



## ҲАР ХИЛ СХЕМАДАГИ КРИВОШИП-ШАТУНЛИ МЕХАНИЗМЛАРНИНГ КИНЕМАТИКАСИНИ АНИҚЛАШ ВА УЛАРНИ БАҲОЛАШ

Исмаилов Одилбек Раимбаевич

*Тошкент Кимё халқаро университети*

e-mail: odilbek.ismailov.71@gmail.com

**Аннотация.** Ушбу мақолада анъанавий ва планетар кривошип-шатунли механизмларнинг кинематик схемалари келтирилган. Планетар кривошип-шатунли механизмлар параметрлари ўзгаришининг шатун кривошип каллаги траекториясига таъсири таҳлил қилинган. Бунда ҳар хил параметрлар учун траекториялар қурилган ва кривошип айланиш бурчагига мос нуқталарнинг геометрик ўринлари аниқланган. Шу билан бирга, планетар кривошип-шатунли механизмларнинг ички ва ташқи илашмаси учун конструктив схемаларининг ўзига хос томонлари назарий таҳлил қилинган. Анъанавий кривошип-шатунли механизм учун тирсакли вал айланиш бурчагига мос равишда поршень кўчиши, тезлиги ва тезланиши ҳисоб-китоб қилинган ва графиклари қурилган.

**Калит сўзлар:** ички ёнув двигателлари, кривошип-шатунли механизм, планетар механизм, ички илашма, ташқи илашма, узатишлар сони, планетар кривошип-шатунли механизм, гипоциклоида, эпициклоида.

**Аннотация.** Представлены кинематические схемы традиционных и планетарных кривошипно-шатунных механизмов. Приведены аналитические результаты влияния изменения параметров планетарных кривошипно-шатунных механизмов на траекторию нижней головки шатуна, построены траектории для разных параметров и найдены геометрические места точек по соответствующим углам поворота коленчатого вала. Анализированы своеобразности планетарных кривошипно-шатунных механизмов с внутренним и внешним зацеплением. Приведены расчетные данные и построены графики хода, скорости и ускорения поршня по углам поворота коленчатого вала для традиционных и планетарных кривошипно-шатунных механизмов.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, кривошипно-шатунный механизм, планетарный механизм, внутреннее зацепление, внешнее зацепление, передаточное отношение, планетарный кривошипно-шатунный механизм, гипоциклоида, эпициклоида.

**Abstract.** This article presents the kinematic diagrams of conventional and planetary crankshaft mechanisms. The effect of changing the parameters of the planetary crankshaft

mechanisms on the trajectory of the crankshaft head was analyzed. Trajectories were constructed for various parameters and the geometric positions of the points corresponding to the rotation angle of rotation of the curve were determined. At the same time, specific aspects of the design schemes for internal and external coupling of planetary crankshaft mechanisms were theoretically analyzed. Piston displacement, speed, and acceleration were calculated, and drawn graphs according to the crankshaft rotation angle for the conventional crankshaft mechanism.

**Keywords:** internal combustion engine, crank mechanism, planetary gear mechanism, internal spur gears, external spur gears, gear ratio (velocity ratio), planetary crank mechanism, hypocycloid, epicycloid.

### **Асосий қисм:**

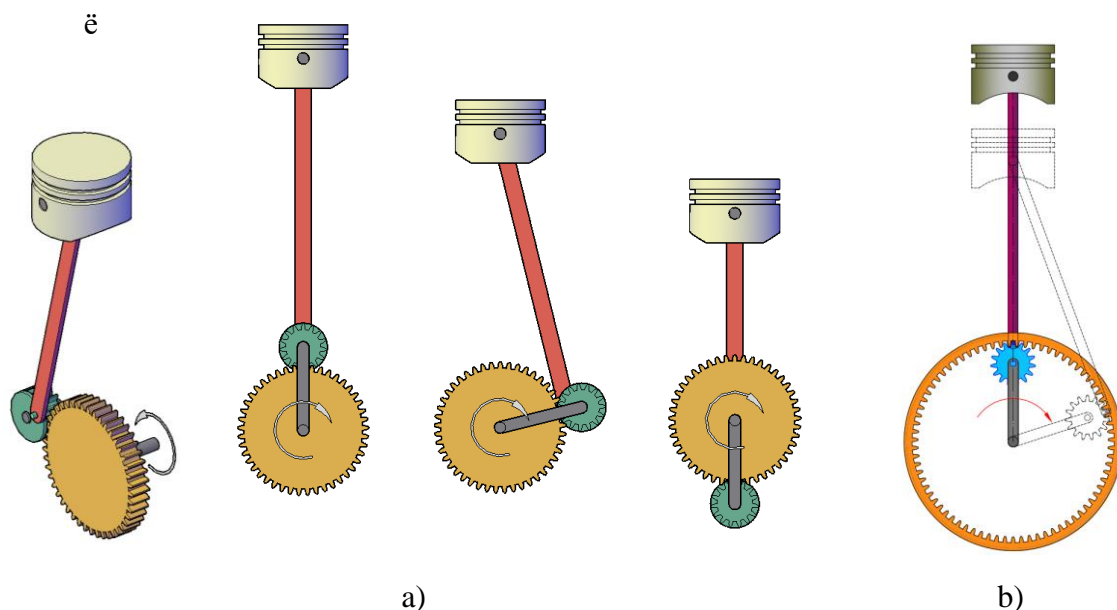
Ички ёнув двигателларида поршеннинг (ползуннинг) тўғри чизикли ҳаракатини айланма ҳаракатга айлантириш учун ҳар хил механизмлар ишлатилади. Бундай механизмлар ичида энг соддаси кривошип-шатунли механизм бўлиб, улар поршенли ички ёнув двигателларида оммавий қўлланилади. Бу механизмларда кривошипнинг айланиш доимий бурчак тезлигида поршень ҳар хил тезликда қайтма-илгариланма ҳаракат қилади. Поршеннинг тезлиги унинг энг юқориги ва энг пастки ҳолатларида нолга тенг бўлиб, бошқа ҳар хил вазиятлардаги тезлиги кривошипнинг айланиш бурчагига боғлиқ бўлади.

Кривошип-шатунли механизмни бирор геометрик параметрларга асосан кинематик таҳлили натижасида унинг асосий звенолари (асосан поршень ва шатун) ҳаракати қонуниятлари аниқланади. Ушбу параметрлар асосида аниқланган қонуниятлар эса кривошип-шатунли механизмни қандай ҳолатларда ишлатиш мумкинлигини белгилайди.

Поршень ҳаракати тезлиги юқориги ва пастки нуқталар оралиғида (бир цикл давомида) бир неча марта ўзгариши керак бўлган ҳолатларда кривошип-шатунли механизм ҳаракат қонуниятлари бу шартга мос келмайди. Бундай ҳолатларда ушбу механизмга қўшимча звенолар қўшиш ёки бошқа механизмалардан фойдаланиш орқали керакли ҳаракат қонуниятига эришиш мумкин.

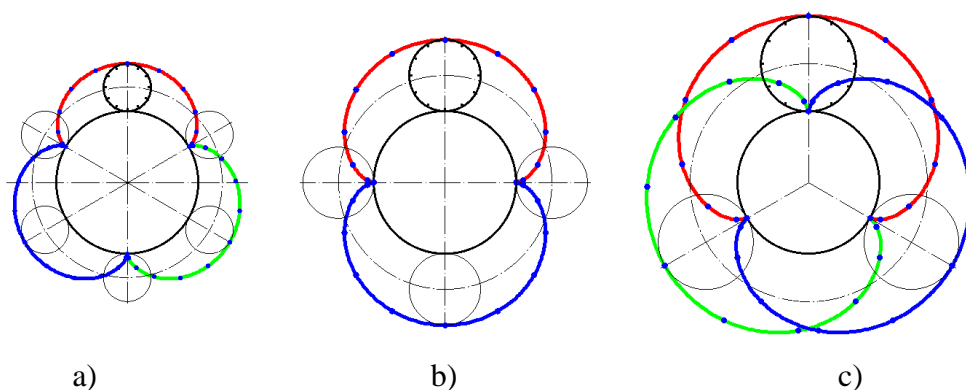
Бошқа механизмлар сифатида шатунли планетар механизмларнинг кинематик таҳлилини кўриб чиқамиз. Бу механизм марказий ғилдирак (солнечная шестерня) ва унинг атрофида айланувчи сателлитдан иборат бўлиб, поршень қайтма-илгариланма ҳаракати шатун орқали сателлитга узатилади (1-а расм). Шатун пастки ўқи сателит бўлувчи айланасига бириктирилганлиги учун шатуннинг кривошип каллаги сателлит ўқи атрофида айланма ҳаракат қилади (траекторияси айланадан иборат), кривошип айланиш ўқиға нисбатан ҳаракат траекторияси эса эпициклоида ёки гипоциклоидадан иборат бўлади ва бу траекториялар поршеннинг ҳаракати қонуниятини белгилайди (1-б расм). Бунда механизм водилоси кривошип вазифасини бажаради ва поршень қайтма-илгариланма ҳаракати водилонинг айланма ҳаракатига айланади.

Бу механизмда марказий ғилдирак (солнечная шестерня) тўхтатилган (эпициклоидал траектория) ёки ички тишли марказий ғилдирак тўхтатилган бўлиши мумкин (гипоциклоидал траектория).



1-расм. Шатун кривошип каллаги эпициклоида (а) ва гипоциклоида траекторияси (б) бўйича ҳаракатланувчи планетар кривошип-шатунли механизмлар кинематик схемаси. Эпициклоидал ҳаракатда марказий, гипоциклоидал ҳаракатда ички тишли марказий ғилдирак тўхтатилган.

Маълумки, ушбу планетар механизмда узатишлар сони, яъни марказий ғилдирак (ёки ички тишли марказий ғилдирак) ва сателлитлар тишлари сони нисбати унинг асосий параметридир. Эпициклоидал ва гипоциклоидал траектория ҳосил қилувчи конструкцияларнинг механизмларидаги тишлар сони нисбатига қараб поршень тезлиги қонуниятлари ҳам ўзгаради (2-расм).

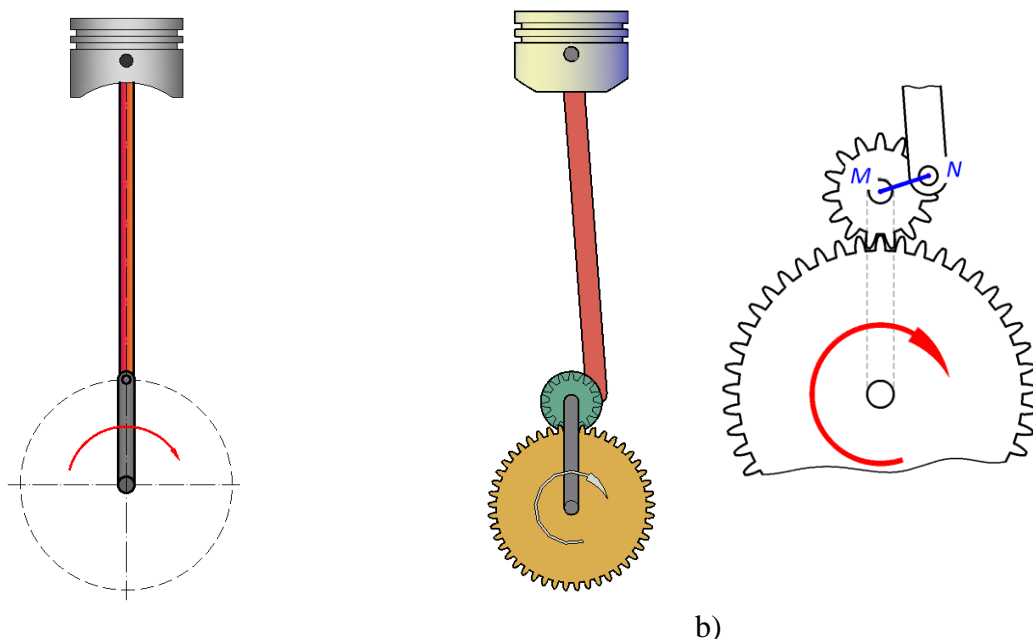


2-расм. Айлана диаметрлари нисбати ёки тишлар сони нисбати бўйича эпициклоидали траекториянинг ҳосил бўлиши;  
а)  $d_1=20$ ,  $d_2=60$ ; б)  $d_1=30$ ,  $d_2=60$ ; в)  $d_1=40$ ,  $d_2=60$ .

Анъанавий кривошип-шатунли механизмда поршеннинг юқориги ёки пастки чекки нуқталарида кривошипка таъсир қилувчи момент елкаси мавжуд эмас. Тирсакли вал айланиши ҳисобига елка узунлиги аста секин ошиб боради ва унинг қиймати  $70^0-80^0$  бурилиш бурчагида максимал қийматга етади. Бу механизмларда момент елкаси узунлигининг цилиндрдаги босимнинг ошиш интенсивлигига мос келмаслиги ва поршеннинг юқориги ва пастки нуқталарига яқин фазаларида бу елканинг жудаям кичиклашиши ёниш энергиясидан эффектив фойдаланиш имконини бермайди (3-расм, а)).

Планетар кривошип-шатунли механизмларда поршеннинг юқориги ёки пастки чекка нуқталарида момент елкасини ҳосил қилиш мумкин. Шу билан бирга механизмни ташқи ёки

ички илашмада ишлатиш (эпициклоида ёки гипоциклоида), узатишлар сонини ўзгартириш (тишлари сонини ўзгартириш) ҳисобига поршеннинг ҳаракати қонуниятларини цилиндрдаги босим ошиш интенсивлигига мослаштириш билан бу механизмларни ишлатиш имкониятларини оширади (3-расм, b)).



а) 3-расм. Поршеннинг юқориги чекка нуқтасида ( $\varphi = 0^0$ ) анъанавий (расм, а)) ва планетар (расм b)) кривошип-шатунли механизмлардаги момент елкалари; MN – планетар механизмда момент елкаси узунлиги.

Солиштириш учун анъанавий кривошип-шатунли механизм кинематик таҳлилин кўриб чиқамиз. Поршень ўқи силжитилмаган (аксиал ўқли), марказий кривошип-шатунли механизм куйидаги геометрик параметрларга эга:

$r$  – тирсақли вал кривошипи радиуси;

$l_{ш}$  – шатун узунлиги;

$\lambda$  – кинематик ўхшашлик критерийси бўлиб, бу куйидагича аниқланади:

$$\lambda = r/l_{ш} \quad (1)$$

(ички ёнув двигателларида асосан  $\lambda = 0.24 \dots 0.31$  оралиғида олинади).

Кривошип-шатунли механизмда ползун (поршень) қайтма-илгариланма, кривошип (тирсақли вал) айланма, шатун эса мураккаб – тепа поршень каллаги цилиндр ўқи бўйлаб қайтма-илгариланма, пастки кривошип каллаги эса кривошип ўқи ва шатун бўйни ўқи нисбатан айланма ҳаракат қилади.

4-расмдан кўринадики, кривошипнинг ўқи ва поршень бармоғи ўқи орасидаги масофа:

- кривошип  $\varphi$  бурчакга бурилганда:  $OA = l_{ш} \cos \beta + r \cos \varphi$ ; (2)

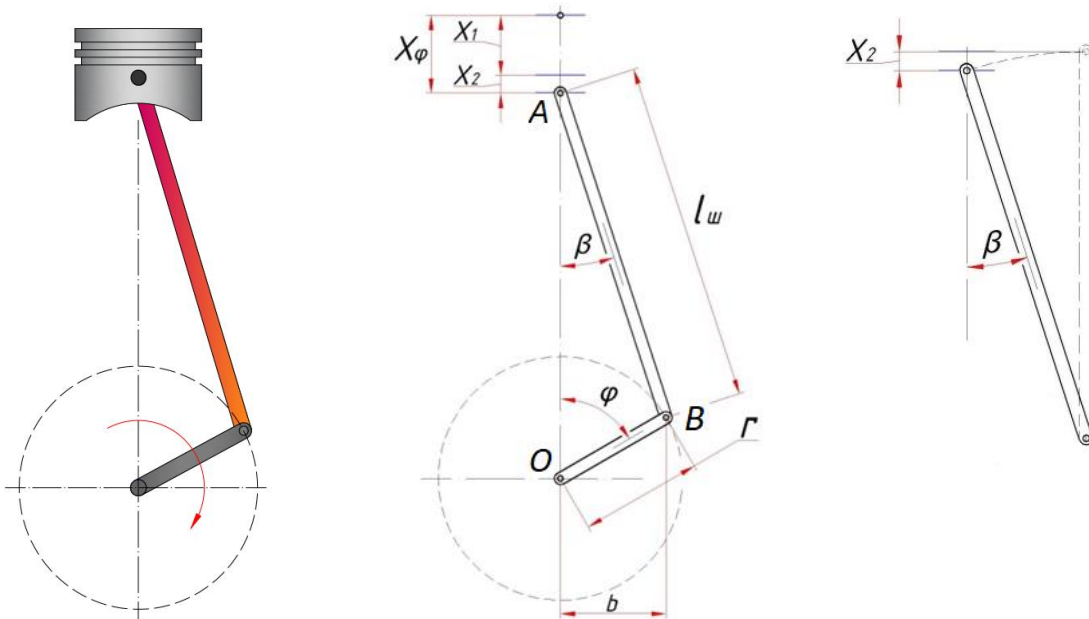
- поршень юқориги чекка нуқтада бўлганида:  $OA = l_{ш} + r$ ; (3)

Шунга асосан, кривошип  $\varphi$  бурчакга бурилганда поршеннинг умумий кўчиши (босиб ўтадиган йўли):

$$X_{\varphi} = l_{ш} + r - OA; \quad (4)$$

ёки, буни куйидагича ифодалаш мумкин:

$$X_{\varphi} = X_1 + X_2; \quad (5)$$



4-расм. Тирсакли валнинг  $\varphi$  бурчакга бурилиши ҳисобига ва шатуннинг  $\beta$  бурчакга бурилиши ҳисобига поршеннинг кўчиши.

Бу ерда,

$$X1 = r (1 - \cos \varphi); \quad (6)$$

$$X2 = l_{ш}(1 - \cos \beta). \quad (7)$$

$X1$  – кривошипнинг  $\varphi$  бурчакга бурилиши ҳисобига поршеннинг кўчиши,

$X2$  – шатуннинг  $\beta$  бурчакга бурилиши ҳисобига поршеннинг кўчиши.

У ҳолда:

$$X\varphi = r (1 - \cos \varphi) + l_{ш}(1 - \cos \beta); \quad (8)$$

ёки, 
$$X\varphi = r \left[ (1 - \cos \varphi) + \frac{1}{\lambda} (1 - \cos \beta) \right]; \quad (9)$$

Кривошип-шатунли механизм кинематикаси ҳисобини кривошипнинг (тирсакли валнинг) бурилиш бурчаги  $\varphi$  га нисбатан таҳлил қилишимиз керак. Шунинг учун юқоридаги формулада кривошипнинг бурилиш бурчагини асосий ўзгарувчи параметр сифатида қолдирамиз. 4-расмдан кўриш мумкинки:

- шатуннинг бурилиш бурчагига нисбатан:  $b = l_{ш} \sin \beta,$
- тирсакли валнинг бурилиш бурчагига нисбатан:  $b = r \sin \varphi.$

У ҳолда,

$$l_{ш} \sin \beta = r \sin \varphi \Rightarrow \sin \beta = \frac{r}{l_{ш}} \sin \varphi \quad (10)$$

ёки (1) га асосан,

$$\sin \beta = \lambda \sin \varphi; \quad (11)$$

Шунинг учун:

$$\sin^2 \beta + \cos^2 \beta = 1 \Rightarrow \cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi}; \quad (12)$$

Поршеннинг умумий кўчиш тенгламаси (9) га юқоридаги 12-тенгламани тадбик қилиш орқали қуйидаги тенгламани келтириб чиқарамиз:

$$X\varphi = r [(1 - \cos \varphi) + \frac{1}{\lambda}(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi})]; \quad (13)$$

Ушбу тенгламадаги  $\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi}$  ифодани соддалаштириш мақсадида Маклорен қаторига қуйидагича ёйамиз:

$$\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi} = 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 \sin^2 \varphi - \frac{1}{8}\lambda^4 \sin^4 \varphi - \frac{1}{16}\lambda^6 \sin^6 \varphi - \frac{5}{128}\lambda^8 \sin^8 \varphi - \dots \quad (14)$$

Автотрактор двигателлари кривошип-шатунли механизмлари учун  $\lambda = 0.24 \dots 0.31$  оралиғида бўлиши мумкинлигини ҳисобга оладиган бўлсак:

$$\frac{1}{2}\lambda^2 = 0,0288 \dots 0,048;$$

$$\frac{1}{8}\lambda^4 = 0,000415 \dots 0,0011544;$$

$$\frac{1}{16}\lambda^6 = 0,000012 \dots 0,0000555;$$

$$\frac{5}{128}\lambda^8 = 0,00000043 \dots 0,0000033; \dots$$

Ушбу қийматлар жудаям кичик ва  $\sin \varphi \leq 1$  бўлганлиги учун, 3-ҳаддан кейинги ҳадларнинг қиймати жудаям кичрайиб (нолга яқинлашиб) боради. Шунинг учун ҳисоб-китобларда фақат биринчи ва иккинчи ҳадни ишлатиш етарли бўлади. У ҳолда (14) ифода қуйидаги кўринишга келади:

$$\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi} \approx 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 \sin^2 \varphi; \quad (15)$$

У ҳолда, юқоридаги (13) тенглама кўриниши ҳам қуйидагича бўлади:

$$X\varphi = r [(1 - \cos \varphi) + \frac{1}{2}\lambda \sin^2 \varphi]; \quad (16)$$

Тенгламадаги ўзгарувчилар кўринишини бир хиллаштириш ва даражани йўқотиш учун тригонометрик формуладан фойдаланамиз ва юқоридаги тенгламани қайта ёзамиз.

$$\sin^2 \varphi = \frac{1 - \cos 2\varphi}{2} \text{ га асосан (16) тенгламанинг натижавий кўриниши:}$$

$$X\varphi = r [(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4}(1 - \cos 2\varphi)]; \quad (17)$$

### **Поршень тезлиги.**

Поршень кўчишининг вақт бўйича биринчи тартибли ҳосиласи орқали унинг тезлигини аниқлаймиз. Бу ерда асосий ва ягона ўзгарувчи тирсақли валнинг бурилиш бурчаги бўлганлиги учун:

$$V\varphi = \frac{dx_\varphi}{dt} = \frac{dx_\varphi}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt};$$

Шунинг учун, (17) тенгламадан биринчи тартибли ҳосила:

$$V\varphi = r\omega (\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi); \quad (18)$$

### **Поршень тезланиши.**

Поршень тезлигининг вақт бўйича биринчи тартибли ҳосиласи (ёки поршень кўчишининг вақт бўйича иккинчи тартибли ҳосиласи) унинг тезланишини аниқлаймиз. Бу ерда ҳам асосий ўзгарувчи сифатида тирсақли валнинг бурилиш бурчаги қаралади.

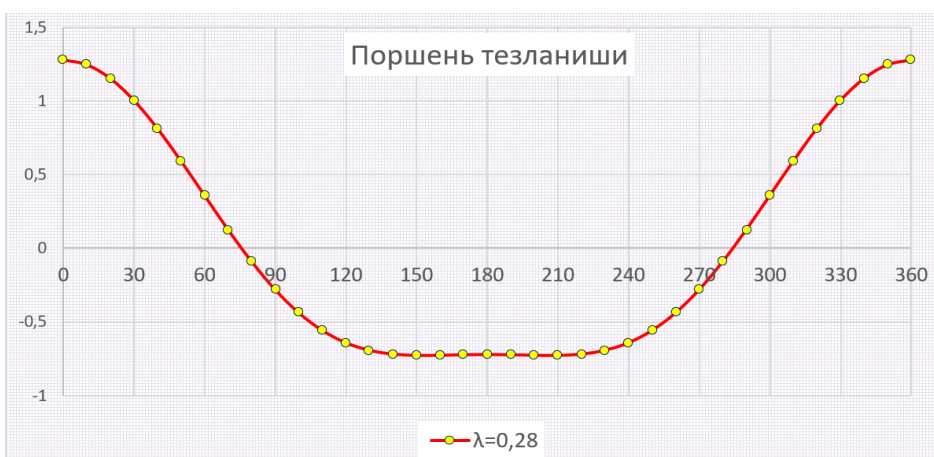
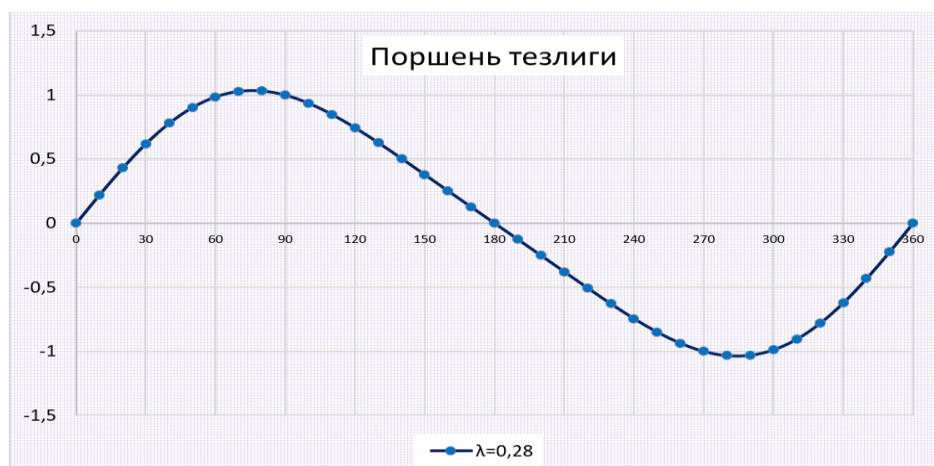
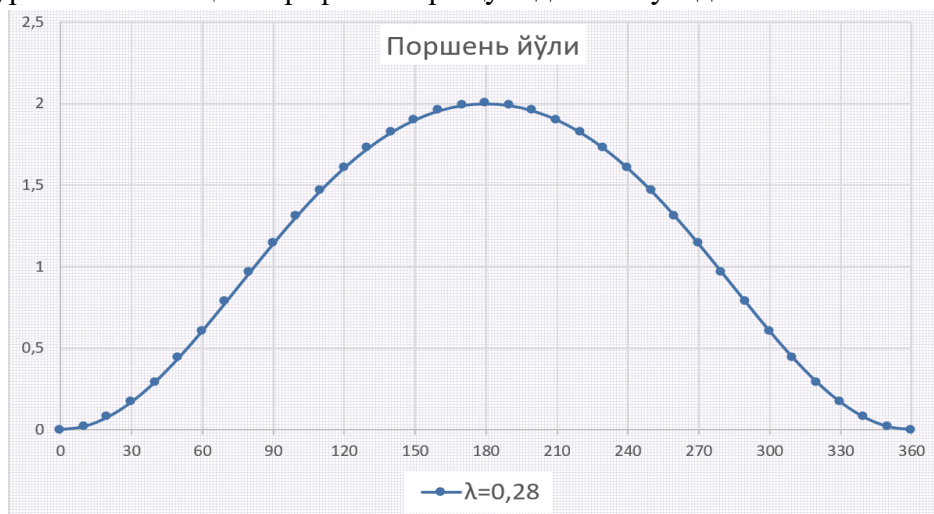
$$J\varphi = \frac{dV_\varphi}{dt} = \frac{dV_\varphi}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt};$$

Шунинг учун:

$$J\varphi = r\omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi); \quad (19)$$

Ҳисоб-китобларда шартли равишда кинематик ўхшашлик критерийсининг ўртача қийматини оламиз, яъни:  $\lambda = 0.28$ .

Юқоридаги тенгламаларга асосан поршень йўли, тезлиги ва тезланишининг кривошип бурилиш бурчагига боғлиқлик графикалари қуйидагича бўлади:



### Хулосалар:

Анъанавий кривошип-шатунли механизм поршень кинематикаси таҳлилидан кўринадикки, бу кўрсаткичлар фақат кривошип бурилиш бурчагига боғлиқ равишда текис ўзгаради ва ҳар бир циклда бир хилда такрорланади.

Планетар кривошип-шатунли механизмда поршеннинг қайтма-илгариланма ҳаракатини тирсакли вал айланма ҳаракатига айлантиришда газ босимидан эффектив фойдаланишнинг қуйидаги техник ечимларига эришишга олиб келади:

- планетар механизм тишлари сони нисбатини ўзгартириш ҳисобига шатуннинг пастки кривошип каллагининг ҳаракати траекториясини ўзгартириш имконияти;
- ёниш жараёнидаги цилиндрдаги босим ошиш жадаллигига мос поршень тезлиги ва ҳаракати қонуниятларини танлаш имконияти пайдо бўлади;
- поршеннинг пастки ва юқори чекка нуқталарида ва циклнинг унга яқин фазаларида тирсакли валга шатун орқали узатиладиган (ёки аксинча) куч момент елкасини мос равишда танлаш имконияти пайдо бўлади;
- Ёниш жараёнининг оралиқ фазаларида поршень тезлигини ўзгартириши орқали цилиндрдаги газ босимининг поршенга таъсиридан эффектив фойдаланилади.

Планетар кривошип-шатунли механизмни қўллашдан асосий мақсад поршень тезлигини газ босими ошиш тезлиги билан мутаносиб ўзгаришига эришиш орқали механизмдан эффектив фойдаланишга, ички ёнув двигателларининг фойдали иш коэффициентини ва солиштирма қувватини оширишга эришишдир.

#### АДАБИЁТЛАР:

1. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. А.Н. Колчин, А.П. Демидов. - М.: Высшая школа, 2008. – 496 с.
2. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов. Б. А. Шароғлазов М. Ф. Фарафонов В. В. Клементьев. Учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания». – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – 403 с
3. Кинематические и динамические параметры кривошипно-шатунного механизма двигателя внутреннего сгорания. Чукалов М. Ю., Семизельников Р.С., Паничкин А.В. Современные материалы, техника и технологии, №2 (23), 2019.
4. Определение и оценка крутящего момента в двигателях внутреннего сгорания с различными схемами кривошипно-шатунного механизма. Грабовский А. А. Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 139–146.
5. Расчётные исследования кинематики и динамики рядного бензинового двигателя в системе Mathcad. В. В. Рынди́н, В. В. Шалай, Ю. П. Макушев. Вестник СибАДИ, выпуск 1 (35), 2014.