

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 05.06.2023 22:27:26  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра механики, мехатроники и робототехники

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
О.Н. Локтионова  
« 30 » 5 (10.06.2023 г.)



## КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КУЛАЧКОВОГО МЕХАНИЗМА

Методические рекомендации  
по выполнению лабораторной работы по дисциплине  
ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН  
для студентов направления подготовки 23.03.03 «Эксплуатация  
транспортно-технологических машин и комплексов»

Курск 2023

УДК 621.(076.1)

Составители: С.Ф. Яцун, А.Н. Рукавицын

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *П.А. Безмен*

**Кинематический анализ кулачкового механизма:**  
Методические рекомендации по выполнению лабораторной работы  
по дисциплине: Теория механизмов и машин / Юго-Зап. гос. ун-т;  
сост.: С.Ф. Яцун, А.Н. Рукавицын – Курск, 2023. – с. 14.

Содержат сведения по вопросам выполнения лабораторной работы студентов, подготовке и оформлению отчетных материалов.

Предназначены для студентов направления подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.

Усл.печ. л. 6,16. Уч.-изд. л. 5,58.

Тираж 30 экз. Заказ 525. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1. Общие сведения о кулачковых механизмах.....	5
2. Кинематическое исследование кулачкового механизма .....	7
3. Условия силовой работоспособности .....	10
4. Порядок выполнения работы.....	12
5. Контрольные вопросы.....	13
Библиографический список .....	13

## **ВВЕДЕНИЕ**

Теория механизмов и машин (ТММ) – наука об общих методах исследования свойств механизмов и машин и проектирования их схем – крайне необходима при решении проблем, возникающих при развитии и продвижении продукции такой отрасли, как машиностроение.

Проектирование представляет собой область умственного труда, крайне нуждающуюся в автоматизации, т. к. решаемые здесь задачи сложные, и порой даже большой коллектив конструкторов не может найти действительно лучший вариант проекта. Основная проблема в этой области состоит сейчас уже не в разработке методов проектирования, рассчитанных на использование их человеком, а в создании таких методов, которые были бы ориентированы на применение ЭВМ.

Известно, что конечным результатом кинематического исследования является определение закономерности изменения кинематических параметров звеньев, их соответствие геометрическим параметрам механизма и кинематике входного звена.

Соответственно задачами кинематического анализа являются:

- определение положений звеньев и траекторий движения, которые описывают отдельные точки звеньев;
- определение скоростей звеньев и скоростей отдельных точек этих звеньев;
- определение ускорений звеньев и ускорений отдельных точек этих звеньев.

Все существующие методы определения кинематических параметров механизмов делятся на графические, графоаналитические и аналитические.

## **Лабораторная работа «КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КУЛАЧКОВОГО МЕХАНИЗМА»**

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** Ознакомиться с методикой исследования движения толкателя и получить навыки кинематического анализа существующих кулачковых механизмов.

**ОБЪЕКТ** выполнения работы – модель барабанного кулачкового механизма с поступательнодвижущимся роликовым толкателем.

### **1. Общие сведения о кулачковых механизмах**

Механизм, в состав которого входит кулачок, называют кулачковым.

Кулачок – это звено, элементом высшей кинематической пары которого служит поверхность переменной кривизны. Он образует с взаимодействующим с ним ведомым звеном – толкателем – высшую кинематическую пару. Линия пересечения рабочей поверхности кулачка плоскостью, параллельной плоскости движения, называется профилем кулачка. Форма профиля кулачка определяет закон движения ведомого звена. Задавая профилю кулачка различную форму, можно получить любой желаемый закон движения толкателя, в том числе с остановками. Благодаря этому свойству, кулачковые механизмы получили широкое распространение в устройствах, управляющих какими-либо процессами. Например, в двигателях внутреннего сгорания их применяют для управления газораспределением, моментом зажигания или впрыска, в сельскохозяйственных машинах – для управления всевозможными автоматическими устройствами: вязка тюков в сенных прессах, открытие клапанов копнителеей, подъем рабочих органов в транспортное положение и т.д.

Кулачковым механизмам присущи и недостатки, связанные в основном с наличием высшей кинематической пары. Звенья, образующие эту пару, касаются между собой по линии, поэтому в месте касания, под действием нагрузки возникают большие удельные давления. Вследствие этого для уменьшения износа звенья

кулачкового механизма должны изготавливаться из высококачественных материалов, а их поверхности соответствующим образом обрабатываться. Кулачковые механизмы бывают как плоскими, так и пространственными.

Плоские кулачковые механизмы для удобства рассмотрения разобьем на механизмы в зависимости от движения выходного звена на два вида:

1. Кулачковый механизм с поступательно движущимся толкателем (ползуном).

2. Кулачковый механизм с поворачивающимся толкателем (коромыслом).

Пример первого кулачкового механизма показан на рис.1а. Кулачок 1, вращаясь с заданной угловой скоростью, действует на ролик 3 и заставляет толкатель 2 в виде ползуна двигаться в направляющих возвратно-поступательно.

На рис.1б приведена схема кулачкового механизма с поворачивающимся толкателем (коромыслом). Кулачок 1, вращаясь с заданной угловой скоростью  $\omega_1$ , действует на толкатель 2 и заставляет последний вращаться вокруг оси вращения А.

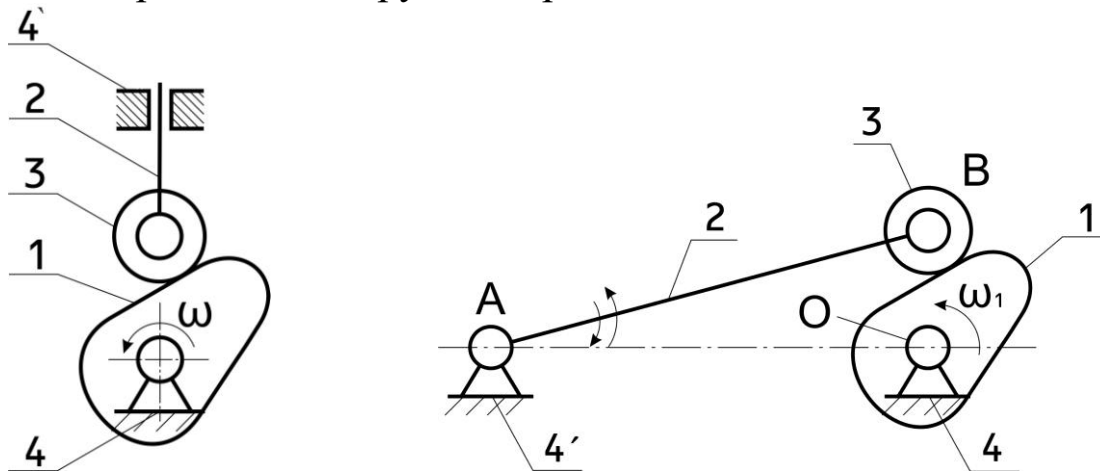


Рис.1 Кулачковый механизм:

а - с поступательно-движущимся толкателем

б - с поворачивающимся толкателем

При работе кулачковых механизмов необходимо, чтобы было постоянное соприкосновение ведущего и ведомого звеньев. Это

может быть обеспечено либо силовым замыканием, чаще всего с помощью пружин, либо геометрически, если выполнить профиль кулачка 1 в форме пазы, боковые поверхности которого воздействуют на ролик 3 толкателя 2. Пазовый (барабанный) кулачок обеспечивает геометрическое замыкание высшей пары кулачкового механизма.

Часто встречаются пространственные кулачковые механизмы, которые весьма разнообразны по конструктивному оформлению. Наиболее распространенными пространственными кулачковыми механизмами являются механизмы барабанного типа (Рис.2). Цилиндрический кулачок 1 с профильным пазом, обеспечивающим кинематическое замыкание высшей пары, вращается с постоянной угловой скоростью и через ролик 3 сообщает качательное движение толкателю 2, закон изменения которого зависит от очертания пазы.

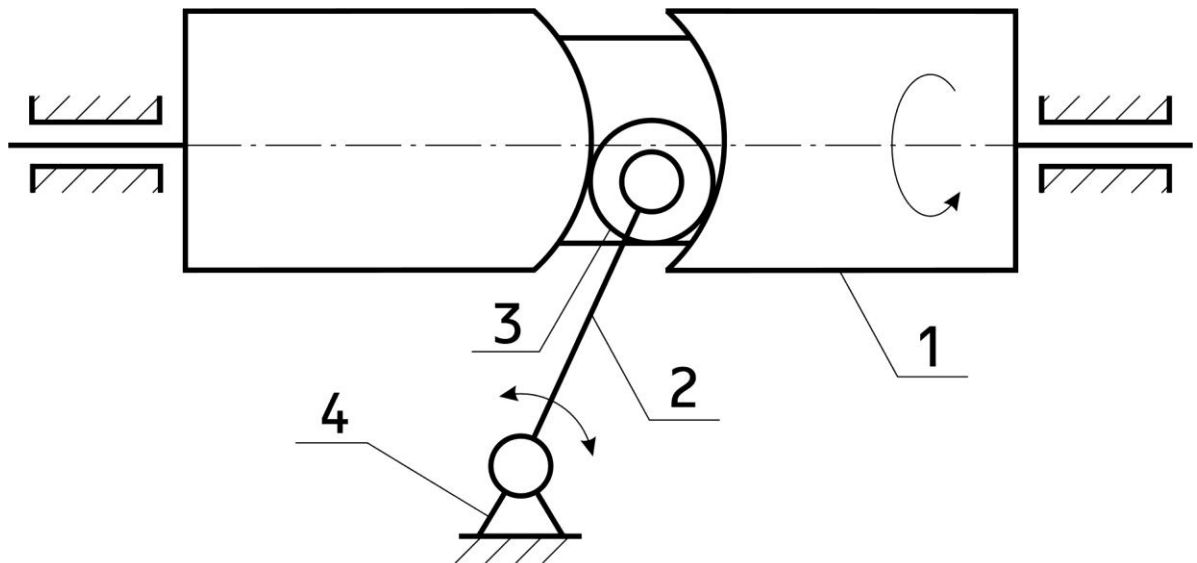


Рис.2. Пространственный кулачковый механизм барабанного типа

## 2. Кинематическое исследование кулачкового механизма

Основной задачей кинематического исследования является определение перемещения, скорости и ускорения толкателя или угла поворота, угловой скорости и углового ускорения коромысла в зависимости от времени или от угла поворота кулачка. Эти зависимости могут быть получены или в виде аналитических

выражений, например параметрических функций, или в виде графиков этих функций, называемых кинематическими диаграммами. Кулачковые механизмы относятся к циклическим механизмам. Циклом в технике называют совокупность процессов в системе периодически повторяющихся явлений, при которых объект, подвергающийся изменению в определенной последовательности, вновь приходит в исходное состояние. В кулачковом механизме цикл совершается за один оборот кулачка, поэтому для кинематического анализа удобнее использовать кинематический цикл механизма. Кинематическим циклом называют период времени, в течение которого происходит полное изменение кинематических параметров толкателя, по его окончании они принимают первоначальные значения. В течение кинематического цикла толкатель или коромысла совершает определенные движения.

Фазовые углы различаются на следующие:

- фаза удаления  $\Theta_u$  – угол, при повороте вала на который происходит максимальное перемещение толкателя между его крайними положениями;
- фаза верхнего стояния  $\Theta_{в.в}$  – угол максимального удаления толкателя от оси кулачка;
- фаза сближения  $\Theta_c$  соответствует перемещению толкателя из дальнего в ближнее положение, противоположна по смыслу фазе удаления, но не обязательно равна ей по величине;
- фаза нижнего стояния  $\Theta_{н.в}$  – соответствует минимальному удалению и по смыслу противоположна  $\Theta_{в.в}$ .

Если сложить все фазовые углы, должна получиться полная окружность

$$\Theta = \Theta_u + \Theta_{в.в} + \Theta_c + \Theta_{н.в} = 2\pi.$$

Рабочий ход складывается из первых трех фаз:

$$\Theta_{р.х} = \Theta_u + \Theta_{в.в} + \Theta_c.$$

Холостой ход образуется из фазы нижнего стояния:

$$\Theta_{х.х} = \Theta_{н.в}.$$

Каждой фазе работы ставится в соответствие один из профильных углов  $\Sigma$ :  $\Sigma_u$ ;  $\Sigma_{в.в}$ ;  $\Sigma_c$ ;  $\Sigma_{н.в}$ .



Обычно фазовый и профильный угол для каждого состояния не равны между собой  $\Theta \neq \Sigma$ .

Расчет кинематики кулачкового устройства базируется на линейных и угловых размерах его компонентов. Соотношение между ними называют законом выходного звена кинематической схемы.

Последовательность чередования и продолжительность фаз в цикле, представленную графически или в таблице, называют циклограммой механизма или машины. Характер движения толкателя изображают в виде графика функции  $S_{\max}=S(t)$ , или  $S_{\max} = S(\varphi)$ , называемого диаграммой перемещения толкателя. По оси абсцисс откладывают угол поворота кулачка в радианах или время в секундах, ограничившись рабочим углом поворота или рабочим временем.

После построения диаграммы перемещения графическим дифференцированием строятся диаграммы скорости и ускорения. На рис. 3 представлены кинематические диаграммы, полученные при исследовании кулачкового механизма с возвратно-поступательным движением толкателя по закону с линейным ускорением.

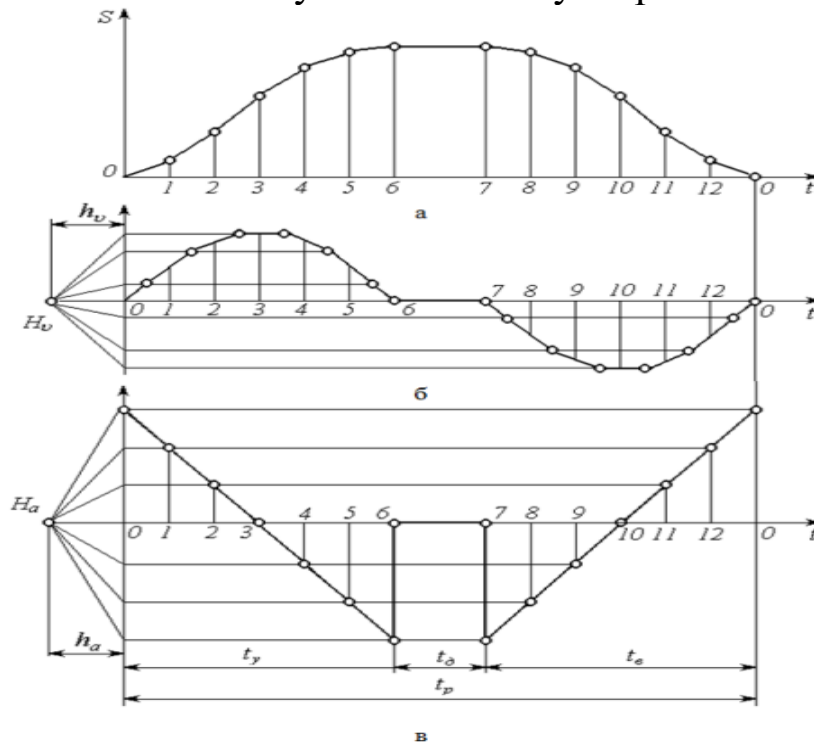


рис.3 Кинематические диаграммы:  
а – перемещения; б – скорости; ускорения

### 3. Условия силовой работоспособности

Рассмотрим силы, действующие в кулачковом механизме, например, с дисковым кулачком и остроконечным толкателем (рис. 4).

Если пренебречь трением между кулачком и толкателем, то сила  $N$  давления кулачка на толкатель будет направлена по нормали  $n-n$  к профилю кулачка. Угол  $\alpha$ , образованный нормалью  $n-n$  с направлением движения толкателя, является углом давления.

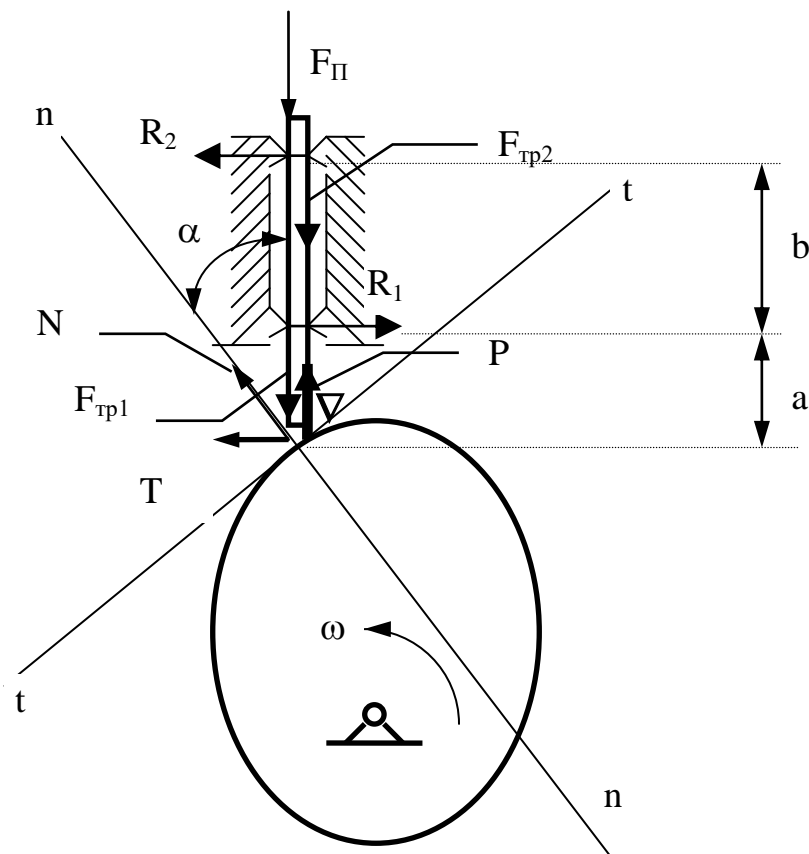


Рис.4. Силы, действующие в кулачковом механизме

Если рассмотреть равновесие толкателя, то он будет находится в равновесии под действием силы давления  $N$ , которую разложим на составляющие  $P = N \cdot \cos \alpha$  и  $T = N \cdot \sin \alpha$ , реакций  $R_1$  и  $R_2$  направляющих,

сил трения  $F_{\text{тр}1}$  и  $F_{\text{тр}2}$  в направляющих и приведенной силы сопротивления  $F_{\text{п}}$ , учитывающей полезные сопротивления, силу тяжести и силу инерции толкателя, а также силу упругости замыкающей пружины. Уравнения равновесия толкателя будут иметь вид:

$$\begin{cases} P - F_{\text{тр}1} - F_{\text{тр}2} - F_{\text{п}} = 0 \\ R_1 - T - R_2 = 0 \\ -R_1 \cdot a + R_2 \cdot (a + b) = 0 \\ T = P \cdot \operatorname{tg} \alpha \\ F_{\text{тр}1} = f_{\text{тр}} \cdot R_1 \\ F_{\text{тр}2} = f_{\text{тр}} \cdot R_2 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $f_{\text{тр}}$  — коэффициент трения материалов направляющей и толкателя;

$a$  — вылет толкателя;

$b$  — длина направляющей.

Из третьего уравнения системы (1) выразим  $R_1 = R_2 \cdot \frac{a+b}{a}$  и вместе с четвертым подставим во второе. В результате получим

$$R_2 = P \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{a}{b}, \quad (2)$$

$$R_1 = P \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{a+b}{b}. \quad (3)$$

Затем, подставляя пятое и шестое уравнения системы (1) в первое с учетом выражений (2) и (3), получим

$$P - f_{\text{п}} \cdot P \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{a+b}{b} - f_{\text{п}} \cdot P \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{a}{b} - F_{\text{п}} = 0. \quad (4)$$

Так как приведенная сила  $F_{\text{п}}$  при обеспечении постоянного контакта кулачка и толкателя не изменяет своего направления, то равенство (4) можно заменить неравенством

$$P - f_{\text{п}} \cdot P \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{a+b}{b} - f_{\text{п}} \cdot P \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{a}{b} \geq 0. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что  $\alpha \leq \arctg\left(\frac{b}{f_{\text{п}} \cdot (2a + b)}\right)$ . Обозначая

правую часть данного неравенства за  $[\alpha]$  - допускаемое значение угла давления, зависящее лишь от свойств трения и особенностей конструкции направляющей и толкателя, получаем условие силовой работоспособности рассматриваемого кулачкового механизма

$$\alpha \leq [\alpha]. \quad (6)$$

При нарушении условия (6) произойдет заклинивание механизма, т. е. сколь угодно большой по величине крутящий момент на кулачке не сможет передать движению толкателю, а лишь вызовет его поломку. Следует учитывать, что заклинивание механизма при силовом замыкании обычно имеет место только на фазе удаления, а при геометрическом — как на фазе удаления, так и на фазе приближения.

На практике допускаемое значение угла давления  $[\alpha]$  для кулачковых механизмов с поступательно движущимся толкателем принимают равным

$[\alpha] = 30^\circ \dots 40^\circ$  — для остроконечного толкателя;

$[\alpha] = 40^\circ \dots 45^\circ$  — для роликового толкателя;

а для механизмов с качающимся (коромысловым) толкателем —

$[\alpha] = 45^\circ \dots 50^\circ$ .

#### 4. Порядок выполнения работы

4.1 Взять модель барабанно-кулачкового механизма и повернуть барабанный кулачок 1 так, чтобы толкатель 2 занял крайнее левое (или правое) положение.

4.2. Поворачивая последовательно кулачок на углы, кратные 10 градусам, замеряем величины перемещения  $S_2$  мм толкателя по шкале.

4.3 По результатам измерений строим график зависимости перемещений 2 толкателя от угла  $\varphi$  (град) кулачка в соответствующих масштабах  $\mu_S$  (м/мм) и  $\mu_\varphi$  (град/мм).

4.4. Отмечаем на диаграмме зависимости  $S_z(\varphi)$  фазовые углы: удаления, дальнего стояния, приближения и ближнего стояния.

4.5. Определяем, при каких углах поворота кулачка скорость толкателя имеет максимальное и минимальное значение.

4.6. Определяем степень подвижности механизма по формуле:

$$W = 3n - 2P_5 - P_4.$$

4.7. Сделать вывод по работе.

## 5. Контрольные вопросы

1. Какие типы кулачковых механизмов вы знаете?
2. Перечислите задачи кинематического анализа.
3. Что такое кинематические диаграммы?
4. Чем отличаются диаграммы скоростей и ускорений от их соответствующих аналогов?
5. Как определить действительные величины скорости и ускорения по кинематическим диаграммам?
6. Как называются фазы работы механизма? Как называются звенья механизма?
7. Что называется углом давления?
8. Каково назначение ролика в кулачковых механизмах?
9. От чего зависят минимальные размеры кулачка?
10. Какой тип замыкания имеет место в исследуемом кулачковом механизме?

## Библиографический список:

1. Теория механизмов и машин : [учебник для студентов по направлениям подготовки "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств", "Автоматизация технологических процессов и производств (машиностроение)"] / П. Н. Учаев [и др.] ; под общ. ред. П. Н. Учаева. - Старый Оскол: ТНТ, 2016. - 296 с. - Текст : непосредственный.

2. Яцун, С. Ф. Основы функционирования технических систем: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 15.03.01 Машиностроение, 23.03.01 Технологии транспортных комплексов, 23.03.03 Эксплуатация транспортно-

технологических машин и комплексов, 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / С. Ф. Яцун, А. Н. Рукавицын, Е. Н. Политов; Юго-Западный государственный университет. - Курск : Университетская книга, 2019. - 195 с. - Текст: непосредственный.

3. Теория механизмов и машин: учебное пособие / М. А. Мерко, А. В. Колотов, М. В. Меснянкин, А. А. Шаронов; Сибирский федеральный университет. – Красноярск : Сибирский федеральный университет (СФУ), 2015. – 248 с. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=497728> (дата обращения: 06.06.2022). – Режим доступа: по подписке. – Текст: электронный.

4. Яцун, С. Ф. Кинематика, динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям 08.06.01 "Техника и технология строительства", 08.04.01 "Строительство" и 06.06.01 "Метрология, стандартизация и сертификация" / С. Ф. Яцун, В. Я. Мищенко, Е. Н. Политов. - Москва: ИНФРА-М : Альфа-М, 2015. - 207 с. - Текст: непосредственный.

5. Локтионова, О. Г. Лекции по теоретической механике: учебное пособие: [для студентов инженерно-технических специальностей всех форм обучения] / О. Г. Локтионова, С. Ф. Яцун, О. В. Емельянова; ЮЗГУ. - Курск: ЮЗГУ, 2014. – 185 с. - Текст: электронный.

6. Социально-экономические аспекты технологической модернизации современного машиностроительного производства : монография / ред. совет: С. Г. Емельянов (пред.) [и др.] ; гл. ред. А. В. Киричек. - М. : Спектр, 2013. - 288 с. - Текст : непосредственный.

7. Андреев, В. И. Техническая механика: учебник / В. И. Андреев, А. Г. Паушкин, А. Н. Леонтьев. - М. : АСВ, 2012. - 251 с. - Текст : непосредственный.