multi-state engagement and tooth-contact temperature effect. June 2023 DOI: [10.21203/rs.3.rs-3022704/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3022704/v1)
- [10] J. Wei et al., "A coupling dynamics analysis method for a multistage planetary gear system," Mechanism and Machine Theory, Vol. 110, pp. 27–49, Apr. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.12.007>
- [11] Jianjun Hu, Bo Mei, Hang Peng, Xingyue Jiang. Optimization Design and Analysis for a Single Motor Hybrid Powertrain Configuration with Dual Planetary Gears Applied Sciences. 2019, 9(4), 707; <https://doi.org/10.3390/app9040707>

- [12] Syahputra, Muhammad & Subekti, Subekti & Indah, Nur. (2024). Effect of eccentric mass on rotor dynamics as a source of harvesting energy vibration. *JTTM : Jurnal Terapan Teknik Mesin*. 5. 54-61. <https://doi.org/10.37373/jttm.v5i1.855>
- [13] Kangqi Fan, Jiayu Hao, Chenyu Wang, Chao Zhang, Weidong Wang, Fei Wang, An eccentric mass-based rotational energy harvester for capturing ultralow-frequency mechanical energy, *Energy Conversion and Management*, Volume 241, 2021, 114301, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114301>
- [14] Qinxue Tan, Kangqi Fan, Kai Tao, Liya Zhao, Meiling Cai, A two-degree-of-freedom string-driven rotor for efficient energy harvesting from ultra-low frequency excitations, *Energy*, Volume 196, 2020, 117107, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117107>
- [15] Willingham, Lukas, "Eccentric rotating mass motor vibrational plate modeling" (2020). 2020 Spring Honors Capstone Projects. 49. https://mavmatrix.uta.edu/honors_spring2020/49

References

- [1] Blekhman I.I. (1994) *Vibratsionnaya mekhanika [Vibrational mechanics]*. M.: Fizmatlit, 400 p. URL: <https://djuv.online/file/MMTgkzDP5feE> (accessed: 04.06.2025).
- [2] Bykhovskiy I.I. (1968) *Osnovy teorii vibratsionnoy tekhniki [Fundamentals of vibration technology theory]*. M.: Mashinostroenie, 362 p. URL: <https://djuv.online/file/hLSIMtADdYUh2> (accessed: 04.06.2025).
- [3] Bykhovskiy I.I. (1970) *Energeticheskie sootnosheniya pri kolebaniyakh [Energy relations during vibrations]*. In: *Spravochnik "Vibratsionnye mashiny v stroitel'stve i proizvodstve stroitel'nykh materialov" [Handbook "Vibration machines in construction and building materials production"]*. M.: Mashinostroenie, 538 p. URL: <https://elima.ru/books/?id=6285> (accessed: 04.06.2025).
- [4] Bykhovskiy I.I., Popov S.I. (1972) *Avtomatizatsiya rezonansnykh vibromashin [Automation of resonant vibration machines]*. M.: TsNIII i TEISDKM. Seriya II, 45 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007283220> (accessed: 04.06.2025).
- [5] Linevich E.I. (n.d.) *Primenenie tsentrobeznoy sily v kachestve istochnika moshchnosti [Application of centrifugal force as a power source]*. URL: <http://www.dlinevitch.narod.ru/pages.htm> (accessed: 11.12.2024).
- [6] FelexWurth (2003) *Flickkraft - Energiequelle*. *Raum&Zeit*, 124, pp. 16-19. URL: http://www.borderlands.de/net_pdf/NET0904S25-30.pdf (accessed: 04.06.2025).
- [7] Lysenko V.S., Praliev S.Zh., Suleymenov B.T., Baubekov S.D. (2012) *Analiz inertsiionnogo mekhanizma [Analysis of inertial mechanism]*. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, № 12, pp. 20-23. URL: www.rae.ru/snt/?section=content&op=show_article&article_id=10000339 (accessed: 11.12.2024).
- [8] Kolyada A.F., Kozhemyakin K.S. (2014) *Tsirkulyatsiya kineticheskoy energii v satellitakh zubchatykh mekhanizmov [Circulation of kinetic energy in gear mechanism satellites]*. *Vestnik dvigatelestroeniya*, № 1, pp. 41-43. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsirkulyatsiya-kineticheskoy-energii-v-satellitah-zubchatyh-mekhanizmov> (accessed: 11.12.2024).
- [9] Xuezhong Bai, Hu-zi Qiu, Jian-fei Shi, De-wang Li. *Nonlinear dynamic modeling and global instability analyses of planetary gear trains considering multi-state engagement and tooth-contact temperature effect*. June 2023 DOI: [10.21203/rs.3.rs-3022704/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3022704/v1)
- [10] J. Wei et al., "A coupling dynamics analysis method for a multistage planetary gear system," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 110, pp. 27–49, Apr. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.12.007>
- [11] Jianjun Hu, Bo Mei, Hang Peng, Xingyue Jiang. *Optimization Design and Analysis for a Single Motor Hybrid Powertrain Configuration with Dual Planetary Gears* *Applied Sciences*. 2019, 9(4), 707; <https://doi.org/10.3390/app9040707> <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/4/707>
- [12] Syahputra, Muhammad & Subekti, Subekti & Indah, Nur. (2024). Effect of eccentric mass on rotor dynamics as a source of harvesting energy vibration. *JTTM : Jurnal Terapan Teknik Mesin*. 5. 54-61. <https://doi.org/10.37373/jttm.v5i1.855>
- [13] Kangqi Fan, Jiayu Hao, Chenyu Wang, Chao Zhang, Weidong Wang, Fei Wang, An eccentric mass-based rotational energy harvester for capturing ultralow-frequency mechanical energy, *Energy Conversion and Management*, Volume 241, 2021, 114301, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114301>
- [14] Qinxue Tan, Kangqi Fan, Kai Tao, Liya Zhao, Meiling Cai, A two-degree-of-freedom string-driven rotor for efficient energy harvesting from ultra-low frequency excitations, *Energy*, Volume 196, 2020, 117107, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117107>
- [15] Willingham, Lukas, "Eccentric rotating mass motor vibrational plate modeling" (2020). 2020 Spring Honors Capstone Projects. 49. https://mavmatrix.uta.edu/honors_spring2020/49