

УДК 621.43.001.42

КОМПЛЕКСНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ И ИХ АНАЛИЗ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

Патов А. Г.¹, Гриценко А. В.¹, Бурцев А. Ю.²

¹аспирант, ЮУрГАУ, г. Челябинск;

¹д.т.н., профессор, ЮУрГАУ, г. Челябинск;

²к.т.н., доцент, филиал КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева, г. Белово.

Аннотация: Анализ применения программных продуктов для расчета параметров двигателей с турбонаддувом показал на широкие возможности среды MATLAB Simulink. На основании которых строятся многомерные таблицы и рабочие матрицы управления реальными системами двигателей.

Ключевые слова: система турбонаддува, турбокомпрессор, моделирование, исследование, визуализация, графики.

Abstract: Analysis of the use of software products for calculating the parameters of turbocharged engines showed the wide capabilities of the MATLAB Simulink environment. On the basis of which multidimensional tables and working control matrices of real engine systems are built.

Keywords: turbocharging system, turbocharger, modeling, research, visualization, graphs.

Актуальность вопроса. Современное машиностроение немислимо без прикладных программных продуктов [1, 2]. Моделирование используется на всех стадиях разработки ДВС и последующей эксплуатации [3, 4]. В ряде таких программных продуктов, как MATLAB Simulink, SolidWorks, Ansys, Компас и др. накоплено большое количество модулей и приложений для расчета и моделирования систем ДВС [5, 6]. Однако такие приложения как Ansys достаточно сложны для изучения и требуют длительного периода использования [7, 8, 9]. 3-D моделирование, метод конечных элементов, поэтапное задание всех возможных характеристик единичных узлов свойственны программам SolidWorks, Ansys и Компас [10, 11]. В любом случае трехмерное моделирование представляет собой трудозатратный процесс [12, 13, 14]. Значительную сложность представляет доскональная прорисовка мелких объектов ДВС [15, 16]. Последующие расчеты требуют значительных компьютерных мощностей для качественной конечной графики [17, 18]. Немного проще обстоят дела с программой MATLAB Simulink [19, 20]. В ней также имеются обширные расчетные модули и встроенные решатели [21, 22]. Но их использование не требует значительных ресурсов. Моделирование в среде MATLAB Simulink наглядно, эффективно и имеет значительную прикладную ценность для последующего применения в качестве исходных данных для работы систем ДВС. Целью исследования

является процесс моделирования выходных характеристик ДВС и турбокомпрессора автомобиля КАМАЗ.

Материалы и методы. Объектом исходного моделирования является двигатель автомобиля КАМАЗ 740 Евро-4, широко используемый для перевозки с/х грузов [23, 24]. В исходных данных для расчета были выбраны две базовые характеристики двигателя: число цилиндров и литровой объем. Двигатель автомобиля КАМАЗ 740 Евро-4 8-цилиндровый с литровым объемом 11,76 л. [25]. В начале формируется тренд нагружения ДВС, представим его на рисунке 1.

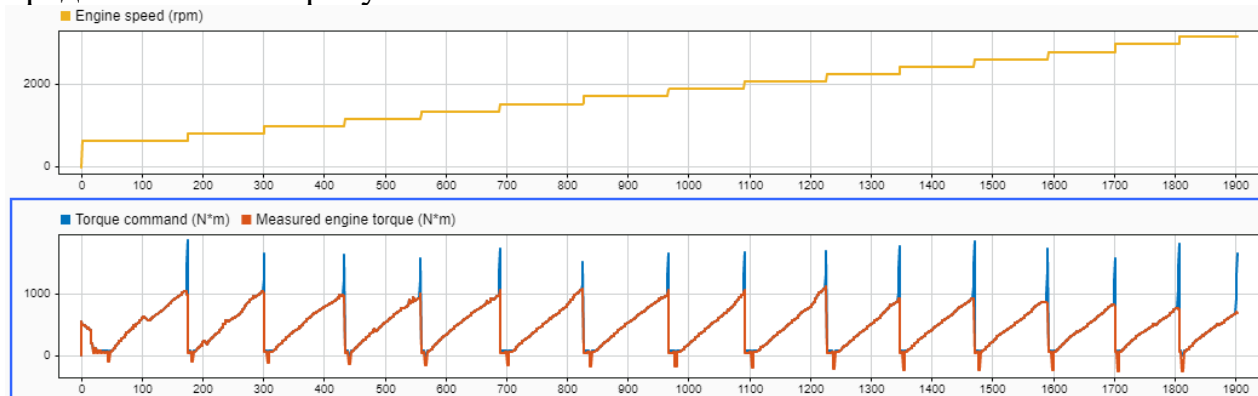


Рисунок 1 – Ступенчатый тренд нагружения двигателя автомобиля КАМАЗ 740 Евро-4 при расчете в приложении MATLAB Simulink

Как видно из рисунка 1 верхняя характеристика представляет собой ступенчатое изменение частоты вращения коленвала ДВС. Фактически временная длительность каждой ступени составляет 100...120 секунд. Нижняя характеристика показывает изменение двух параметров: программно (командой в программе MATLAB Simulink) заданного крутящего момента ДВС (Torque command), Н·м и измеренного крутящего момента ДВС (Measured engine torque), Н·м. Как видно пиковые значения крутящих моментов достигаются к концу каждого режима. Из рисунка 1 видно, что фактически уже в начале нагружения значения крутящих моментов максимальны и начинают несколько снижаться при частоте вращения коленвала ДВС 2200 мин⁻¹ и выше.

Расчет значений частоты вращения вала ротора ТКР двигателя автомобиля КАМАЗ 740 Евро-4 показывает на ее рост (рисунок 2).



Рисунок 2 – Зависимость частоты вращения вала ротора ТКР (Turboshaft speed (rpm)), мин⁻¹ двигателя автомобиля КАМАЗ 740 Евро-4 при ступенчатом тренде его нагружения

Как видно из рисунка 2, максимальное значение частоты вращения вала ротора ТКР двигателя автомобиля КАМАЗ 740 Евро-4 достигает 60000 мин^{-1} . Приведенная характеристика на рисунке 2 позволяет активно моделировать скоростной режим турбокомпрессора при его непрерывной увязке со скоростным режимом ДВС. Это дает возможность дальнейших расчетов по количеству воздуха и давлению, нагнетаемому турбокомпрессором во впускной коллектор ДВС (рисунок 3).

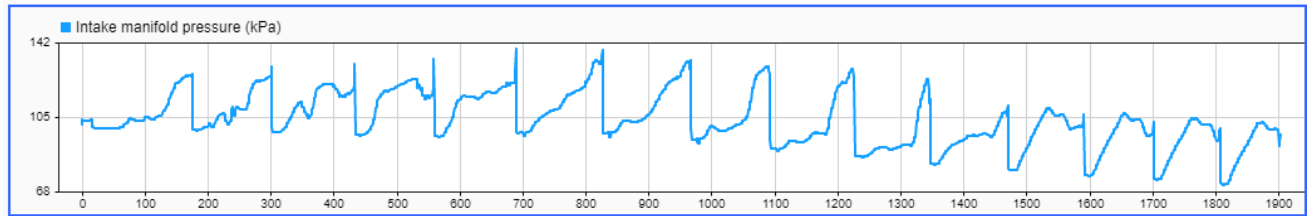


Рисунок 3 – Зависимость давления во впускном коллекторе двигателя (Intake manifold pressure (kPa)), кПа автомобиля КАМАЗ 740 Евро-4 при ступенчатом тренде его нагружения

Как видно из рисунка 3, пиковые значения давления (порядка 140 кПа) турбокомпрессор развивает при скорости вращения коленвала ДВС $1500...1700 \text{ мин}^{-1}$. После чего наблюдается тренд снижения давления во впускном коллекторе ниже 105 кПа.

В завершении моделирования следует комплексный удельный показатель эффективности работы ДВС – удельный расход топлива двигателя (BSFC ($\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{hr})$)), г/кВт·ч. Искомая зависимость представлена на рисунке 4.

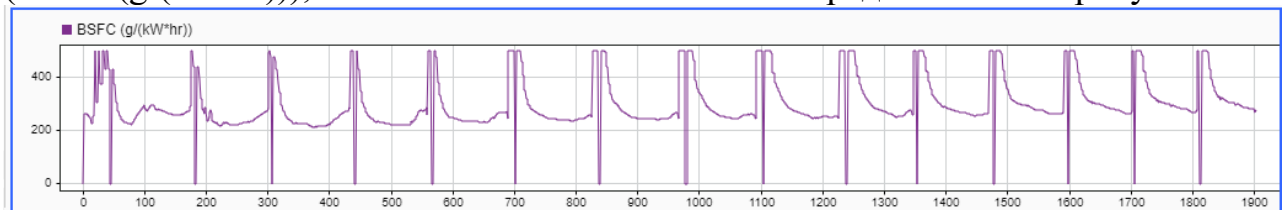


Рисунок 4 – Зависимость удельного расхода топлива двигателя (BSFC ($\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{hr})$)), г/кВт·ч автомобиля КАМАЗ 740 Евро-4 при ступенчатом тренде его нагружения

Как видно из рисунка 4, в начале циклов нагружения удельный расход топлива имеет значительные величины. Однако к концу циклов нагружения значения удельного расхода топлива двигателя, г/кВт·ч заметно снижаются. Так, в диапазоне частот вращения коленвала ДВС $1200...1700 \text{ мин}^{-1}$ значения удельного расхода топлива двигателя автомобиля КАМАЗ 740 Евро-4 достигают минимума – $205...210 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$. В зоне предельных значений частоты вращения коленвала ДВС удельный расход топлива весомерно повышается.

Выводы: Таким образом, проведенное моделирование в программе MATLAB Simulink позволяет получить точечные, плоские и многомерные данные. Ступенчатые циклы нагружения позволяют найти области

минимальных и максимальных значений параметров, определяющих эффективность эксплуатации двигателя автомобиля КАМАЗ 740 Евро-4.

Список литературы

1. Forecasting the Passage Time of the Queue of Highly Automated Vehicles Based on Neural Networks in the Services of Cooperative Intelligent Transport Systems / V. Shepelev, S. Aliukov, S. Zhankaziev [et al.] // Mathematics. – 2022. – Vol. 10, No. 2. – P. 282. – DOI 10.3390/math10020282. – EDN RGEZLG.
2. The Role of Reverse Logistics in the Transition to a Circular Economy: Case Study of Automotive Spare Parts Logistics / I. Makarova, K. Shubenkova, P. Buyvol [et al.] // FME Transactions. – 2021. – Vol. 49, No. 1. – P. 173-185. – DOI 10.5937/FME2101173M. – EDN PXKYDE.
3. Gritsenko, A. V. Diagnostics of the fuel supply system of auto ICEs by the test method / A. V. Gritsenko, V. D. Shepelev, I. V. Makarova // Journal of King Saud University. Engineering Sciences. – 2021. – DOI 10.1016/j.jksues.2021.03.008. – EDN RXLLVJ.
4. Совершенствование технологии и средств выполнения зерноуборочных процессов в сельском хозяйстве / С. Д. Шепелев, А. М. Плаксин, А. В. Гриценко [и др.]; Южно-Уральский государственный аграрный университет, Институт агроинженерии. – Челябинск: Южно-Уральский государственный аграрный университет, 2018. – 256 с. – ISBN 978-5-88156-809-2. – EDN YNNUZF.
5. Взаимосвязь показателей, определяющих уровень технико-технологической оснащенности процессов в растениеводстве / А. М. Плаксин, И. Ганиев, А. В. Гриценко, К. В. Глемба // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 12(99). – С. 194-199. – EDN THAMWJ.
6. Снижение токсичности отработавших газов дизельного двигателя путем отключения части его цилиндров / В. Н. Кожанов, А. А. Петелин, А. В. Гриценко, В. Д. Шепелев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 34-44. – DOI 10.14529/engin180204. – EDN XREQWL.
7. Патент № 2474805 С1 Российская Федерация, МПК G01M 15/04. Способ диагностирования выпускного тракта поршневых двигателей внутреннего сгорания: № 2011139288/06: заявл. 26.09.2011; опубл. 10.02.2013 / С. С. Куков, А. В. Гриценко, К. А. Цыганов, А. В. Горбунов. – EDN XNXMZХ.
8. Плаксин, А. М. Система смазки турбокомпрессора с электронным управлением / А. М. Плаксин, А. Ю. Бурцев, А. В. Гриценко // АПК России. – 2015. – Т. 73. – С. 90-98. – EDN SKCKED.
9. Environmental Control and Test Dynamic Control of the Engine Output Parameters / A. Gritsenko, V. Shepelev, G. Salimonenko [et al.] // FME Transactions. – 2020. – Vol. 48, No. 4. – P. 889-898. – DOI 10.5937/fme2004889G. – EDN YHIYOU.
10. Бурцев, А. Ю. Повышение эксплуатационной надежности турбокомпрессоров дизелей тракторов / А. Ю. Бурцев, А. М. Плаксин, А. В. Гри-

ценко // Достижения науки - агропромышленному производству: МАТЕРИАЛЫ LIV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Челябинск, 29–31 января 2015 года / Под редакцией П.Г. Свечникова. Том II. – Челябинск: Челябинская государственная агроинженерная академия, 2015. – С. 27-33. – EDN TVGLST.

11. Способ и стенд для диагностирования турбокомпрессора ТКР-11 / А. В. Гриценко, А. М. Плаксин, И. Ганиев [и др.] // Вестник Таджикского технического университета. – 2014. – № 4(28). – С. 92-97. – EDN TYWIAL.

12. Гриценко, А. В. Контроль расхода масла современных турбокомпрессоров автомобиля КАМАЗ / А. В. Гриценко, А. Ю. Бурцев, И. Х. Гималтдинов // Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса: Научные труды Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Мудрова П.Г., Казань, 28–29 октября 2021 года. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2021. – С. 137-144. – EDN CTLGOB.

13. Методы снижения токсичности и экологичность современных автомобилей / Н. Н. Русакова, В. Е. Уланов, А. В. Гриценко, И. Х. Гималтдинов // Научное сопровождение технологий агропромышленного комплекса: теория, практика, инновации: Научные труды 2-ой Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Ю.И. Матяшина, Казань, 24–25 марта 2022 года. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2022. – С. 285-291. – EDN BRNVAB.

14. Gritsenko, A. V. Development of Measures to Prevent Surging Turbochargers of Cars / A. V. Gritsenko, V. D. Shepelev, A. V. Samartseva // Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018 : Lecture notes in mechanical engineering, Москва, 15–18 мая 2018 года. – Москва: Springer International Publishing, 2019. – P. 861-871. – DOI 10.1007/978-3-319-95630-5_90. – EDN YTKKVV.

15. Индивидуальный газоанализ и его особенности при тестовом диагностировании / А. В. Гриценко, Г. Н. Салимоненко, И. Х. Гималтдинов [и др.] // АПК России. – 2021. – Т. 28, № 1. – С. 28-38. – EDN BVAPDV.

16. Бурцев, А. Ю. Повышение эксплуатационной надежности турбокомпрессоров дизелей тракторов / А. Ю. Бурцев, А. М. Плаксин, А. В. Гриценко // АПК России. – 2015. – Т. 72, № 1. – С. 23-25. – EDN TTUAVF.

17. Parameters of internal combustion engine efficiency while introducing additives in the oil / A. Gritsenko, E. Zadorozhnaya, V. Shepelev, I. Gimaltdinov // Tribology in Industry. – 2019. – Vol. 41, No. 4. – P. 592-603. – DOI 10.24874/ti.2019.41.04.11. – EDN VBRZHC.

18. Gritsenko, A. V. A study of the environmental qualities of diesel engines and their efficiency when a portion of their cylinders are deactivated in small-load modes / A. V. Gritsenko, K. V. Glemba, A. A. Petelin // Journal of King Saud University. Engineering Sciences. – 2021. – Vol. 33, No. 1. – P. 70-79. – DOI 10.1016/j.jksues.2019.12.001. – EDN FICNSG.

19. Гриценко, А. В. Исследования выбега ротора турбокомпрессора ТКР-11 / А. В. Гриценко, А. М. Плаксин, А. Ю. Бурцев // Агропродовольственная политика России. – 2015. – № 1(37). – С. 52-55. – EDN TNZBZL.

20. Гриценко, А. В. Метод диагностирования газораспределительного механизма по параметрам расхода воздуха и фаз газораспределения ДВС / А. В. Гриценко // Вестник Челябинской государственной агроинженерной академии. – 2012. – Т. 62. – С. 32-34. – EDN PETYUH.

21. Повышение надежности турбокомпрессоров автотракторной техники применением гидроаккумулятора / А. М. Плаксин, А. В. Гриценко, А. Ю. Бурцев [и др.] // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 8(95). – С. 176-180. – EDN SNFCPB.

22. Гриценко, А. В. Концепция развития методов и средств диагностирования автомобилей / А. В. Гриценко // Достижения науки - агропромышленному производству: ЛП Международная научно-техническая конференция, Челябинск, 24–26 января 2013 года. Том 3. – Челябинск: Челябинская государственная агроинженерная академия, 2013. – С. 42-49. – EDN UGUHIX.

23. Гриценко, А. В. Контроль выбега ротора современных турбокомпрессоров автомобиля КАМАЗ / А. В. Гриценко, А. Ю. Бурцев, И. Х. Гималтдинов // Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса: Научные труды Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Мудрова П.Г., Казань, 28–29 октября 2021 года. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2021. – С. 128-136. – EDN KGQMKK.

24. The advancement of the methods of vibro-acoustic control of the ICE gas distribution mechanism / A. Gritsenko, V. Shepelev, E. Zadorozhnaya [et al.] // FME Transactions. – 2020. – Vol. 48, No. 1. – P. 127-136. – DOI 10.5937/fmet2001127G. – EDN IXHMGЕ.

25. Повышение долговечности работы турбокомпрессора дизелей применением автономного смазочно-тормозного устройства / А. М. Плаксин, О. Н. Ларин, А. В. Гриценко [и др.] // Инновационный транспорт. – 2016. – № 1(19). – С. 53-57. – DOI 10.20291/2311-164X-2016-1-53-57. – EDN VSUPTB.