

Л. Я. Волчок, П. В. Прокашко

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУСКА ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ

Для пуска двигателя внутреннего сгорания его коленчатый вал необходимо привести во вращение от постороннего источника энергии. Процесс проворачивания двигателя при пуске (динамика пуска) характеризуется величиной угловой скорости, продолжительностью этого вращения, моментом сопротивления, расходуемой мощностью и работой, затрачиваемой на пуск. От значения каждой из этих величин и закона их изменения зависят размеры и вес пускового устройства, одного из основных агрегатов двигателя.

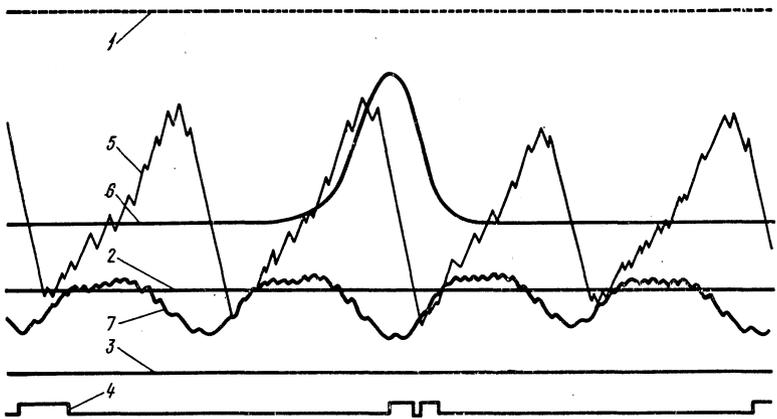


Рис. 1. Образец осциллограммы прокрутки двигателя с компрессией:

1 — угловые отметки через 10° ; 2 — нулевая линия крутящего момента; 3 — то же, угловой скорости; 4 — отметки в м. т.; 5 — крутящий момент; 6 — давление в цилиндре; 7 — угловая скорость

Угловая скорость и момент сопротивления при проворачивании коленчатого вала двигателя во время его пуска отличаются большой неравномерностью (рис. 1). В соответствии с этим для характеристики динамики пуска наряду со средними значениями этих величин большую роль играют и мгновенные значения их.

Минимальное среднее число оборотов, которое нужно сообщить двигателю для обеспечения пуска, и соответствующий этому режиму момент сопротивления быстро возрастают с понижением температуры двигателя. В еще большей мере возрастает мощность, которую должно развивать пусковое устройство. Поэтому пусковое устройство, которым оборудован двигатель, в состоянии обеспечить надежный пуск без применения подогрева и других средств для его облегчения только до определенной минимальной температуры.

Во время пуска двигателя при более высоких температурах у такого пускового устройства создается избыток крутящего момента, что позволяет ему сообщить двигателю число оборотов выше минимального пускового числа оборотов для данного теплового состояния и тем самым повысить надежность пуска. Степень надежности пуска при данном тепловом состоянии можно оценивать коэффициентом запаса пускового числа оборотов ξ_n :

$$\xi_n = \frac{n_{п.ст} - n_{п. min}}{n_{п. min}},$$

где $n_{п.ст}$ — число оборотов (среднее), сообщаемое стартером двигателю в данных температурных условиях; $n_{п. min}$ — минимальное пусковое число оборотов (среднее) двигателя в тех же условиях.

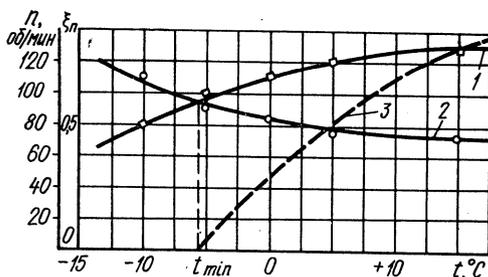


Рис. 2. Характеристика надежности пуска:

1 — число оборотов вала при прокрутке стартером; 2 — минимальное пусковое число оборотов; 3 — коэффициент запаса пускового числа оборотов

На рис. 2 показана зависимость этого коэффициента от температуры для двигателя Д-50.

Такая характеристика позволяет определять минимальную температуру t_{min} , при которой еще возможен пуск двигателя без применения вспомогательных средств для его облегчения, и может служить для сравнительной оценки пусковых качеств двигателя с данной пусковой системой.

Принудительное вращение вала двигателя стартером происходит с большой неравномерностью (рис. 1), которую принято характеризовать степенью неравномерности δ_n :

$$\delta_n = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_{cp}},$$

где ω_{\max} и ω_{\min} — максимальное и минимальное значение угловой скорости вращения вала на протяжении одного цикла (двух оборотов коленчатого вала) в период установившегося вращения; $\omega_{\text{ср}}$ — средняя угловая скорость, определяемая по продолжительности тех же двух оборотов коленчатого вала.

Степень неравномерности вращения убывает с увеличением числа цилиндров двигателя, а для одного и того же двигателя с ростом среднего числа оборотов. Так, для четырехцилиндрового двигателя Д-50 при проворачивании от электростартера со средним числом оборотов 50, 100 и 200 в минуту степень неравномерности вращения составляет соответственно 2,1; 0,9 и 0,25.

Минимум угловой скорости вращения вала приходится на период последней четверти хода поршня в такте сжатия одного из цилиндров. В этот период перепад температур воздуха и стенок цилиндра наибольший и соответственно наибольшая отдача тепла стенкам. Поэтому снижение в этот период скорости вращения увеличивает время соприкосновения воздуха со стенками и тем самым понижает температуру конца сжатия. В этот же период происходит впрыск топлива в цилиндр. При малой скорости вращения вала значительно ухудшается распыливание топлива, что также неблагоприятно сказывается на возникновении первых вспышек топлива.

Таким образом, условия возникновения первых вспышек топлива в цилиндрах при пуске двигателя определяются не столько средней скоростью вращения вала, как ее минимальным значением. Поэтому скоростные условия пуска целесообразно характеризовать как средней скоростью и степенью неравномерности, так и относительной минимальной скоростью вращения ω_{\min} , представляющей собой отношение минимальной угловой скорости $\omega_{\text{мл}}$ на протяжении одного цикла к среднему значению ее $\omega_{\text{ср}}$ за тот же период:

$$v_{\min} = \frac{\omega_{\min}}{\omega_{\text{ср}}} .$$

Так, для двигателя Д-50 относительная минимальная угловая скорость, определяющая действительные условия пуска, в диапазоне средних чисел оборотов от 100 до 200 в минуту изменяется от 0,43 до 0,9, а степень неравномерности — соответственно от 0,85 до 0,25 (рис. 3).

При неравномерном вращении вала наряду с записью угловой скорости в функции времени необходимо располагать угловым перемещением и угловым ускорением коленчатого вала. Первое нужно для перестройки графика крутящего момента, записанного в функции времени, в график зависимости его от угла поворота с целью последующего определения среднего значения крутящего момента. Угловое ускорение нужно для определения момента от сил инерции движущихся масс двигателя. Оно находится методом графического дифференцирования кривой угловой скорости, записываемой на осциллограмме прокрутки двигателя. Для построения графика углового перемещения в функции времени производится

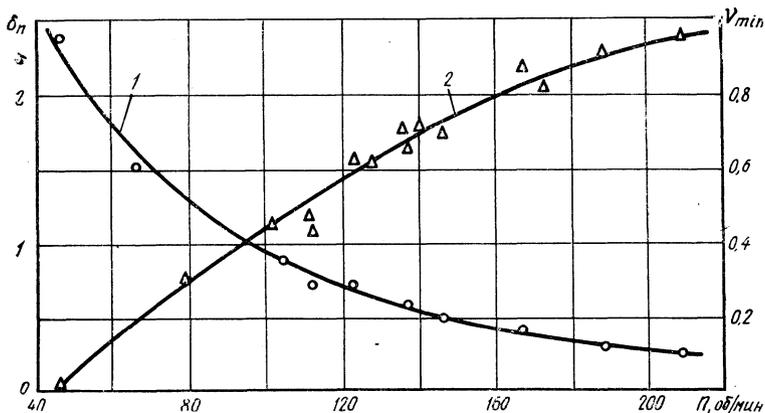


Рис. 3. Степень неравномерности прокрутки двигателя 1 и минимальная относительная скорость вращения 2.

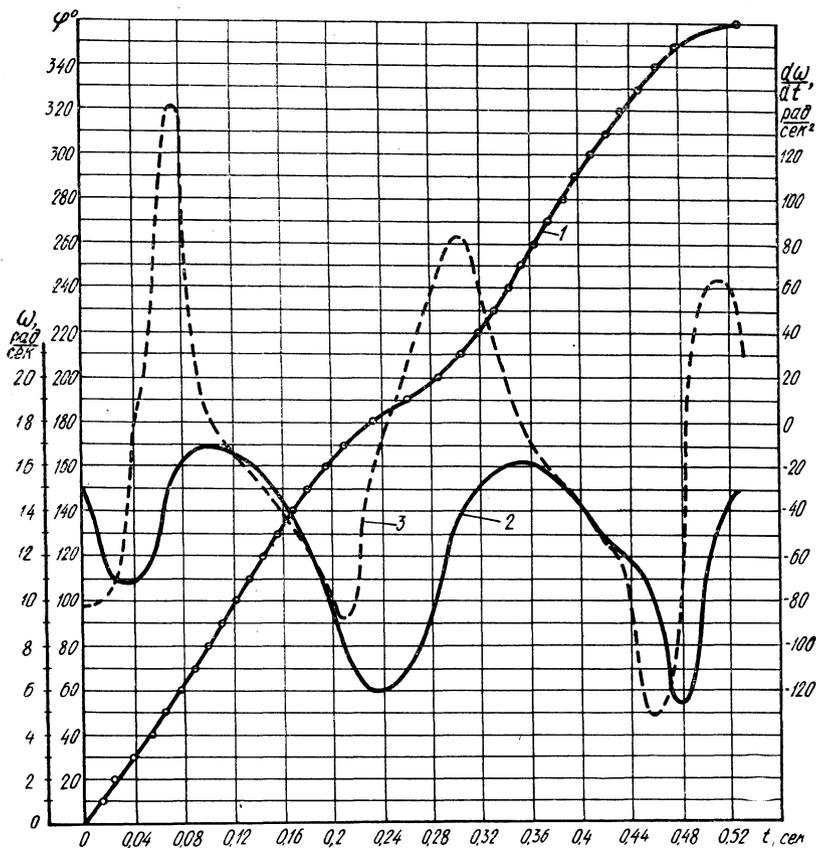


Рис. 4. Диаграммы углового перемещения 1, скорости 2 и ускорения 3

запись сигналов через равные угловые интервалы поворота вала с помощью фотоэлектрического устройства. Оно состоит из диска с узкими радиальными щелями по окружности через каждые 5° . Щели двух размеров по длине и чередуются через одну. Диск насажен на коленчатый вал, и при вращении его периодически прерывают световым лучом, идущим от лампы к фотоэлементу. Вследствие этого через каждые 5° или 10° (в зависимости от положения фотоэлектрического устройства относительно щелей) генерируется импульс тока, записываемый осциллографом.

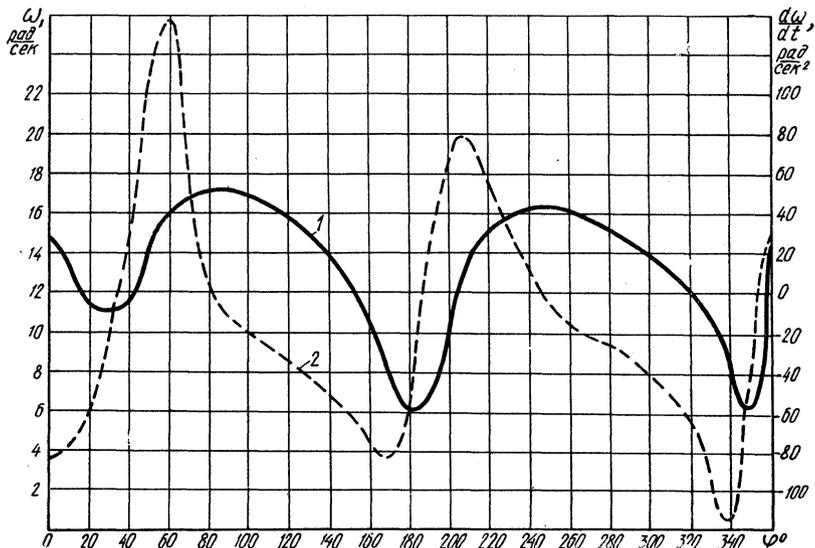


Рис. 5. Диаграммы угловой скорости 1 и ускорения 2 в функции от угла перемещения

На рис. 1 показан образец осциллограммы, содержащий запись угловой скорости ω и отметок углового перемещения вала через каждые 10° —1. На основании этой осциллограммы построен график углового перемещения на протяжении одного оборота вала и кривая углового ускорения (рис. 4). Такая диаграмма в свою очередь позволяет построить график угловой скорости и ускорения в зависимости от угла поворота вала (рис. 5) и тем самым определить зону наименьших скоростей вращения вала.

Момент сопротивления при проворачивании вала во время пуска двигателя обусловлен действием нескольких сил, которые в различные периоды вращения сочетаются в разных комбинациях.

Таковыми периодами являются: а) трогание из неподвижного состояния (начало вращения); б) разгон до установившегося режима вращения; в) вращение при установившемся режиме до возникновения первых вспышек топлива; г) разгон при совместном действии пускового устройства и газовых сил; д) самостоятельное вращение двигателя под действием только газовых сил.

Ниже приводятся результаты исследования момента сопротивления при трогании с места (периода).

Момент сопротивления в начале движения создается только силами трения покоя при наличии слоя смазки между трущимися поверхностями. При этом момент от сил трения прямолинейно движущихся элементов (поршней, колец) зависит от положения кривошипов коленчатого вала, так как разным положениям соответствуют разные величины плеча, на которое действует эта сила.

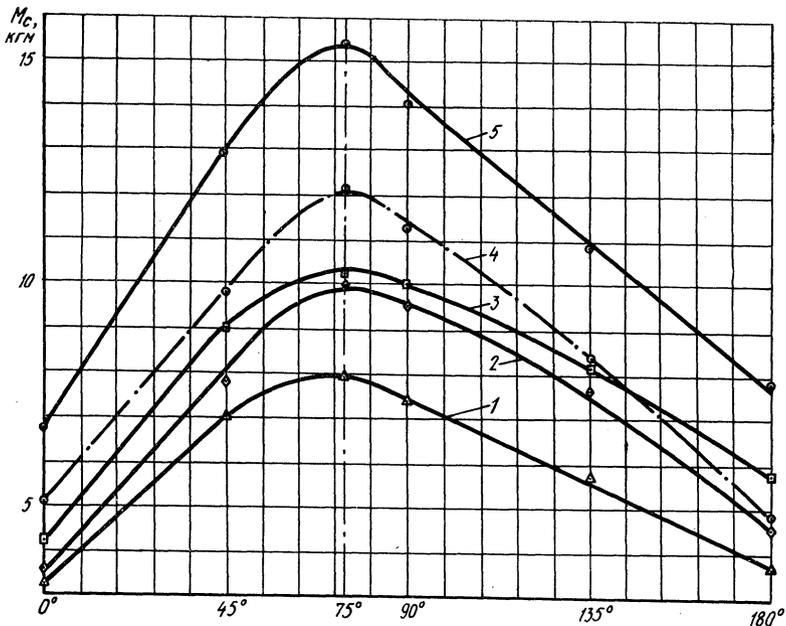


Рис. 6. Момент сопротивления при трогании вала из неподвижного состояния в зависимости от углового положения кривошипов при разных температурах:

1 — $-2,5^{\circ}\text{C}$; 2 — $+6^{\circ}\text{C}$; 3 — $+14^{\circ}\text{C}$; 4 — -12°C после двухнедельной стоянки; 5 — $+8^{\circ}\text{C}$ (то же)

Опыты по определению момента сопротивления при трогании проведены на двигателе Д-240 методом нагружения вала постепенно нарастающим моментом. Для этого к торцу маховика при разных угловых положениях вала крепился горизонтально рычаг, к которому подвешивался плавно увеличивающийся груз до возникновения вращения.

Как показали эти опыты (рис. 6), для приведения вала во вращение из неподвижного состояния наибольший момент необходимо приложить в том случае, когда кривошипы занимают положение, близкое к горизонтальному, и наименьший — при вертикальном положении, т. е. когда поршни находятся в мертвых точках. При этом отношение максимального момента к минимальному лежит

в пределах 2—2,5. Это объясняется, как указывалось выше, разной величиной плеча, на которое действует сила трения поршней и колец о стенки цилиндра. При вертикальном положении кривошипа длина плеча равна нулю и момент создается только за счет сил трения вращающихся элементов.

Такая же закономерность наблюдалась и в опытах Х. Крузе [1].

При понижении температуры момент сопротивления при трогании не только не повышается, но даже несколько уменьшается. Это может быть связано с тем, что зазоры в сочленениях (в особенности в паре поршень — цилиндр) увеличиваются с понижением температуры. В опытах Х. Крузе он оставался практически неизменным в широком диапазоне температур.

Величина момента возрастает при длительной стоянке двигателя. Так, после 14 суток стоянки момент возрос примерно в 1,5 раза по сравнению с моментом после суточного перерыва в работе.

Наблюдения за остановками четырехцилиндровых двигателей (Д-50, Д-240, А-41 и др.) из прогретого состояния показали, что кривошипно-шатунный механизм самопроизвольно останавливается в положениях, близких к горизонтальному расположению колен (отклонения в ту или другую сторону лежат в пределах 15—20°). Таким образом, наиболее вероятное исходное положение коленчатого вала при пуске четырехцилиндрового двигателя является самым неблагоприятным для трогания с места.

Проведенный выше частичный анализ динамики вращения двигателя при пуске позволяет сделать следующие выводы.

1. Оценку условий пуска двигателя целесообразно производить не только по среднему значению угловой скорости вращения вала, но и по его минимальному значению на протяжении каждого оборота.

2. Оценку надежности пуска при данной температуре можно производить по коэффициенту запаса пускового числа оборотов, представляющему собой отношение среднего числа оборотов, сообщаемого стартером двигателю, к минимальному пусковому числу оборотов при той же температуре.

3. Крутящий момент, который необходимо приложить к валу для трогания его из неподвижного состояния, зависит от исходного положения вала, температуры двигателя и длительности стоянки двигателя. У четырехтактного двигателя во время остановки вал занимает положение, когда момент сопротивления при трогании с места наибольший.

Л и т е р а т у р а

[1] Крузе Х. Анализ сил трения при холодном пуске двигателя внутреннего сгорания.— МТЗ, 1966, 27, № 5.