

5. Нестеров, Е. С. Разработка технологического процесса и почвообрабатывающего орудия для основной обработки почвы : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Нестеров Евгений Сергеевич. – Саратов, 2011. – 197 с.
6. Артамонов, Е. И. Перспективы и опыт возделывания амаранта с применением нового высевального устройства / В. Ф. Казарин, И. Ю. Галенко, Е. И. Артамонов // Известия Самарской ГСХА. – 2013. – № 4. – С. 64-66.
7. Иванайский, С. А. Рабочий орган для предпосевной обработки почвы / С. А. Иванайский, О. М. Парфенов // Актуальные проблемы аграрной науки и пути их решения : сб. науч. тр. – Кинель : РИО СГСХА, 2016 – С. 41-44.
8. Васильев, С. А. Разработка системы автоматизации дифференцированного внесения удобрений при посеве / С. А. Васильев, М. А. Канаев, О. В. Карпов, М. Р. Фатхутдинов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 1. – С. 58-62.

DOI 10.12737/17451

УДК 62-144:621.515:621.43.052

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ И ТУРБОКОМПРЕССОРА ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ГАЗОТУРБИННОГО НАДДУВА

Иншаков Александр Павлович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Мобильные энергетические средства», ФГБОУ ВО «Мордовский ГУ им. Н. П. Огарёва».

430904, г. Саранск, п. Ялга, ул. Российская, 5.

E-mail: kafedra_mes@mail.ru

Курбаков Иван Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Мобильные энергетические средства», ФГБОУ ВО «Мордовский ГУ им. Н. П. Огарёва».

430904, г. Саранск, п. Ялга, ул. Российская, 5.

E-mail: mrsu2@mail.ru

Курбакова Мария Сергеевна, аспирант кафедры «Мобильные энергетические средства», ФГБОУ ВО «Мордовский ГУ им. Н. П. Огарёва».

430904, г. Саранск, п. Ялга, ул. Российская, 5.

E-mail: m.s.kurbakova@mail.ru

Ключевые слова: турбокомпрессор, двигатель, характеристика, система, диагностирование.

Цель исследований – выявление особенностей взаимосвязи динамических характеристик турбокомпрессора ТКР 6.1 и двигателя Д-245-35 при наличии неисправностей в системе наддува. В практике поиска неисправностей в системе газотурбинного наддува автотракторного двигателя широко применяется метод диагностирования, основанный на измерении давления наддува на номинальных режимах. В условиях сервисных предприятий из-за отсутствия тормозных стендов оценить нагрузочный режим зачастую не представляется возможным. Для разгона турбокомпрессора и двигателя на кафедре мобильных энергетических средств Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва создан диагностический комплекс, состоящий из блока формирования исходных сигналов, оптического датчика частоты вращения вала турбокомпрессора, датчика частоты вращения вала двигателя, датчика линейного перемещения рычага балансировочной машины, аналого-цифрового преобразователя, программного комплекса и персонального компьютера. Испытания проводились на двигателе ММЗ Д-245-35 с установленным турбокомпрессором ТКР 6.1, имитация рабочих режимов осуществлялась на обкаточно-тормозном стенде. В результате испытаний получена серия характеристик разгона турбокомпрессора двигателя Д-245-35 и ТКР 6.1 при ступенчатом входном воздействии. Анализ полученных данных показал, что наличие неисправностей в системе наддува «утечка газов перед турбиной», «засорение воздушного фильтра» ведет к увеличению времени переходного процесса и снижению частоты вращения ротора ТКР на всех режимах. Разгонная характеристика, полученная в безнагрузочном режиме в условиях неисправности «утечка газов после компрессора» сопровождается ростом амплитудного значения частоты вращения вала ТКР и снижением времени переходного процесса. Данная особенность формы кривой разгона позволяет идентифицировать неисправности такого рода при диагностировании систем газотурбинного наддува.

Улучшение потребительских качеств автотракторных двигателей внутреннего сгорания идёт по пути оснащения их системами турбонаддува, состоящими из турбокомпрессора, интеркуллера, систем управления, соединительных коллекторов и многих других элементов. Для обеспечения компактного расположения двигателя в моторном отсеке, элементы системы наддува часто размещаются «неудобно», что в свою очередь усложняет поиск их неисправностей, возникающих во время эксплуатации. В практике поиска неисправностей наиболее широко применяется метод безразборного диагностирования системы наддува, основанный

на измерении давления наддува [4, 6]. Этот метод позволяет отслеживать эффективность функционирования турбонаддува непосредственно в процессе эксплуатации дизеля, т.е. под нагрузкой. В большинстве предложенных методик диагноз базируется на сравнении измеренной информации с эталонной, и делается заключение об исправности или неисправности системы. Снижение же давления наддува может быть следствием многих неисправностей таких как: засорение воздухоочистителя, наличие гидравлических утечек воздуха после компрессора, прорыв газов перед турбиной, противодействие на выпуске и т.д. Причем, снижение давления наддува отражается на эффективной мощности двигателя [5], что в принципе и является причиной обращения в сервисную службу. В условиях сервисного предприятия зачастую невозможно воспроизвести и оценить нагрузочный режим из-за отсутствия тормозных стендов, что приводит к дополнительным трудностям. В этой связи задачей данного исследования является разработка метода диагностирования системы наддува на основе определения характеристик турбокомпрессора при разгоне двигателя.

Цель исследований – выявление особенностей взаимосвязи динамических характеристик турбокомпрессора ТКР 6.1 и двигателя Д-245-35 при наличии неисправностей в системе наддува.

Задачи исследований – определить динамические характеристики двигателя Д-245-35 и турбокомпрессора ТКР 6.1 при наличии неисправностей в системе наддува.

Материалы и методы исследований. Для визуализации процесса разгона турбокомпрессора необходима обработка исходного сигнала, которая может быть реализована по одному из двух методов:

1) Преобразование частоты входного сигнала в напряжение выходного сигнала, и последующая регистрация его на ПК с помощью аналого-цифрового преобразователя;

2) Регистрация исходного сигнала на ПК с помощью аналого-цифрового преобразователя и последующая обработка сигнала с помощью программных средств.

Обработка сигнала программными средствами имеет ряд преимуществ по сравнению с внешним преобразованием входного сигнала:

- отсутствует дополнительный модуль преобразования;
- не меняется частота опроса сигнала;
- более высокая точность измерений.

Однако обработка сигнала в программной среде требует более высокой квалификации и предусматривает выполнение следующих процессов:

- запись сигнала;
- разбиение сигнала на участки (импульсы);
- преобразование сигнала и построение графика изменения частоты сигнала во времени;
- калибровка сигнала.

Анализ средств диагностирования и визуализации динамической характеристики скорости вращения вала турбокомпрессора показывает, что для этих целей эффективнее использовать комплекс, состоящий из блока формирования аналогового сигнала, аналогово-цифрового преобразователя и программных средств обработки сигнала [3].

Для получения динамических характеристик (разгона) турбокомпрессора и двигателя на кафедре мобильных энергетических средств Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва создан диагностический комплекс [4, 7], состоящий из блока формирования исходных сигналов, оптического датчика частоты вращения вала турбокомпрессора, датчика частоты вращения вала двигателя, датчика линейного перемещения рычага балансировочной машины, аналого-цифрового преобразователя Л-КАРД Е-14-140М, программного комплекса L-Graph 2 и Power Graph, персонального компьютера. Испытания проводились на двигателе ММЗ Д-245-35, с установленным турбокомпрессором ТКР 6.1, имитация рабочих режимов осуществлялась на обкаточно-тормозном стенде КИ-5543 ГОСНИТИ.

В результате испытаний была получена серия характеристик при разгоне двигателя Д-245 и турбокомпрессора ТКР 6.1. Разгон двигателя осуществлялся при ступенчатом входном воздействии (резкое перемещение рычага управления подачей топлива от минимального положения до максимального).

Результаты исследований. Результаты исследований показывают, что графики разгона турбокомпрессора и двигателя внутреннего сгорания (ДВС) синхронно изменяются во времени без видимых запаздываний (рис. 1). Разгон без нагрузки происходит за 1,4-1,5 с до амплитудных значений $n_{\text{ТКР}} = 80\ 000$ об/мин для $n_{\text{ДВС}} = 2\ 415$ об/мин, затем при неизменном положении рычага управления подачей топлива происходит снижение частот вращения для ТКР до значения 63 000 об/мин для ДВС – 2 330 об/мин. При этом следует отметить, что характер разгонной кривой имеет форму колебательного объекта второго порядка, как для турбокомпрессора, так и двигателя. Однако формы колебательных процессов данных систем отличаются, так как коэффициенты инерции, демпфирования и жесткости у них различны. Графики разгона ТКР без нагрузки плавные и медленнее достигают установившегося значения. Графики разгона без нагрузки ДВС имеют более выраженный колебательный характер, но быстрее достигают установившегося значения.

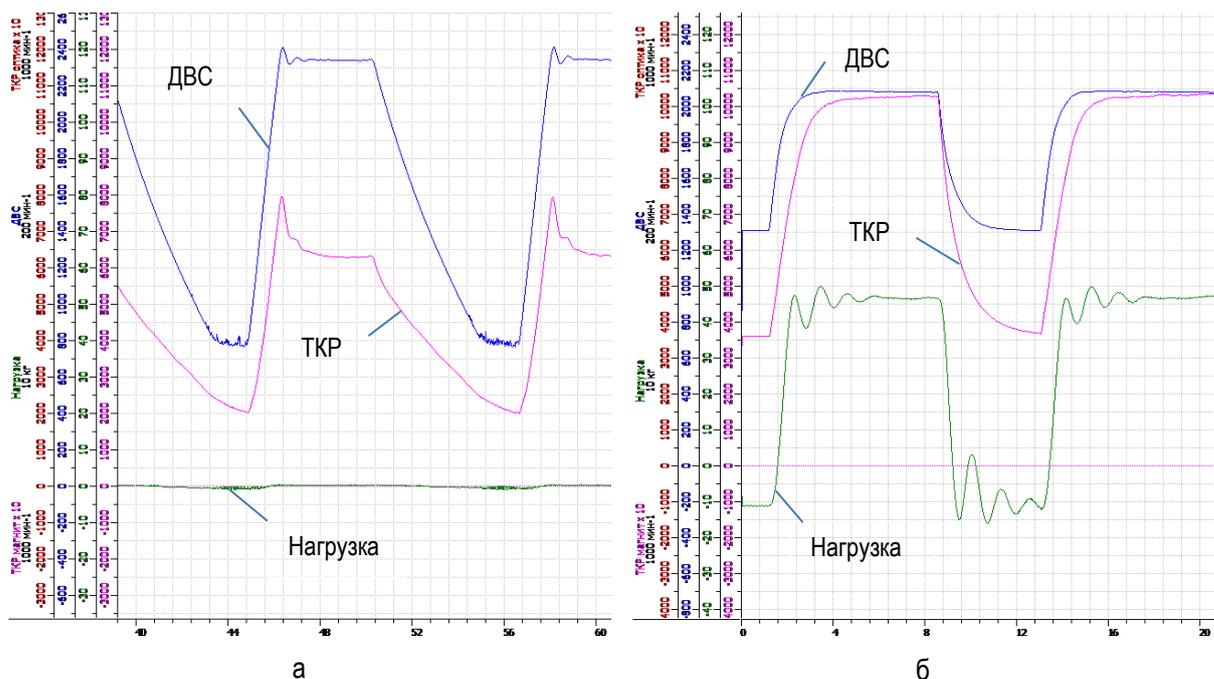


Рис. 1. Динамические характеристики турбокомпрессора и двигателя Д-245-35 (исправное состояние системы): а – без нагрузки; б – под нагрузкой

С помощью графического метода были определены приближенные значения постоянной времени переходного процесса T для динамических характеристик турбокомпрессора и двигателя (рис. 2). При этом время переходного процесса для ДВС составляет 1,1 с, для ТКР 1,6 с.

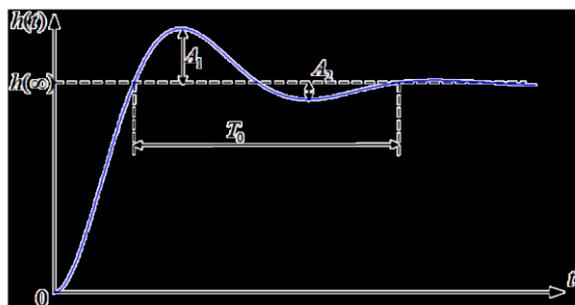


Рис. 2. Графическое определение параметров T колебательного объекта 2-го порядка

Характер динамических характеристик под нагрузкой для ТКР и ДВС имеет отличия от таковых без нагрузки (рис. 1). Для инерционного объекта 1-го порядка постоянная времени объекта T определяется как промежуток времени, в течение которого переходная функция достигает 63% своей установившейся величины (рис. 3) [1, 2].

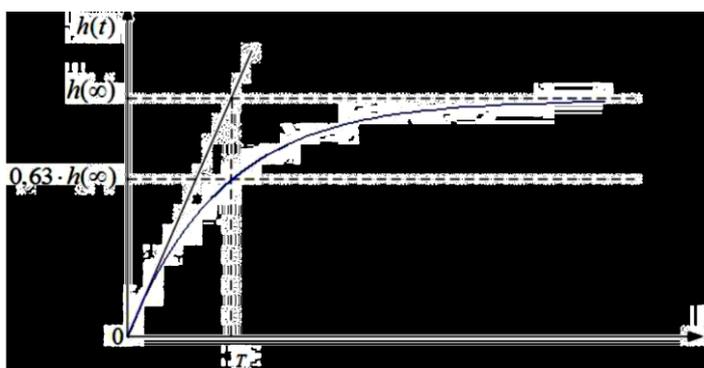


Рис. 3. Графическое определение постоянной времени T' инерционного объекта 1-го порядка

Длительность разгона турбокомпрессора от 35000 мин⁻¹ до значения 63% от установившейся величины составляет 0,7 с, значения частоты вращения ТКР 102 000 мин⁻¹ достигается за 2,6 с, значение частоты вращения ТКР 80 000 мин⁻¹ – за 1,01 с, установившееся значение частоты вращения ТКР 105 000 мин⁻¹ достигается за 5,8 с. Разгон коленчатого вала ДВС от 1311 мин⁻¹ до значения 2080 мин⁻¹ составляет 1,8 с, а до установившегося значения 2085 мин⁻¹ – за 2,8 с.

В условиях развития неисправностей, вызванных утечками газов перед турбиной, динамические характеристики ДВС и ТКР характеризуются следующими значениями (рис. 4):

а) разгон без нагрузки происходит за 1,5 с до амплитудных значений $n_{\text{ТКР}} = 67\ 000\ \text{мин}^{-1}$ для $n_{\text{ДВС}} = 2\ 400\ \text{мин}^{-1}$, затем при неизменном положении рычага управления подачей топлива происходит снижение частот вращения для ТКР до значения 53 000 мин⁻¹ для ДВС – 2 330 мин⁻¹. Время переходного процесса для ДВС составляет 0,95 с, для ТКР – 2 с.

б) длительность разгона турбокомпрессора от 29 000 мин⁻¹ до значения 63% от установившейся величины составляет 0,65 с, до частоты вращения ТКР 80 000 мин⁻¹ – за 2,7 с, установившееся значение частоты вращения ТКР 87 000 мин⁻¹ достигается за 5,8 с. Разгон коленчатого вала ДВС от 1320 мин⁻¹ до установившегося значения 2040 мин⁻¹ составляет 3,2 с.

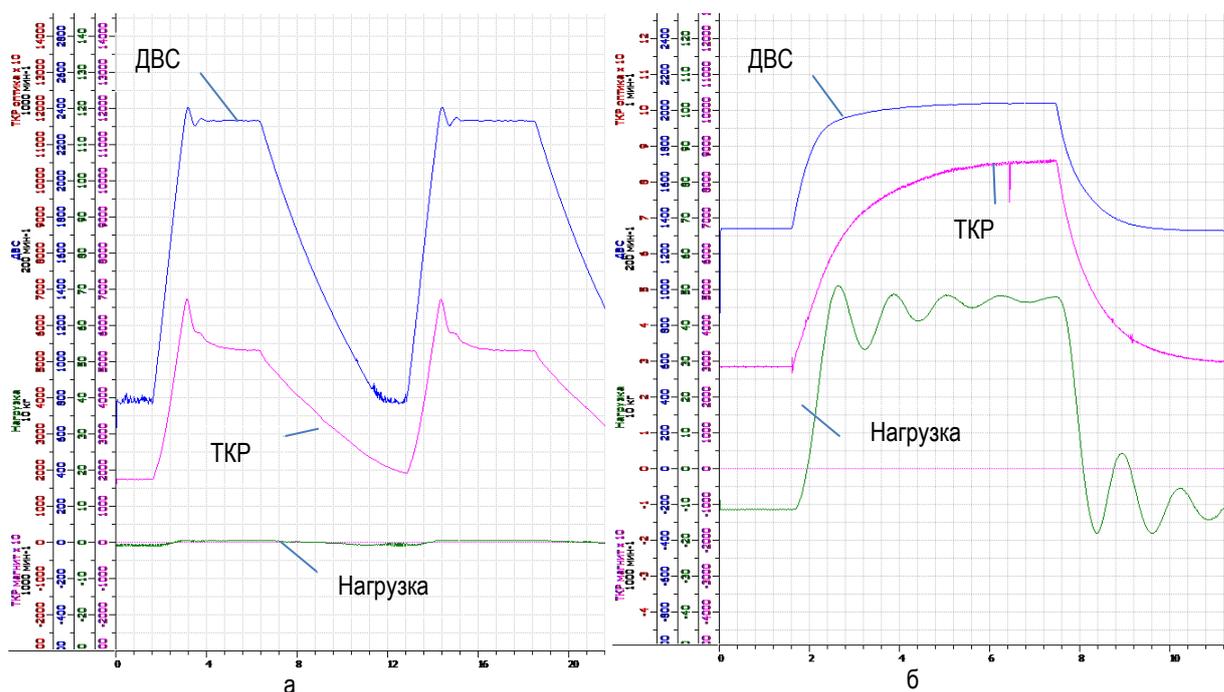


Рис. 4. Динамические характеристики турбокомпрессора и двигателя Д-245-35 (утечка газов перед турбиной, через отверстие диаметром 12 мм): а – без нагрузки; б – под нагрузкой

В условиях развития неисправностей, вызванных утечками после компрессора, графики переходных процессов ДВС и ТКР характеризуются следующими значениями показателей (рис. 5):

а) разгон без нагрузки происходит за 1,46 с до амплитудных значений $n_{\text{ТКР}} = 81\ 000\ \text{мин}^{-1}$ для $n_{\text{ДВС}} = 2\ 408\ \text{мин}^{-1}$, затем при неизменном положении рычага управления подачей топлива происходит снижение частот вращения для ТКР до значения 64 000 мин⁻¹, для ДВС – 2 334 мин⁻¹. Время переходного процесса для ДВС составляет 1,05 с, для ТКР – 1,92 с.

б) длительность разгона турбокомпрессора от 35 500 мин⁻¹ до значения 63% от установившейся величины составляет 0,62 с, до частоты вращения ТКР 80 000 мин⁻¹ – за 1,05 с, установившееся значение частоты вращения ТКР 102 000 мин⁻¹ достигается за 3,1 с. Разгон коленчатого вала ДВС от 1 315 мин⁻¹ до установившегося значения 2 080 мин⁻¹ составляет 2,25 с.

В условиях развития неисправностей, вызванных засорением воздушного фильтра, графики переходных процессов ДВС и ТКР характеризуются следующими значениями показателей (рис. 6):

а) разгон без нагрузки происходит за 1,5 с до амплитудных значений $n_{\text{ТКР}} = 75\ 000\ \text{мин}^{-1}$, затем при неизменном положении рычага управления подачей топлива происходит снижение частот вращения для ТКР до значения 60 000 мин⁻¹. Время переходного процесса составляет для ТКР – 2,24 с. В условиях данной неисправности наблюдается неустойчивая работа двигателя.

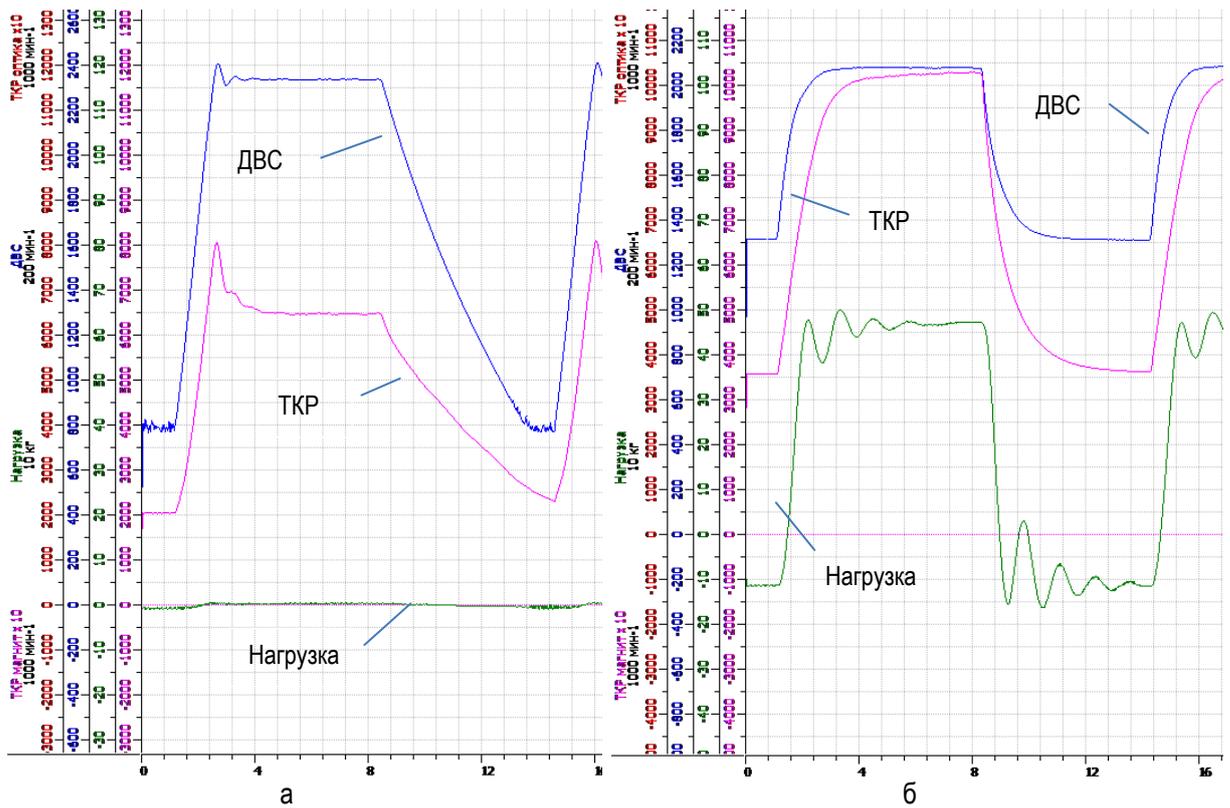


Рис. 5. Динамические характеристики турбокомпрессора и двигателя Д-245-35 (утечка газов после компрессора, площадь отверстия 20 мм²):
а – без нагрузки; б – под нагрузкой

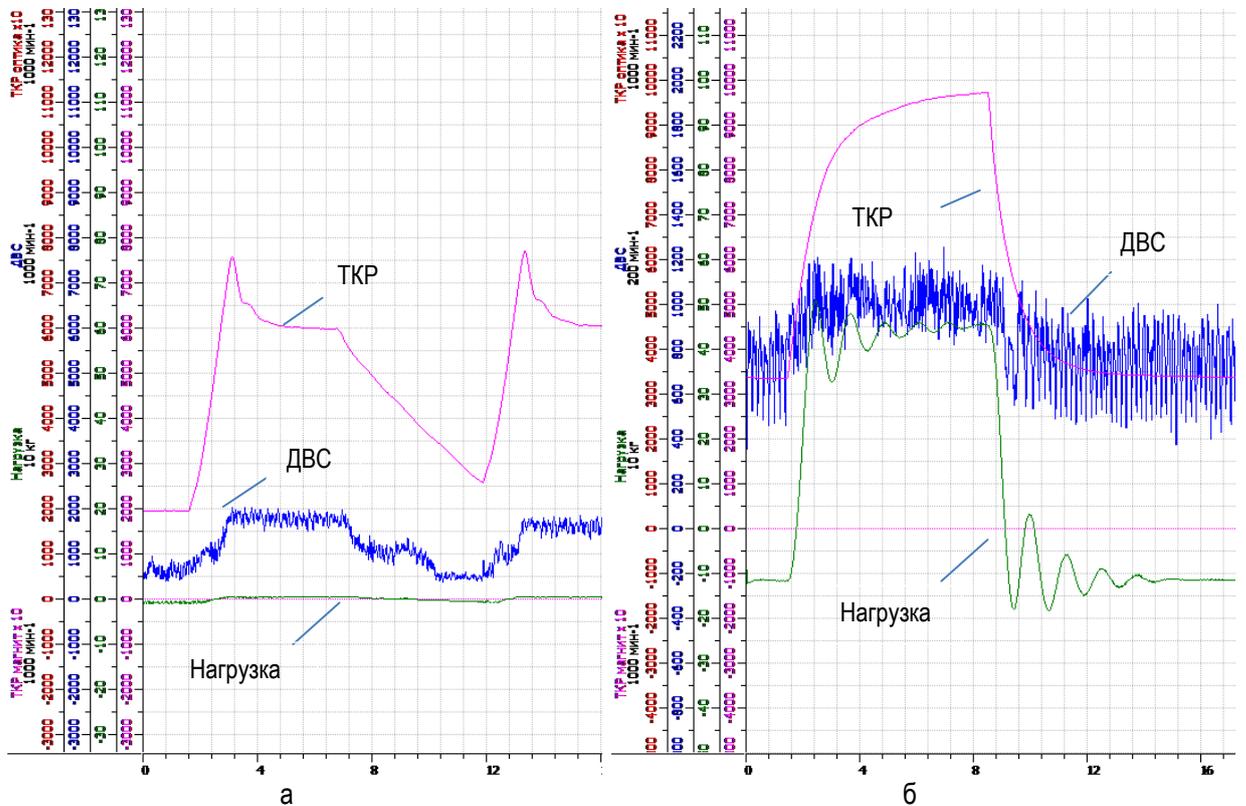


Рис. 6. Динамические характеристики турбокомпрессора и двигателя Д-245-35 (засорение воздушного фильтра, 0,1 МПа):
а – без нагрузки; б – под нагрузкой

Полученные значения параметров разгонных характеристик представлены в таблице 1.

Наличие неисправности ведет к увеличению времени достижения установившегося значения n_{TKP} с 2,6 с до 7 с под нагрузкой и снижения частоты вращения ротора ТКР во всех случаях (табл. 1). При этом динамическая характеристика без нагрузки для неисправности «утечки после компрессора» представляет интерес с точки зрения роста амплитудного значения частоты вращения вала ТКР и снижения времени переходного процесса. Данная особенность позволяет идентифицировать неисправности такого рода в безнагрузочном режиме.

Таблица 1

Значения показателей динамических характеристик ДВС и ТКР

Разгон без нагрузки					Разгон под нагрузкой						Состояние системы наддува
$n_{TKP\ max}/n_{TKP\ уст},$ МИН ⁻¹	$n_{двс\ max}/n_{двс\ уст},$ МИН ⁻¹	$T_{двс},$ с	$T_{TKP},$ с	$T_{max},$ с	$n_{TKP\ max},$ МИН ⁻¹	$n_{двс2000}/n_{двс\ max},$ МИН ⁻¹	$T_{TKP\ 80\%},$ с	$T_{TKP\ 63\%},$ с	$T_{TKP\ 102000}/T_{TKP\ max},$ с	$T_{двс\ 2000}/T_{двс\ max},$ с	
80000/63000	2415/2330	1,1	1,6	1,45	102000/105000	2000/2085	1,01	0,7	2,6/5,8	1,0/2,8	исправное
81000/64000	2408/2334	1,05	1,92	1,46	102000	2000/2080	1,05	0,62	3,1	1,05/2,25	утечки после компрессора
67000/53000	2400/2330	0,95	2,0	1,5	87000	2000/2040	2,7	0,65	5,8	2,02/3,2	утечки перед турбиной
75000/60000	-/-	-	2,24	1,5	97000	-	1,4	0,62	7,0	-	засорение воздушного фильтра

Заключение. Диагностирование системы наддува автотракторного двигателя в условиях сервисного предприятия можно осуществить безразборным, безнагрузочным методом, основанным на анализе динамических характеристик ДВС и ТКР, полученных при ступенчатом входном воздействии (резкое перемещение рычага управления подачей топлива от минимального положения до максимального). Наличие неисправностей приводит к изменению временных и амплитудных значений динамических характеристик. Особенность переходных процессов в условиях «утечки воздуха после компрессора» позволяет точно идентифицировать неисправности такого рода в безнагрузочном режиме. Использование предложенного авторами комплекса оборудования и программных средств позволяет изучать природу формирования быстро развивающихся процессов в автотракторном двигателе внутреннего сгорания и на этой основе строить более совершенные средства диагностирования ТКР в эксплуатации.

Библиографический список

1. Волгин, В. В. Некоторые свойства амплитудно-частотных характеристик линейных систем автоматического регулирования и качество регулирования при случайных воздействиях / В. В. Волгин, Р. Н. Каримов // Известия вузов. Электромеханика. – 1973. – № 2. – С. 195-205.
2. Волгин, В. В. Учет реальных возмущающих воздействий и выбор критерия качества при сравнительной оценке качества регулирования тепловых процессов / В. В. Волгин, Р. Н. Каримов, А. С. Карецкий // Тепло-техника. – 1970. – № 3. – С. 25-30.
3. Иншаков, А. П. Методы оценки работоспособности систем газотурбинного наддува автотракторных двигателей : монография / А. П. Иншаков, И. И. Курбаков, А. Н. Кувшинов. – Саранск, 2015. – 123 с.
4. Иншаков, А. П. Аппаратное средство контроля работоспособности турбокомпрессора / А. П. Иншаков, И. И. Курбаков, А. Н. Кувшинов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : сб. ст. – Саранск, 2013. – С. 137-141.
5. Иншаков, А. П. Программный комплекс «Дизель РК» / А. П. Иншаков, И. И. Курбаков // Сельский механизатор. – 2013. – № 12 (58). – С. 45.
6. Лянденбургский, В. В. Встроенная система диагностирования турбокомпрессоров дизелей / В. В. Лянденбургский, А. П. Иншаков, И. И. Курбаков [и др.] // Науковедение. – 2015. – Том 7, № 4.
7. Пат. № 145761 РФ, МПК G01P3/00. Устройство для измерения частоты вращения вала турбокомпрессора / А. П. Иншаков, И. И. Курбаков, А. Н. Кувшинов, О. Ф. Корнаухов. – № 20113157453 ; заявл. 24.12.2013 ; опубл. 27.09.2014.