

того, метод ограничен по весу и габаритам поднимаемых конструкций, что требует тщательного планирования и подготовки работ.

Однако, правильный расчет геометрических параметров провеса проводов играет ключевую роль в обеспечении надежности и долговечности воздушных линий, учитывая влияние внешних факторов и нагрузок, а комплексный подход к монтажу опор и расчету провеса, основанный на современных инженерных методах, способствует повышению качества и эффективности строительства электросетей.

Дальнейшее совершенствование технологии метода падающей стрелы и расчетных моделей в перспективе позволит расширить сферу его применения и укрепить надежность энергоснабжения, что является важным вкладом в развитие энергетики.

Литература

1. Гордон С.В. Механизмы и приспособления для воздушных линий 35 кВ и выше / С.В. Гордон. – Москва: Энергоиздат, 1985. – 240 с.
2. Смирнов В.И. Воздушные линии электропередачи: проектирование и монтаж / В.И. Смирнов. – Санкт-Петербург: Питер, 2018. – 350 с.
3. Типовая технологическая карта. Монтаж опор воздушной линии электропередач способом «падающей стрелы» // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/435760370> (дата обращения: 20.05.2025).

УДК 629

Динамический анализ кривошипно-шатунного механизма двигателя ЯМЗ-238 с помощью пакета Mathcad

Курсант гр. 11501223 Свирков Ю.Р., студент гр. 11001122 Гончарова Е.А.

Научные руководители – ст. преподаватель Хвасько В.М.,
ст. преподаватель Гончарова С.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Большинство современных автомобильных двигателей являются быстроходными, что приводит к значительным скоростям и ускорениям деталей кривошипно-шатунного механизма (КШМ). Для их надежного расчета необходимо учитывать силы давления газов, силы инерции, силы

трения и силы сопротивления. Особенно важны силы инерции, так как они существенно влияют на прочность и надежность конструкции.

Цель работы — выполнить динамический анализ КШМ двигателя ЯМЗ-238 с использованием Mathcad для определения действующих сил и моментов.

Для двигателя ЯМЗ-238 принимают: масса шатуна $m_{ш} = 4,31$ кг, длина шатуна $l_{ш} = 435$ мм.

Силы инерции КШМ и силы давления газов.

Силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс вычисляют по формуле:

$$F_j = -m_j \cdot \omega^2 \cdot r \cdot (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi). \quad (1)$$

где $F_{j1} = -m_j \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_1$ — сила инерции первого порядка, период изменения этой силы — один оборот коленчатого вала;

$F_{j2} = -m_j \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \varphi_2$ — сила инерции второго порядка, период изменения этой силы — пол-оборота коленчатого вала.

Сила инерции вращающихся масс действует по радиусу кривошипа и определяется по формуле:

$$F_r = -m_r \cdot \omega^2 \cdot r. \quad (2)$$

Сила давления газов на поршень, действующая по оси цилиндра, равна:

$$F_G = (F_X - F_0) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2. \quad (3)$$

где F_X — давление газов в цилиндре двигателя, определяемое для соответствующего положения поршня (x) по индикаторной диаграмме;

F_0 — давление в картере, принимаемое обычно равным давлению окружающей среды;

D — площадь поршня.

Для динамического расчета двигателя, а также для расчета на прочность его деталей необходимо получить зависимость $F = f(\varphi)$ (рис. 1). Сила F_G считается положительной, если она направлена к оси коленчатого вала

```

m1 := 0.862      m2 := 3.45      m3 := 12.2      ω := 220
φ2 := 180  φ1 := 360  r := 0.1  m5 := 0.111  F0 := 1·105  F1 := 1.7·105
D := 0.013
m4 := m3 + m1      m4 = 13.062

F41 := -m4·ω2·r·cos(φ1)

F42 := -m4·ω2·r·cos(φ2)

m6 := m5 + m2

F6 := -m6·ω2·r

F7 := (F1 - F0)·D2· $\frac{\pi}{4}$ 

F4 := -m4·ω2·r·(cos(φ) + cos(2φ))

f(φ) := -m4·ω2·r·(cos(φ) + cos(2φ))

F := F7 + F4

φ := 0,90..720

```

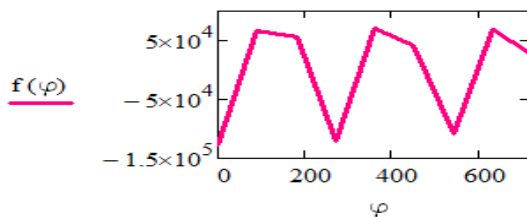


Рис. 1. График изменения силы F по углу поворота коленчатого вала φ (приняты обозначения: $F_X = F_1$, $F_j = F_4$, $F_{j1} = F_{41}$, $F_{j2} = F_{42}$, $m_j = m_4$, $F_r = F_6$, $m_r = m_6$, $F_r = F_7$)

Складывая алгебраически силы, действующие в направлении оси цилиндра, получим суммарную силу, действующую на КШМ, для каждой точки X положения поршня:

$$F = F_r + F_j. \quad (4)$$

Диаграмма изменения этой силы по углу поворота коленчатого вала (для оборотов, соответствующих максимально эффективной мощности) представлена на рисунке 1.

Силы, действующие на поршневой палец, шатунные и коренные шейки

Разложим суммарную силу F , приложенную к оси поршневого пальца, на две составляющие силы (рис. 2, а). Первая сила направлена по оси шатуна и равна:

$$F_{ш} = \frac{F}{\cos \beta}. \quad (5)$$

Вторая сила перпендикулярна оси цилиндра и равна:

$$N = F \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (6)$$

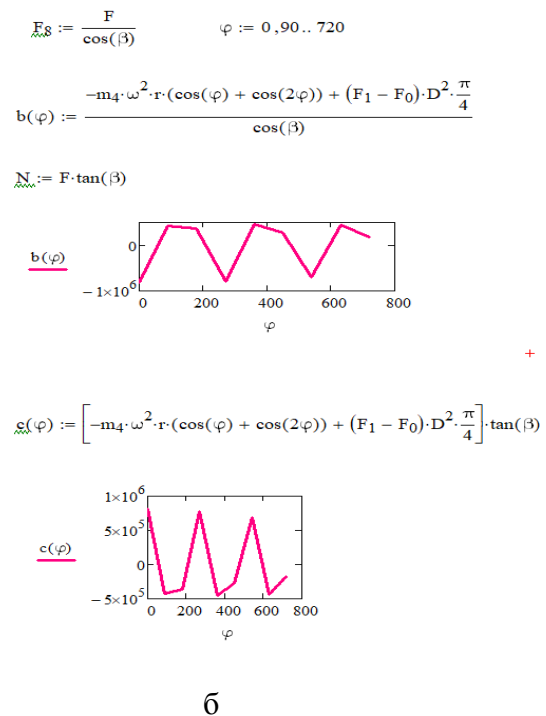
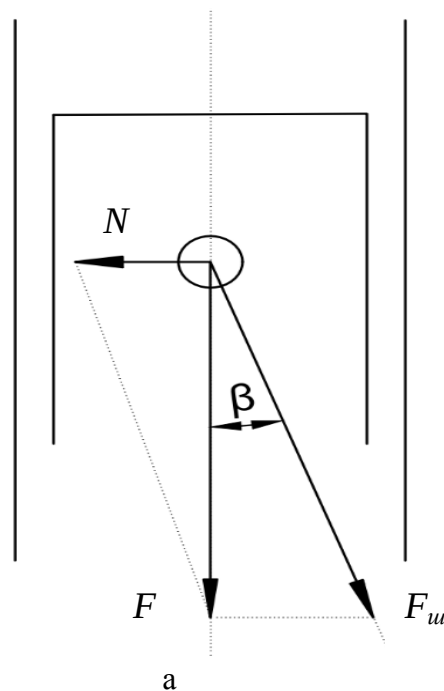


Рис. 2. Силы, действующие на поршневой палец:

а – схема сил; б – график изменения первой и второй сил (приняты обозначения: $F_{ш} = F_8 = b(\varphi)$, $N = c(\varphi)$)

Графики изменения сил $F_{ш}$, N и F по углу поворота коленчатого вала, построенные с помощью Mathcad, представлены на рисунке 2, б.

Перенесем силу $F_{ш}$, действующую по оси шатуна, в центр шатунной шейки и затем разложим ее на две составляющие: касательную силу T и перпендикулярную силу Z (рис 3, а).

Сила, действующая по оси кривошипа, равна:

$$Z = F_{uu} \cdot \cos(\varphi + \beta) = \frac{F}{\cos \beta} \cdot \cos(\varphi + \beta). \quad (7)$$

Касательная сила определяется формулой:

$$T = F_{uu} \cdot \sin(\varphi + \beta) = \frac{F}{\cos \beta} \cdot \sin(\varphi + \beta). \quad (8)$$

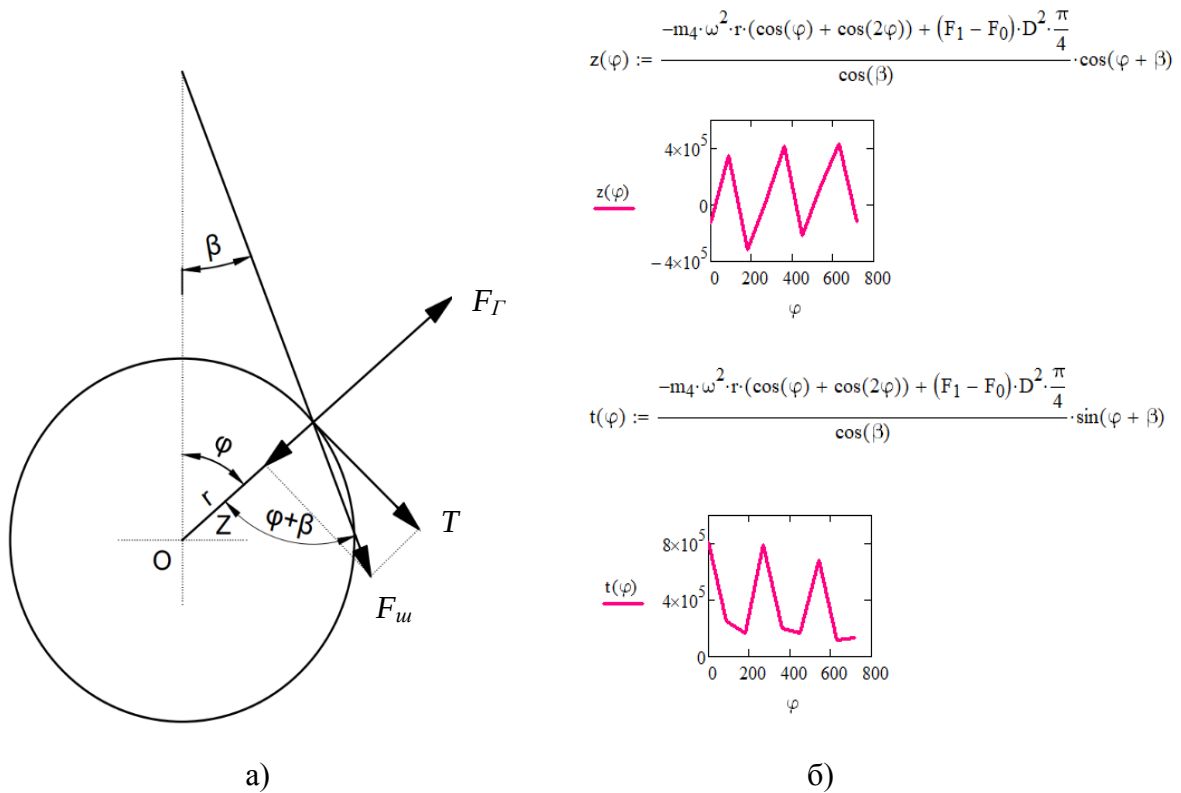


Рис. 3. Силы, действующие на шатунной шейке
а) схема сил; б) графики изменения сил (приняты обозначения: $Z = z(\varphi)$,
 $T = t(\varphi)$)

Произведение силы T на радиус r называют крутящим моментом двигателя:

$$M_{\kappa} = T \cdot r = r \frac{F}{\cos \beta} \sin(\varphi + \beta). \quad (9)$$

Графики сил T и Z по углу поворота коленчатого вала, построенные в Mathcad, представлены на рисунке 3, б.

Кроме указанных выше сил на шатунную шейку по радиусу кривошипа действует сила инерции вращающихся масс F_r .

Приложим к центру коленчатого вала (точка O) (рис. 4) две взаимно противоположные силы F'_w и F''_w , равные и параллельные силе F_w .

Силы F_w и F''_w составят пару сил, плечо которых h равно:

$$h = r \cdot \sin(\varphi + \beta). \quad (10)$$

Тогда момент пары этих сил определяется формулой:

$$M_{F_w F''_w} = F_w \cdot h = \frac{F}{\cos \beta} \cdot r \cdot \sin(\varphi + \beta) = M_k. \quad (11)$$

Он равен крутящему моменту двигателя M_k .

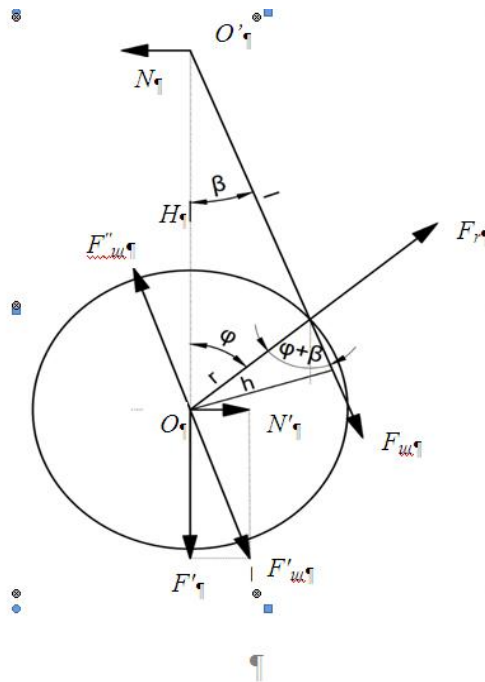


Рис. 4. Схема сил, действующих на коренной шейке

Разложим силу F'_w на две составляющие силы:

$$F' = F'_w \cdot \cos \beta = \frac{F}{\cos \beta} \cdot \cos \beta = P. \quad (12)$$

$$N' = F_{uu} \cdot \sin \beta = \frac{F}{\cos \beta} \cdot \sin \beta = -N. \quad (13)$$

Сила F действует на опорную раму двигателя, силы же N и N' составят пару сил с плечом H , равным:

$$H = l \cdot \cos \beta + r \cdot \cos \varphi. \quad (14)$$

Тогда момент определяется формулой:

$$M_{NN'} = -N \cdot H = -F \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot (l \cdot \cos \beta + r \cdot \cos \varphi) = -M_k. \quad (15)$$

Он стремится опрокинуть двигатель и называется реактивным моментом двигателя, который всегда равен крутящему моменту двигателя, но противоположен ему по направлению.

В ходе динамического анализа КШМ двигателя ЯМЗ-238 с применением пакета Mathcad были решены следующие задачи:

1. Определены силы инерции и силы давления газов;
2. Построены графики изменения сил по углу поворота коленчатого вала;
3. Рассчитаны крутящий и реактивный моменты.

Проведенный анализ подтвердил, что Mathcad является удобным инструментом для инженерного анализа КШМ и может быть полезен при изучении конструкции двигателя и выполнении расчетов на прочность.

Литература

1. Двигатели внутреннего сгорания. Часть II. Конструкция и расчет основных деталей, механизмов и систем двигателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://forest.petrstu.ru/courses/pump/Pump2/Pump2.htm>
2. Петрученко, А. Н. Динамический расчет двигателей внутреннего сгорания: пособие для студентов специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» / А. Н. Петрученко; БНТУ, Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания». – Минск: БНТУ, 2017. – 29 с.
3. Механика материалов: пособие / Ю. В. Василевич [и др.]; БНТУ, Кафедра «Теоретическая механика и механика материалов». – Минск: БНТУ, 2022. – 181 с