

УДК 621.541

ПУСКОВЫЕ КАЧЕСТВА И РАВНОМЕРНОСТЬ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА V-ОБРАЗНОГО ШЕСТИЦИЛИНДРОВОГО ПНЕВМОДВИГАТЕЛЯ С ЗОЛОТНИКОВЫМ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., А.И. Харченко, доцент, к.т.н.,
С.С. Жилин, доцент, к.т.н., ХНАДУ

Аннотация. Рассмотрены результаты расчетного исследования шестицилиндрового V-образного пневмодвигателя с золотниковым воздухораспределением в целях определения его пусковых качеств под нагрузкой и равномерности вращения коленчатого вала.

Ключевые слова: поршневые кривошипные пневмодвигатели с золотниковым воздухораспределением, пусковые качества под нагрузкой, равномерность вращения коленчатого вала.

ПУСКОВІ ЯКОСТІ І РІВНОМІРНІСТЬ ОБЕРТАННЯ КОЛІНЧАТОГО ВАЛА V-ПОДІБНОГО ШЕСТИЦИЛІНДРОВОГО ПНЕВМОДВИГУНА ІЗ ЗОЛОТНИКОВИМ ПОВІТРОРІЗПОДІЛОМ

Ф.І. Абрамчук, професор, д.т.н., А.І. Харченко, доцент, к.т.н.,
С.С. Жилін, доцент, к.т.н., ХНАДУ

Анотація. Розглянуто результати розрахункового дослідження шестициліндрового V-подібного пневмодвигуна із золотниковим повітророзподілом з метою визначення його пускових якостей під навантаженням і рівномірності обертання колінчастого вала.

Ключові слова: поршневі кривошипні пневмодвигуни із золотниковим повітророзподілом, пускові якості під навантаженням, рівномірність обертання колінчастого вала.

STABILITY AND EVENNESS OF CRANKSHAFT ROTATION OF SIX-CYLINDER PNEUMATIC V-ENGINE WITH VALVE AIR-DISTRIBUTION

F. Abramchuk, Professor, Doctor of Technical Science,
A. Kharchenko, Associate Professor, Candidate of Technical Science,
S. Zhylin, Associate Professor, Candidate of Technical Science, KhNAHU

Abstract. The results of calculation research of the six-cylinder pneumatic V-engine with valve air-distribution for the purpose of its startability determination under loading and evenness of its crankshaft rotation are considered.

Key words: piston crank-type pneumatic engine with air-distribution, startability under loading, evenness of camshaft rotation.

Введение

Исследуемый пневмодвигатель рассматривается как составная часть гибридной силовой установки городского маршрутного такси. Гибридная установка предполагается по схеме: двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – пневмодвигатель, работающий на сжатом

воздухе, хранящемся на борту в баллонах при высоком давлении (после редуцирования рабочее давление воздуха на входе в двигатель 1 МПа). Роль пневмодвигателя: трогание с места и первоначальный разгон до скоростей автомобиля 15–20 км/ч, движение в «пробках», парковка, т.е. на режимах малых нагрузок, которые для ДВС являются небла-

гоприятными с точки зрения удельного расхода топлива и наличия токсичных компонентов в отработавших газах.

Анализ публикаций

Как известно из опыта [1], режим трогания с места является одним из основных в эксплуатации пневмодвигателя в составе гибридной силовой установки автомобиля. Этот режим одновременно является и пусковым режимом под полной нагрузкой. Поршневые пневмодвигатели, как известно [1], способны запускаться под нагрузкой и развивать максимальный крутящий момент в исходном стоячем положении, когда частота вращения вала $n = 0$. Но чтобы такой пуск двигателя под нагрузкой был безотказным при любом исходном положении вала, нужны определенные условия – это прежде всего наличие фазы впуска на ходе расширения хотя бы в одном цилиндре, что обеспечивается конструктивными решениями системы воздухо-распределения. Соответствующим конструктивным разработкам должно предшествовать расчетное исследование по определению закономерностей изменения по углу поворота кривошипа индикаторного суммарного от всех цилиндров крутящего момента. Рассмотрению результатов такого исследования и посвящена данная статья.

Объект исследования

Объектом исследования является шестицилиндровый V-образный поршневой кривошипный пневмодвигатель золотниково-воздухораспределения. На рис. 1 представлена общая схема такого двигателя.

При угле развала блока цилиндров 60° и трехколенном вале с расположением кривошипов под углом 120° имеет место равномерное чередование рабочих процессов шести цилиндров с интервалом 60° ПКВ (поворота коленчатого вала). При показанном на рисунке расположении кривошипов и правом вращении получается порядок работы цилиндров 1–4–3–6–2–5.

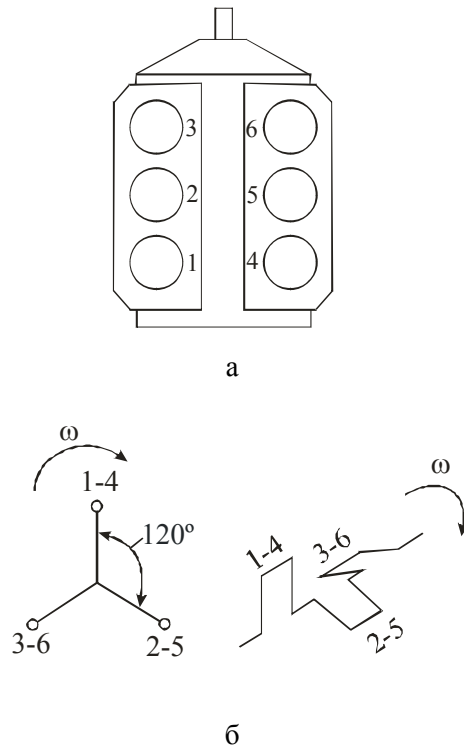


Рис. 1. Схема 6-цилиндрового V-образного пневмодвигателя: а – общая схема двигателя с указанием нумерации цилиндров; б – расположение кривошипов коленчатого вала

На рис. 2 показано чередование фаз впуска пневмодвигателя, выполненного по схеме рис. 1.

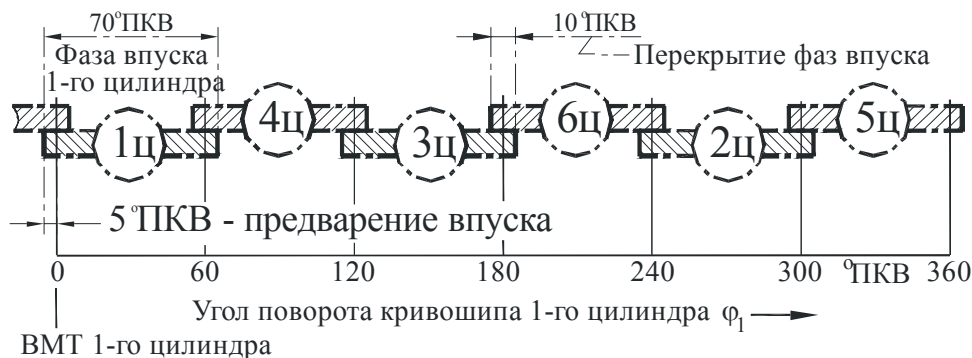


Рис. 2. Принятое в результате выполненного исследования расположение фаз впуска сжатого воздуха в пневмодвигателе

Из рис. 2 видно, что имеется предварение впуска, целесообразность которого подтверждена как расчетами, так и экспериментом, и имеется перекрытие фаз впуска чередующихся цилиндров 10° ПКВ. Анализ показал, что такую величину перекрытия фаз впуска следует считать минимально необходимой в целях надежного пуска двигателя под нагрузкой.

Тяговым расчетом маршрутного такси определена максимальная (номинальная) мощность пневмодвигателя $N_e = 20$ кВт. Для условий допустимой средней скорости поршня 2 м/с, давлении сжатого воздуха на входе 1,0 МПа, относительном мертвом объеме 0,6, степени обратного сжатия 0,7, степени наполнения 0,347 (при фазах впуска, показанных на рис. 2) и противодавлении на выпуске 0,12 МПа получены: частота вращения вала на номинальном режиме $n_n = 923$ мин⁻¹; диаметр цилиндра 100 мм; ход поршня 65 мм.

Постановка задачи

Постановка задачи вытекает из того обстоятельства, что для обеспечения надежного пуска пневмодвигателя под полной нагрузкой при любом исходном положении коленчатого вала и для удовлетворительной равномерности его вращения необходимо, чтобы кривые изменения суммарного крутящего момента от всех цилиндров по углу поворота кривошипа соответственно для режима пуска и для номинального режима не имели разрывов, участков с отрицательным значением момента, «провалов» с падением величины положительного момента до неприемлемо малого уровня.

Следовательно, задача состоит в том, чтобы расчетным путем с учетом задаваемых условий осуществления рабочего цикла пневмодвигателя и его конструктивных параметров определить характер изменения суммарного индикаторного крутящего момента от всех цилиндров M_{Σ} , Н·м, в зависимости от угла поворота кривошипа φ , ° ПКВ, для названных выше двух режимов работы двигателя. Рассмотрим подробнее особенности этих режимов.

Пусковой режим под полной нагрузкой – это режим работы при заданном расчетном максимальном давлении $p_{\text{вх}} = 1,0$ МПа и расчет-

ной температуре $T_{\text{вх}} = 293$ К сжатого воздуха на входе в двигатель (перед воздухохораспределителем) при частоте вращения n , мин⁻¹, стремящейся к нулю ($n \rightarrow 0$). В этих условиях силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс деталей кривошипно-шатунного механизма (КШМ) P_j настолько малы, что ими в расчетах можно пренебречь $P_j = 0$. Следовательно, развиваемый на валу двигателя крутящий момент в этом случае будет определяться только силой давления газов в цилиндре P_r , кН.

Особенностью рабочего процесса при $n \rightarrow 0$ являются пренебрежимо малые дроссельные потери во время впуска и выпуска рабочего тела, и, таким образом, протекание действительного рабочего цикла приближается к теоретическому циклу, коэффициент полноты индикаторной диаграммы $\eta_{\text{п}}$ стремится к единице $\eta_{\text{п}} \rightarrow 1$. К.С. Борисенко в своей монографии [1] прямо указывает, что теоретическая индикаторная диаграмма – это диаграмма, по которой работает поршневой пневмодвигатель с частотой вращения, приближающейся к нулю. В данном исследовании принято, что на режиме пуска под нагрузкой пневмодвигатель работает по теоретическому циклу при $p_{\text{вх}} = 1,0$ МПа и $T_{\text{вх}} = 293$ К.

Расчетный режим – это режим номинальной эффективной мощности двигателя $N_e = 20$ кВт при частоте вращения $n = 923$ мин⁻¹. На этом режиме двигатель работает по действительной расчетной индикаторной диаграмме с коэффициентом полноты $\eta_{\text{п}} = 0,80$ [1].

Основные результаты исследования

Тепловым расчетом пневмодвигателя для указанных выше условий осуществления рабочего процесса получены теоретическая и действительная индикаторные диаграммы (рис. 3).

Используя эти диаграммы для определения сил давления газов в цилиндре P_r , кН, был выполнен динамический расчет двигателя при его работе на режиме пуска (без учета действия сил инерции) и на номинальном режиме (с учетом действия сил инерции воз-

вратно-поступательно движущихся масс КШМ).

ной к оси кривошипа и создающей крутящий момент на валу двигателя.

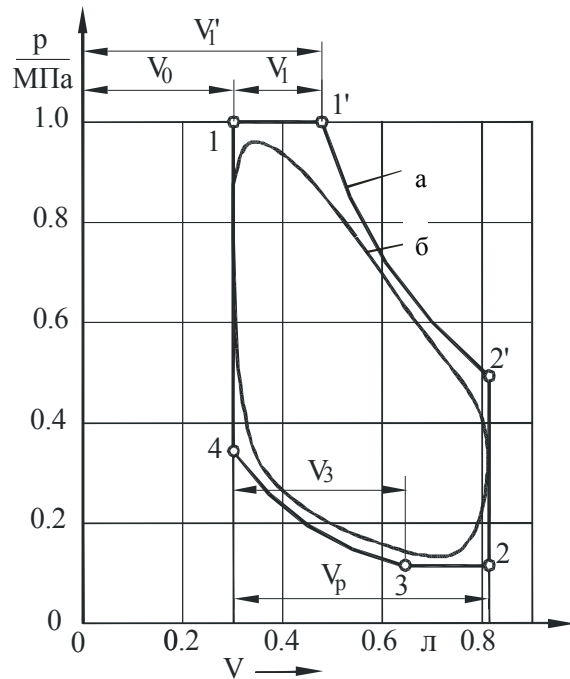


Рис. 3. Расчетные теоретическая (а) и действительная (б) индикаторные диаграммы исследуемого пневмодвигателя: V_p – рабочий объем; V_0 – мертвый объем; V_1 – объем наполнения; V_3 – объем обратного сжатия

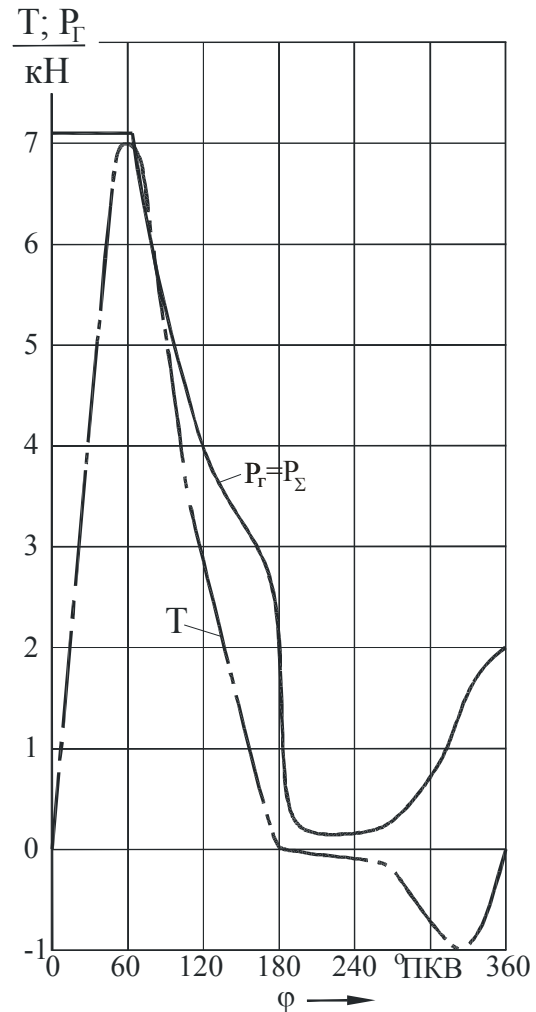


Рис. 4. Изменение по углу поворота кривошипа ϕ силы давления газов в цилиндре P_r и тангенциальной силы T на режиме пуска пневмодвигателя под нагрузкой. Работа двигателя по теоретическому циклу при $n \rightarrow 0$

Схема сил и моментов, действующих в КШМ поршневого пневмодвигателя, в принципе аналогична поршневому двигателю внутреннего сгорания, методика их определения общеизвестна [2], и её рассмотрение интереса не представляет. Представляет научный и практический интерес рассмотрение особенностей этих сил и созданных ими крутящих моментов для случаев учета сил инерции и без их учета, а также при работе двигателя по теоретической индикаторной диаграмме и работе по действительной диаграмме. И наибольший интерес представляет, конечно, анализ закономерностей изменения по углу поворота кривошипа суммарного индикаторного крутящего момента от всех цилиндров. Ниже рассмотрены все эти результаты данного исследования.

Как видно из графика, сила P_r от ВМТ и до конца наполнения остается неизменной и равной своему максимальному значению $P_{r\max}=7,07$ кН. Далее в процессе расширения P_r падает по закону адиабаты с показателем $n_p=1,32$, как для воздуха с относительной влажностью 100 % [1, с. 54], до конца хода поршня, а вблизи НМТ в период надкритического и подкритического истечения отработавшего воздуха из цилиндра кривая $P_r(\phi)$ резко падает до своего минимального значения $P_{r\min}=0,157$ кН и остается на этом уровне в период процесса изобарного выталкивания воздуха из цилиндра.

На рис. 4 для режима пуска под нагрузкой приведены графики изменения по углу поворота кривошипа ϕ силы давления газов в цилиндре P_r , приложенной к оси поршневого пальца, и тангенциальной силы T , приложен-

В период обратного сжатия сила P_r растет по закону адиабаты с показателем $n_c=1,40$, как для сухого воздуха (вся влага к этому моменту при условии температур значительно ниже $0\text{ }^\circ\text{C}$ уже сконденсирована). В конце обратного сжатия, согласно расчета, $P_r=1,995\text{ кН}$.

Таким образом, как на прямом, так и на обратном ходе поршня сила давления газов P_r остается положительной. На прямом ходе она совершает положительную работу, а на обратном – отрицательную.

Тангенциальная сила T , как видно из рис. 4, на прямом ходе поршня создает момент положительный, а на обратном – отрицательный, т.е. направленный против вращения коленчатого вала. В положениях ВМТ и НМТ сила $T=0$. Кривая $T(\varphi)$, как видно из графика, имеет два экстремума: в положительной области при $\varphi=60\text{ }^\circ$ ПКВ $T_{\max}=7,0\text{ кН}$ и в отрицательной области при $\varphi=320\text{ }^\circ$ ПКВ $T_{\min}=-0,983\text{ кН}$.

Заметим, что график силы $T(\varphi)$ есть по существу и графиком цилиндрического индикаторного крутящего момента $M_{\text{ин}}(\varphi)$, только соответственно в другом масштабе, т.к. величины T и $M_{\text{ин}}$ имеют известную линейную зависимость

$$M_{\text{ин}} = T \cdot R, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (1)$$

где $R=0,0325\text{ м}$ – радиус кривошипа коленвала двигателя.

На рис. 5 приведены для номинального режима работы двигателя графики $P_r(\varphi)$, $P_j(\varphi)$, суммарной силы $P_\Sigma(\varphi)$ и $T(\varphi)$.

На номинальном скоростном режиме $n=923\text{ мин}^{-1}$ в процессах рабочего цикла имеют место дроссельные потери [1]. Вследствие этого двигатель на прямом ходе поршня работает с существенно более низкими давлениями в цилиндре, а на обратном ходе, наоборот – с более высокими давлениями в сравнении с теоретическим циклом, по которому двигатель работает в режиме пуска под нагрузкой.

Таким образом, увеличивающиеся с ростом частоты вращения вала двигателя n дрос-

сельные потери приводят к снижению действительной индикаторной полезной работы, что интегрально оценивается коэффициентом полноты индикаторной диаграммы $\eta_{\text{п}}$.

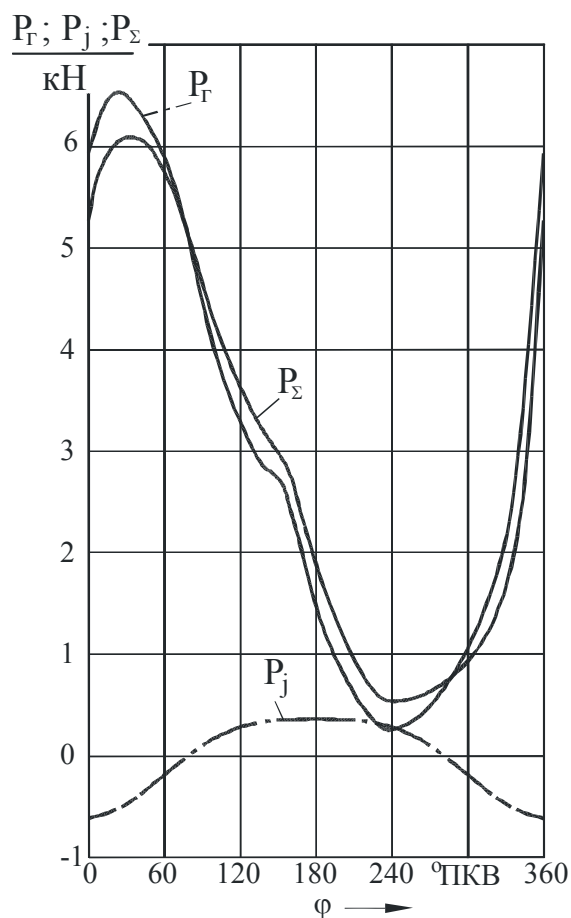


Рис. 5. Изменение по углу поворота кривошипа φ силы давления газов в цилиндре P_r , силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс P_j и суммарной силы P_Σ при работе пневмодвигателя на номинальном режиме $N_e=20\text{ кВт}$, $n=923\text{ мин}^{-1}$. Работа двигателя по действительному рабочему циклу

Тангенциальная сила T в сравнении с режимом пуска, как видно из сопоставления графиков рис. 4 и 6, на прямом ходе поршня в результате действия сил инерции P_j и дроссельных потерь стала существенно меньше, а на обратном ходе поршня, где эта сила имеет отрицательные значения, в начале хода от $\varphi=180\text{ }^\circ$ до $\varphi=300\text{ }^\circ$ ПКВ и самом конце хода по абсолютной величине стала большей, а в области экстремума – меньшей, что связано с отмеченным выше своеобразием изменения кривой $P_\Sigma(\varphi)$.

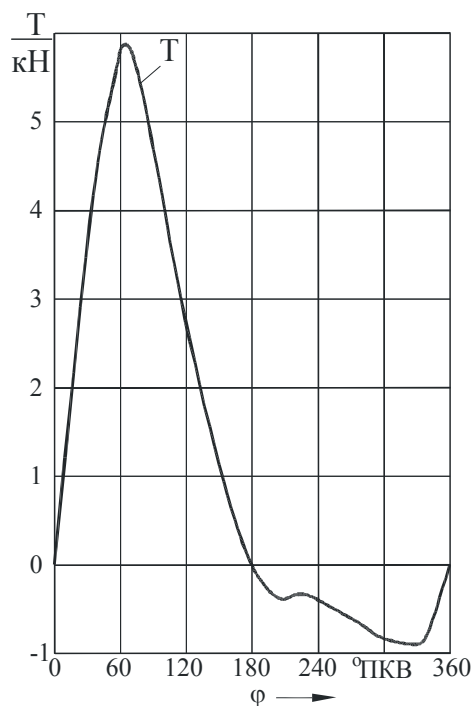


Рис. 6. Изменение по углу поворота кривошипа φ тангенциальной силы T на номинальном режиме работы пневмодвигателя (20 кВт, 923 мин⁻¹)

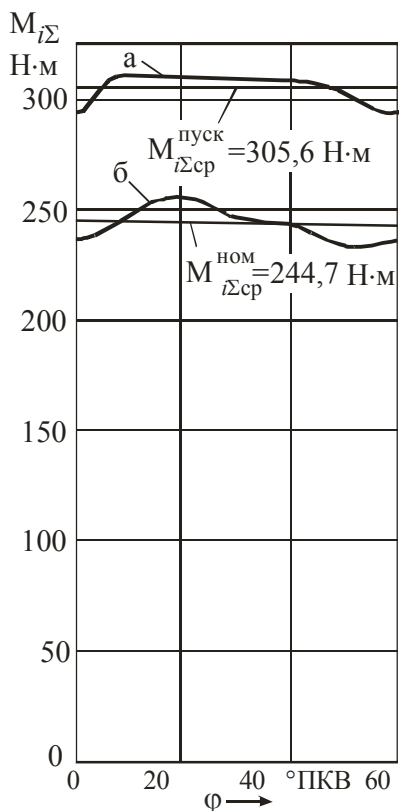


Рис. 7. Изменение по углу поворота кривошипа φ суммарного индикаторного крутящего момента $M_{i\Sigma}$ на валу пневмодвигателя: а – на режиме пуска под нагрузкой; б – на номинальном режиме

На графиках рис. 7 представлена наиболее важная в исследовании динамики работы пневмодвигателя информация о закономерностях изменения по углу поворота кривошипа φ суммарного от всех цилиндров индикаторного крутящего момента $M_{i\Sigma}$ для режима пуска двигателя под нагрузкой (кривая «а») и номинального режима его работы (кривая «б»).

Рассмотрение этих данных позволяет констатировать следующее.

В шестицилиндровом V-образном поршневом пневмодвигателе с углом развала между блоками цилиндров 60° и трехколенным валом, имеющим расположение кривошипов под углом 120° (рис. 1), имеет место равномерное чередование рабочих циклов цилиндров через 60° ПКВ. Такое же чередование имеет и цикл изменения суммарного индикаторного крутящего момента $M_{i\Sigma}$ независимо от скоростного и нагрузочного режимов.

О пусковых качествах пневмодвигателя под нагрузкой следует судить по абсолютной величине снижения $M_{i\Sigma}$ относительно среднего значения суммарного крутящего момента $M_{i\Sigma\text{сп}}^{\text{пуск}} = 305,6 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Величина этого снижения крутящего момента для данного пневмодвигателя и заданных условий его работы, как показали расчеты, составляет 12,0 Н·м или 3,9 % от среднего значения $M_{i\Sigma\text{сп}}^{\text{пуск}}$, что можно признать несущественным.

Колебания угловой скорости при установившемся режиме работы двигателя, вследствие неравномерности крутящего момента, характеризуется, как известно [3], степенью неравномерности вращения коленчатого вала

$$\delta = \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}}{\omega_{\text{cp}}}, \quad (2)$$

где ω_{max} , ω_{min} , ω_{cp} – максимальная, минимальная и средняя угловые скорости коленчатого вала, с⁻¹, на установившемся режиме работы двигателя.

$$\omega_{\text{cp}} = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,1416 \cdot 923}{30} = 96,7 \text{ рад/с.} \quad (3)$$

В работе [3] показано, что зависимость (2) может быть выражена в форме, более удоб-

ной для вычисления степени неравномерности вращения вала

$$\delta = \frac{A}{\theta_g \cdot \omega_{\text{ср}}^2},$$

где A – избыточная работа крутящего момента, определенная графически по положительной или отрицательной площади, ограничиваемой кривой $M_{i\Sigma}(\varphi)$ и линией среднего момента $M_{i\Sigma\text{ср}}^{\text{ном}}$, Н·м; θ_g – массовый момент вращающихся частей КШМ, кг·м².

Как видно из рис. 7, площадь над и под линией $M_{i\Sigma\text{ср}}^{\text{ном}}$, имея разные знаки, по абсолютной величине равны, так как их равенство является условием положения линии среднего крутящего момента $M_{i\Sigma\text{ср}}^{\text{ном}}$. А сами площади над и под линией среднего момента, как известно, выражают работу крутящего момента, которая расходуется соответственно на ускорение или замедление вращения коленчатого вала.

Выполненное нами обработкой расчетных кривых $M_{i\Sigma}(\varphi)$ получено значение степени неравномерности вращения коленчатого вала пневмодвигателя $\delta = 0,00508$. Для автомобильных двигателей допустимые уровни степени неравномерности $[\delta] = 0,01 - 0,02$ [3].

Выводы

Результаты выполненного расчетного исследования показали, что рассматриваемый шестицилиндровый V-образный поршневой пневмодвигатель с золотниковым воздухо-распределением при перекрытии фаз впуска последовательно работающих цилиндров на 10 °ПКВ имеет необходимые пусковые качества под нагрузкой и удовлетворительную равномерность хода.

Литература

1. Борисенко К.С. Пневматические двигатели горных машин / К.С. Борисенко. – М. : Углетехиздат, 1958. – 202 с.
2. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей / А.И. Колчин, В.П. Демидов. – М. : Высшая школа, 1980. – 400 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания : конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Д.Н. Вырубов, С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко и др. ; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1984. – 384 с.

Рецензент: М.А. Подригало, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2010 г.