

## ОРГАНИЗАЦИЯ ТОПЛИВОПОДАЧИ НА РЕЖИМЕ ПУСКА В АККУМУЛЯТОРНЫХ СИСТЕМАХ ДИЗЕЛЕЙ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

*Докт. техн. наук, проф. КУХАРЕНОК Г. М., асп. МАРЧУК А. Н.*

*Белорусский национальный технический университет*

Наряду с преимуществами, которые представляют аккумуляторные системы топливоподачи с электронным управлением, в том числе и на режиме пуска, происходит выявление аспектов сложноподчиненного взаимодействия параметров системы, оказывающих значительное влияние на качество управления двигателем. Данное взаимное влияние обусловлено как появлением совершенно новых компонентов, ранее не использовавшихся механическими системами, так и принципиально иной логикой реализации топливоподачи из-за значительного структурного видоизменения топливной системы. Изучение указанных аспектов, ввиду стремительного расширения сфер применения аккумуляторных систем, является актуальной задачей с реальным практическим применением в процессе адаптации этих систем к двигателям, выпускающимся в настоящее время.

Отличительными особенностями организации топливоподачи на режиме пуска в аккумуляторных системах с электронным управлением являются следующие [1, 2]:

- необходимость достижения минимальной частоты вращения коленчатого вала при прокручивании электростартером для получения разрешения на впрыскивание топлива;
- необходимость достижения заданного минимального давления в топливном аккумуляторе

для обеспечения условий гарантированного впрыскивания топлива;

- необходимость успешной синхронизации датчиков коленчатого и распределительного валов для инициализации штатного режима впрыскивания топлива для запуска двигателя;
- задание стартовой цикловой подачи не напрямую, а через поле стартовых моментов с учетом поля моментов сопротивления прокручиванию для различных температур;
- применение на режиме пуска полей угла опережения впрыска топлива (УОВТ) и давлений в топливном аккумуляторе, отличных от значений, используемых в базовом режиме;
- необходимость синхронизации переходных процессов управления топливоподачей.

В общем виде в аккумуляторных системах топливоподачи можно выделить три фазы на режиме пуска (рис. 1):



Рис. 1. Фазы режима пуска дизелей с аккумуляторными системами топливоподачи

фазу 1: прокручивание – коленчатый вал двигателя вращается стартером без значительного изменения частоты вращения при отсутствии топливоподачи. В данной фазе происходят синхронизация датчиков коленчатого и распределительного валов, а также рост давления топлива в аккумуляторе топливной системы. При достижении заданных величин частоты вращения коленчатого вала, уровня давления топлива и успешной синхронизации выдается управляющий сигнал на активацию соленоидов инжекторов, что обуславливает впрыскивание топлива в цилиндры двигателя;

фазу 2: разгон – происходит увеличение частоты вращения за счет успешного сгорания в цилиндрах двигателя. Фаза завершается при достижении заданной частоты вращения, называемой частотой «обрезки»;

фазу 3: минимальный холостой ход – активируется при достижении значения частоты вращения зоны регулирования минимального холостого хода, заданной величинами минимальной и максимальной частот вращения. В данной фазе происходит удержание частоты вращения коленчатого вала на уровне заданной частоты минимального холостого хода.

Для обеспечения гарантированного пуска двигателя, оборудованного системами топливоподачи рассматриваемого типа, необходимо четко знать условия перехода одной фазы в другую, особенно в холодный период эксплуатации, когда выполнение этих условий становится особенно актуально, а также особое внимание уделить исследованию процессов смены фаз. Проведенная работа позволила осуществить рациональный выбор параметров системы топливоподачи и свести к минимуму негативное воздействие отрицательных температур на пусковые качества дизеля в процессе эксплуатации без применения средств облегчения пуска.

**Синхронизация и неравномерность вращения коленчатого вала.** Проблема устойчивости синхронизации датчиков положения коленчатого и распределительного валов как результат неравномерности вращения коленчатого вала при прокручивании электростартером на режиме холодного пуска проявляется особенно остро. Непосредственно под синхрони-

зацией понимают надежное считывание сигнала датчиков распределительного и коленчатого валов блоком электронного контроля двигателя, а также их взаимную интерпретацию, позволяющую с заданной точностью осуществлять управление моментом подачи топлива. В условиях низких температур увеличивается, хотя и незначительно, воздушный зазор между датчиком и импульсным колесом, что при низкой частоте вращения коленчатого вала с большой неравномерностью может приводить к сбоям в синхронизации. На практике данная особенность проявляется в нестабильности топливоподачи в течение первых ее циклов, кратковременной потере сигнала датчиков и, как следствие, – провалах по частоте вращения и появлении признаков жестокого сгорания ввиду ошибочного раннего впрыскивания топлива.

Из рис. 2 видно, что после успешного прокручивания коленчатого вала двигателя электростартером со средней частотой вращения  $180 \text{ мин}^{-1}$  (линия 2) в течение первой секунды и успешной синхронизации датчиков (линия 1) произошло значительное приращение частоты вращения до  $350 \text{ мин}^{-1}$  ввиду инициирования топливоподачи в цилиндры двигателя. Однако из-за сбоя синхронизации в начале восьмой секунды измерений впрыскивание топлива было прервано на 0,2 с, что привело к снижению частоты вращения до  $280 \text{ мин}^{-1}$ . Возобновление синхронизации позволило продолжить впрыскивание топлива и успешно завершить пуск двигателя. При незначительном прогреве двигателя и повторной попытке запуска потери синхронизации не происходило, что доказывает влияние температуры двигателя на процесс синхронизации. Следует отметить особо, что описанное выше явление наблюдается только в системах, имеющих значительные отклонения от средних значений параметров установки датчиков распределительного и коленчатого валов, а также отклонения от точности изготовления и позиционирования импульсных колес.

В аккумуляторных системах топливоподачи задается минимальная частота прокручивания двигателя, до превышения которой команда на впрыскивание топлива не выдается.

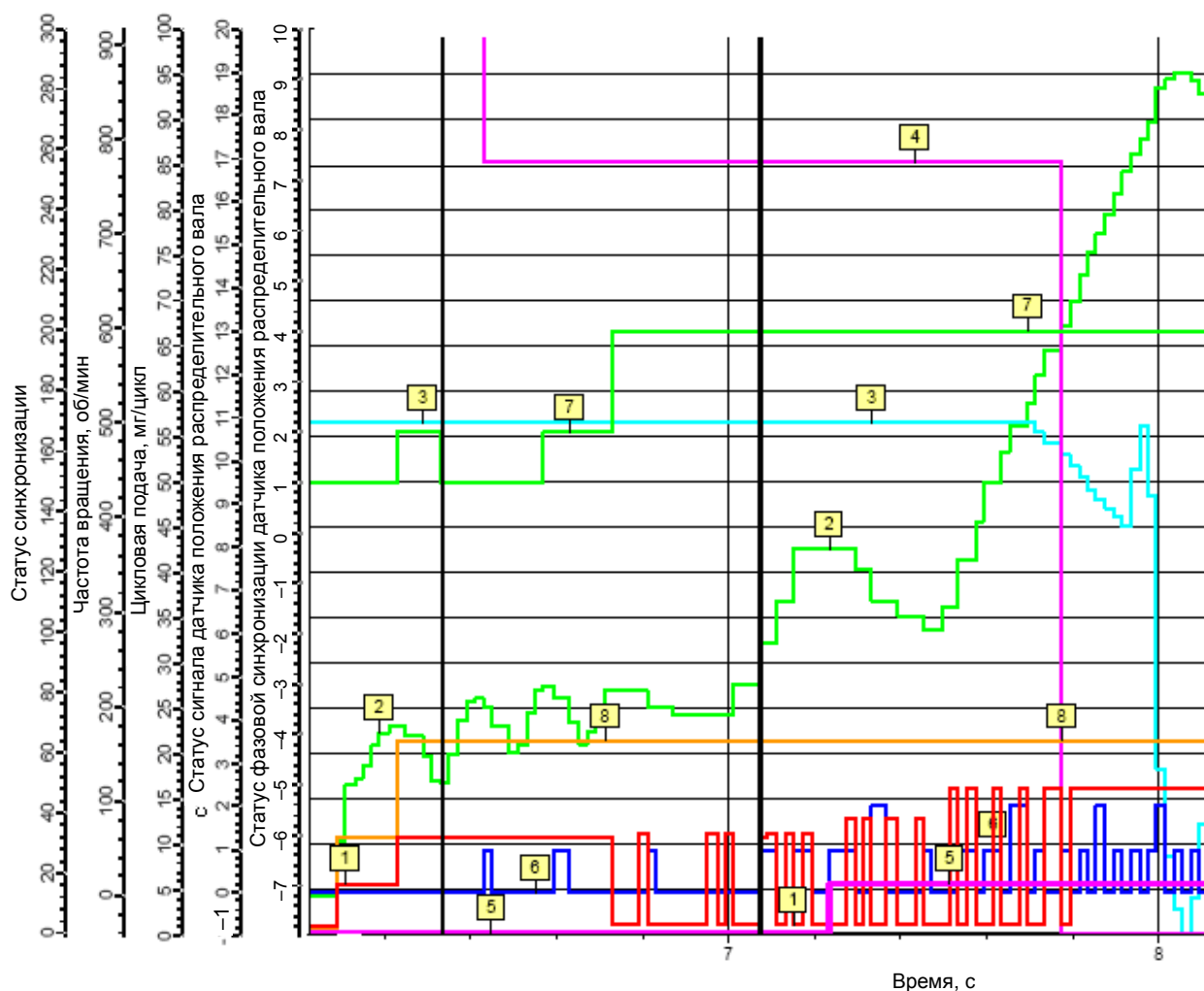


Рис. 2. Диаграмма холодного пуска четырехцилиндрового дизеля Д-245 объемом 4,75 л при температуре  $-5^{\circ}\text{C}$ : 1 – статус синхронизации; 2 – частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$ ; 3 – цикловая подача топлива, мг/цикл; 4 – статус состояния датчика распределительного вала; 5 – то же ошибки функционирования датчика распределительного вала; 6 – то же качества сигнала датчика распределительного вала; 7 – то же идентификации; 8 – то же сигнала датчика коленчатого вала

Необходимость задания данного параметра объясняется наличием минимальных теоретических частот для описанной выше синхронизации, а также нормальной работы топливного насоса высокого давления (ТНВД) для создания и поддержания заданного значения давления топлива в аккумуляторе. Так как при частотах вращения, указанных ниже, невозможно обеспечить нормальные условия для уверенного впрыскивания топлива и, следовательно, устойчивого пуска двигателя, не имеет смысла разрешать впрыскивание. Значение пороговой частоты вращения двигателя для разрешения впрыскивания зависит в большей степени от конфигурации системы и на практике составляет от 50 до  $130 \text{ мин}^{-1}$ .

Превышение пороговой частоты средней частотой вращения коленчатого вала зачастую не гарантирует разрешения топливоподачи. Большая неравномерность частоты вращения на стадии пуска может приводить к тому, что колебания с минимальными значениями могут попадать в зону запрета иницирования топливоподачи, и пуск двигателя происходить не будет. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете системы пуска и определения номинальной частоты прокручивания коленчатого вала электростартером.

На рис. 3 видно, что при среднем значении частоты вращения коленчатого вала двигателя на уровне  $90 \text{ мин}^{-1}$  мгновенные минимальные значения опускаются до величины  $70 \text{ мин}^{-1}$ .

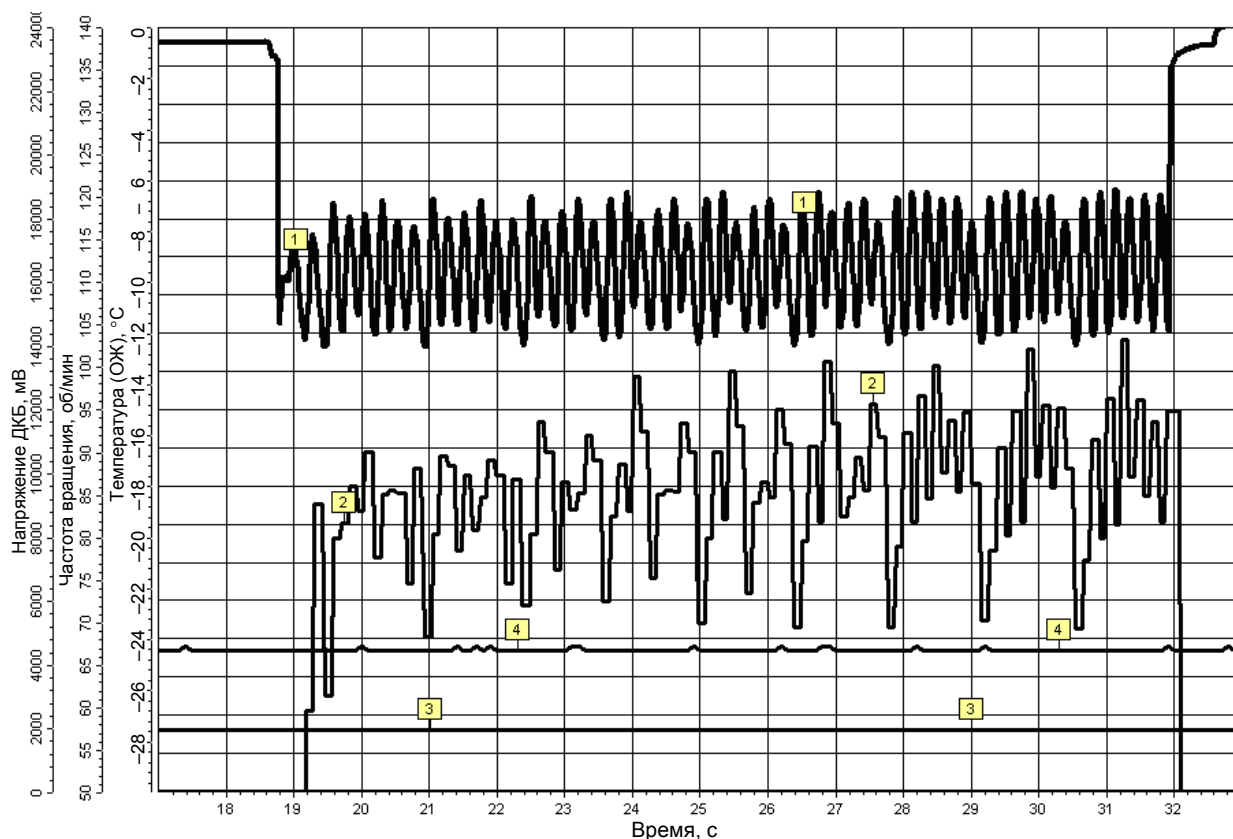


Рис. 3. Неравномерность вращения коленчатого вала электростартером на режиме холодного пуска шестицилиндрового дизельного двигателя Д-263 объемом 8,7 л при температуре  $-25^{\circ}\text{C}$ : 1 – напряжение питания блока электронного контроля, мВ; 2 – частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$ ; 3 – температура охлаждающей жидкости (ОЖ),  $^{\circ}\text{C}$ ; 4 – то же масла,  $^{\circ}\text{C}$

Описанные закономерности не являются типичными, однако встречаются тем чаще, чем ниже температура холодного пуска, и потому не могут не учитываться при адаптации и выборе рациональных параметров аккумуляторных систем топливоподачи с электронным управлением.

**Управление топливоподачей и динамика изменения частоты в фазе разгона.** В фазе разгона основными факторами, определяющими динамику изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя, являются: цикловая подача топлива и характер ее изменения по мере увеличения частоты вращения коленчатого вала в процессе разгона двигателя, момент сопротивления прокручиванию, момент инерции подвижных частей двигателя, причем фактически заданные характеристики последних будут определяющими для формирования первой [3–5].

Величина момента сопротивления прокручиванию, как правило, определяется практическим путем на тормозном стенде для нескольких значений температур охлаждающей жидко-

сти и всего ряда возможных частот вращения. После этого путем интер- и экстраполяции определяются значения момента трения двигателя для остальных значений температур, в том числе и отрицательных, величины которых оказывают определяющее значение на холодный пуск двигателя.

На рис. 4 представлен пример поля момента трения шестицилиндрового дизеля. Видно, что момент сопротивления прокручиванию растет с понижением температуры двигателя и увеличением частоты вращения.

В двигателях рассматриваемого типа величина цикловой подачи топлива на режиме пуска определяется величиной стартовых моментов, заданных через соответствующее поле. Такой подход определения цикловой подачи топлива удобен для сопоставления стартового момента с величиной момента трения и определения той положительной разницы моментов, которая будет являться движущей силой, определяющей динамику изменения частоты вращения на старте дизеля [4, 5]. Эта разница, ин-

терпретированная в цикловую подачу топлива, послужит базой для организации топливоподачи на режиме пуска. Варьируя поле значений стартовых моментов, можно добиться заданной динамики изменения частоты вращения для обеспечения уверенного старта двигателя и плавной передачи управления частотой вращения регулятору холостого хода без паразитных колебаний.

На рис. 5 представлен пример поля стартовых моментов шестицилиндрового дизеля.

Из рис. 4 и 5 видно, что в области холодного пуска при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  при частоте вращения до  $200\text{ мин}^{-1}$  разница стартового момента и момента сопротивления прокручиванию достигает  $800\text{ Н}\cdot\text{м}$ , что более чем вдвое превышает момент трения для рассматриваемых условий.

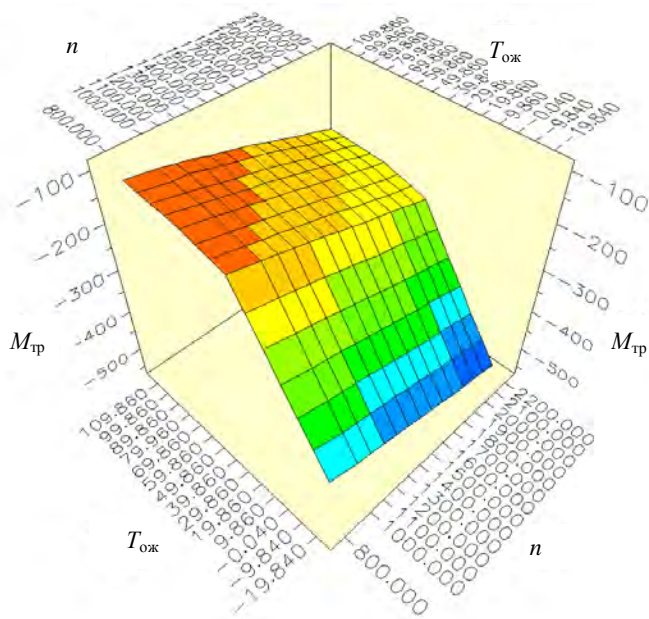


Рис. 4. Поле моментов трения шестицилиндрового дизеля Д-263 объемом 8,7 л в зависимости от температуры охлаждающей жидкости и частоты вращения коленчатого вала:  $M_{\text{тр}}$  – момент трения, Н·м;  $T_{\text{ож}}$  – температура охлаждающей жидкости,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $n$  – частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$

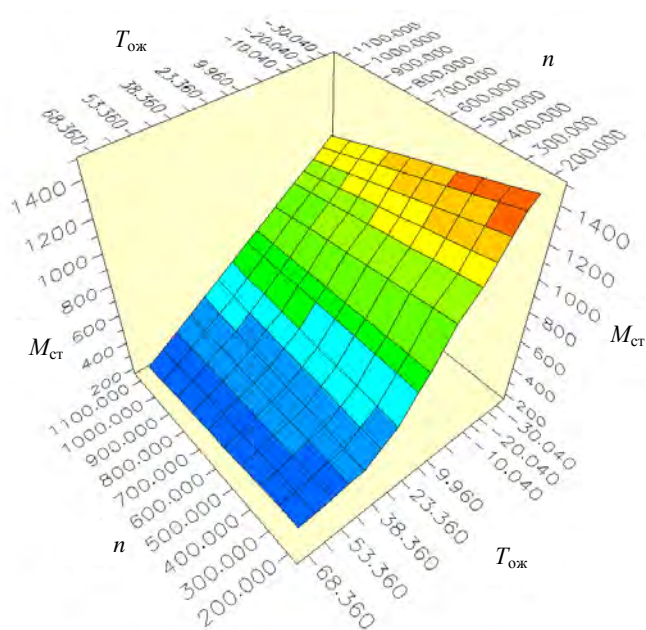


Рис. 5. Поле стартовых моментов шестицилиндрового дизеля Д-263 объемом 8,7 л в зависимости от температуры охлаждающей жидкости и частоты вращения коленчатого вала:  $M_{\text{ст}}$  – стартовый момент, Н·м;  $T_{\text{ож}}$  – температура охлаждающей жидкости,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $n$  – частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$



**Частота «обрезки» и базовый крутящий момент регулятора холостого хода.** Характер протекания режима пуска на границе второй и третьей фаз определяется как уже отмеченными величинами стартовых моментов и момента трения, так и моментом инерции двигателя и значением частоты «обрезки». Последняя определяет, в какой момент (по значению текущей частоты) прекращается действие стартового момента и происходит переход к формированию цикловой подачи регулятором холостого хода.

В зависимости от фактических значений моментов трения, инерции и стартового величина частоты обрезки может приниматься как выше частоты минимального холостого хода, так и ниже ее. Например, для двигателей с большим моментом инерции и низким значением момента трения целесообразно выбирать частоту обрезки ниже частоты минимального холостого хода, и наоборот. Качество смены фаз также сильно зависит от базового крутящего момента регулятора холостого хода. Этот момент определяет величину цикловой подачи в начале третьей фазы и должен подбираться таким образом, чтобы не происходило резких колебаний частоты вращения и регулирование минимального холостого хода осуществлялось с максимально возможной плавностью.

Также верно, что для двигателей легковых автомобилей характерны резкий разгон частоты вращения и значительный заброс частоты выше частоты минимального холостого хода, тогда как для двигателей большегрузных автомобилей традиционным является плавное повышение частоты с отсутствием или незначительным забросом (рис. 6, 7).

Отсюда следует, что для небольшого момента инерции подвижных частей двигателя относительно небольшого объема и принятого значения частоты «обрезки» на уровне  $950 \text{ мин}^{-1}$ , которая больше минимальной частоты холостого хода для текущей температуры ( $800 \text{ мин}^{-1}$ ), был получен значительный заброс частоты вращения до уровня  $1000 \text{ мин}^{-1}$ . Это привело к слишком резкому старту и неконтролируемому периоду движения коленчатого вала по инерции в течение  $0,7 \text{ с}$ , что не желательно. Однако такой подход в организации старта имеет преимущество в более надежной смене фаз, т. е. переходе от цикловой подачи, определяемой стартовыми моментами к цикловой подаче регулятора холостого хода. Базовый момент регулятора холостого хода был выбран с недостаточной точностью, что подтверждается значительным приростом цикловой подачи для поддержания минимального холостого хода после ее снижения в процессе смены фаз.

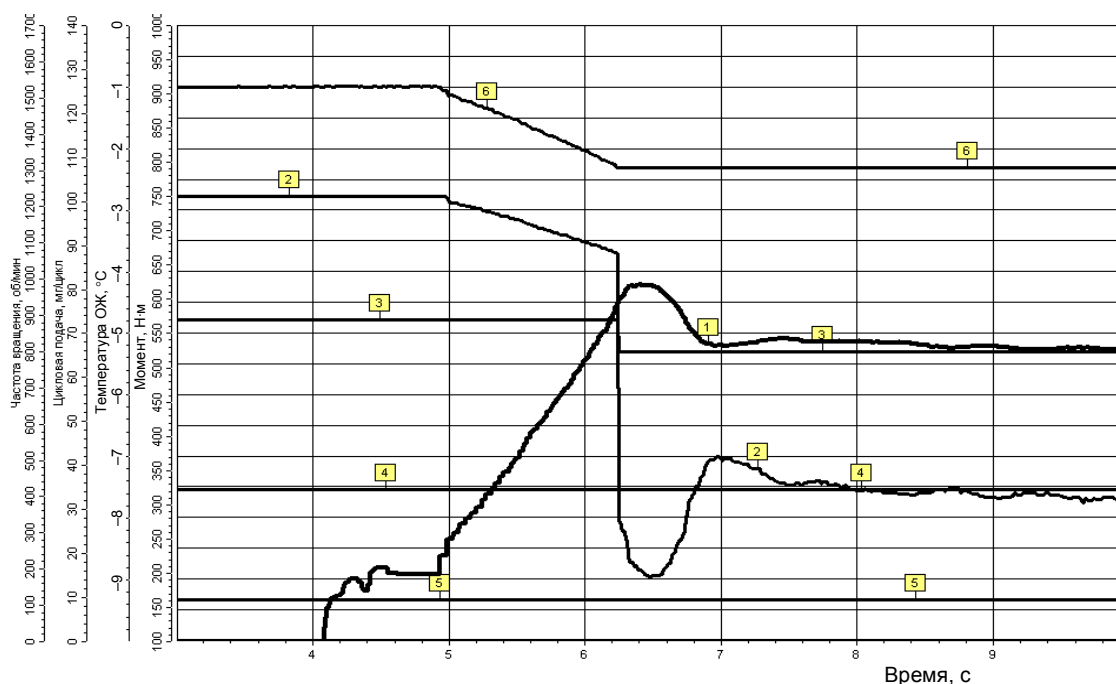


Рис. 6. Диаграмма холодного пуска четырехцилиндрового двигателя Д-249 объемом 4,75 л при температуре  $-10^{\circ}\text{C}$ : 1 – частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$ ; 2 – цикловая подача топлива,  $\text{мг/цикл}$ ; 3 – заданная частота холостого хода,  $\text{мин}^{-1}$ ; 4 – температура охлаждающей жидкости,  $^{\circ}\text{C}$ ; 5 – базовый крутящий момент регулятора холостого хода,  $\text{Н}\cdot\text{м}$ ; 6 – стартовый момент,  $\text{Н}\cdot\text{м}$

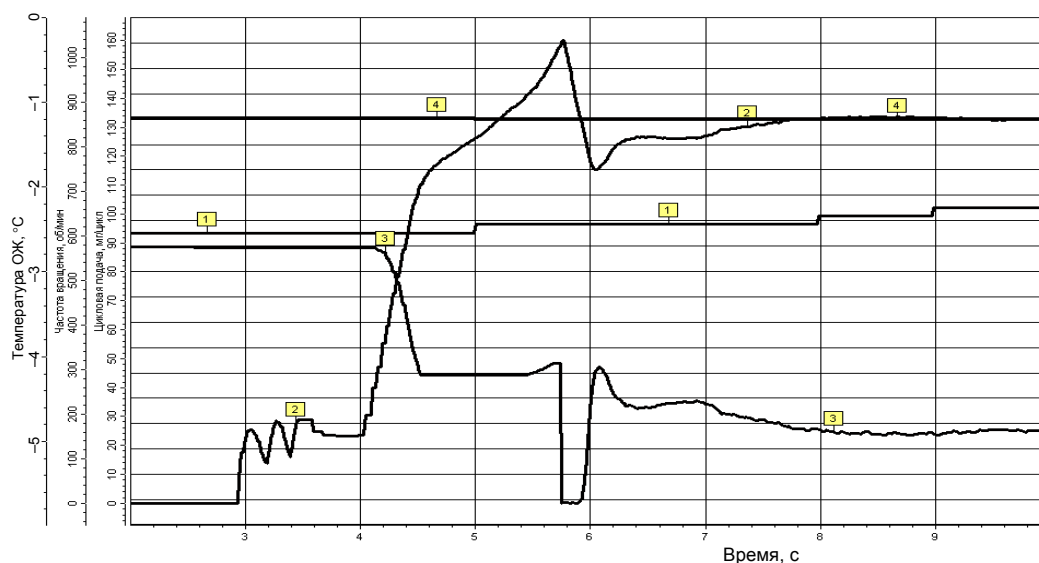


Рис. 7. Диаграмма холодного пуска четырехцилиндрового дизеля Д-245 объемом 4,75 л при температуре  $-3^{\circ}\text{C}$ : 1 – температура охлаждающей жидкости,  $^{\circ}\text{C}$ ; 2 – частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$ ; 3 – цикловая подача топлива,  $\text{мг/цикл}$ ; 4 – заданная частота холостого хода,  $\text{мин}^{-1}$

На данном примере видно, что для среднего момента инерции подвижных частей двигателя среднего объема и принятого значения частоты «обрезки» на уровне  $1000 \text{ мин}^{-1}$  заброс частоты вращения не превышает  $40 \text{ мин}^{-1}$  ввиду менее интенсивного разгона коленчатого вала. Однако слишком низкое значение начального момента регулятора холостого хода привело к нежелательному колебанию частоты до момента установления на заданном значении минимального холостого хода. Другой особенностью рас-

считываемого пуска является наглядное изменение динамики разгона коленчатого вала двигателя на режиме пуска путем задания функции изменения величины стартового момента и, как следствие, характера изменения цикловой подачи.

На рис. 8 можно отметить плавный выход частоты вращения коленчатого вала на уровень минимального значения холостого хода, который осуществлен наряду с интенсивным разгоном коленчатого вала.

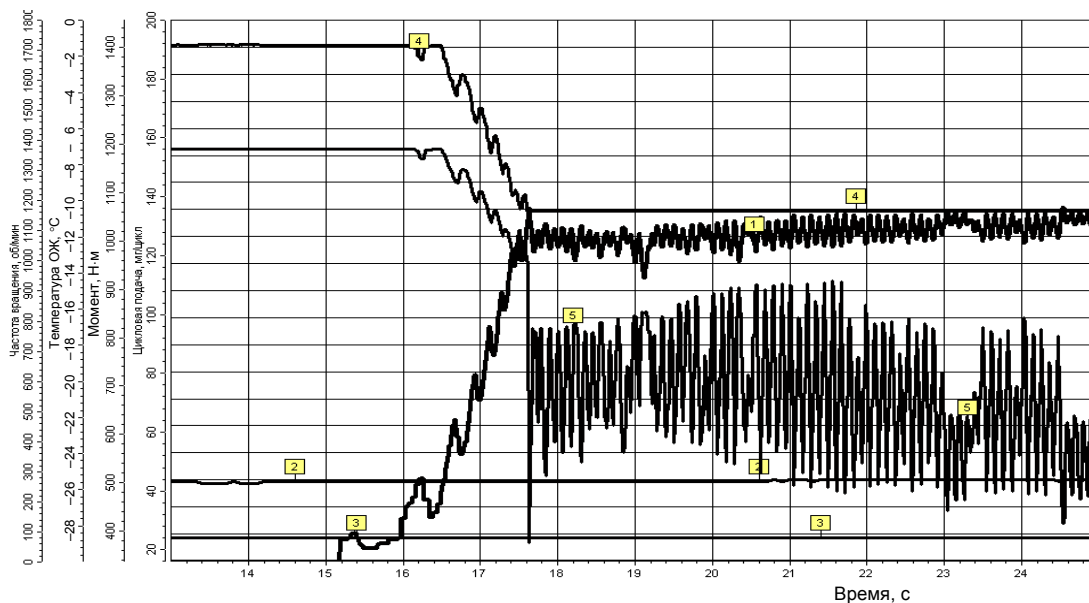


Рис. 8. Диаграмма холодного пуска шестицилиндрового дизеля Д-263 объемом 8,7 л при температуре  $-25^{\circ}\text{C}$ : 1 – частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$ ; 2 – температура охлаждающей жидкости,  $^{\circ}\text{C}$ ; 3 – базовый крутящий момент регулятора холостого хода,  $\text{Н}\cdot\text{м}$ ; 4 – стартовый момент,  $\text{Н}\cdot\text{м}$ ; 5 – цикловая подача топлива,  $\text{мг/цикл}$

Это объясняется большой величиной момента сопротивления прокручиванию. Также была отмечена нестабильная работа регулятора холостого хода, обусловленная некорректным выбором параметров топливоподачи для указанного режима.

#### ВЫВОДЫ

1. Процесс организации топливоподачи на режиме пуска в аккумуляторных системах дизелей с электронным управлением имеет ряд особенностей, определяющих необходимость их дополнительного исследования с целью рационального выбора параметров системы в процессе адаптации.

2. При организации холодных пусков при отрицательных температурах необходимо учитывать характеристики работоспособности компонентов системы, таких как минимальное значение частоты вращения, минимальное значение давления топлива в аккумуляторе, допустимое падение напряжения в цепи питания блока электронного контроля и др.

3. Широкие возможности по организации топливоподачи позволяют обеспечить более качественный пуск двигателя, однако требуют проведения дальнейших испытаний.

4. Наиболее актуальной проблемой на пути широкого внедрения и грамотной адаптации аккумуляторных систем топливоподачи с электронным управлением, в том числе и на режиме пуска, является необходимость разработки и постоянного использования программ математического моделирования процессов топливоподачи с целью сокращения объемов стендовых испытаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Грехов, Л. В.** Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учеб. для вузов / Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко, В. А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 344 с.
2. **Системы** управления дизельными двигателями / пер. с нем.; 1-е рус. изд. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. – 480 с.
3. **Двигатели** внутреннего сгорания: в 3 кн. – Кн. 1: Теория рабочих процессов: учеб. для вузов / В. Н. Луканин [и др.]; под ред. В. Н. Луканина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. – 479 с.
4. **Улучшение** пусковых качеств автотракторных дизелей в зимний период эксплуатации / А. Н. Карташевич [и др.]. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2005. – 172 с.
5. **Кухаренок, Г. М.** Рабочий процесс высокооборотных дизелей: методы и средства совершенствования / Г. М. Кухаренок. – Минск: БГПА, 1999. – 180 с.

Поступила 25.05.2009