

УДК 621.43.001.42

## **РАССМОТРЕНИЕ ВОПРОСОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ В РАЗЛИЧНЫХ ПРОГРАММНЫХ ПРО- ДУКТАХ**

**Патов А. Г.<sup>1</sup>, Сажаев О. Г.<sup>1</sup>, Бурцев А. Ю.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>аспирант, ЮУрГАУ, г. Челябинск;

<sup>1</sup>аспирант, ЮУрГАУ, г. Челябинск;

<sup>2</sup>к.т.н., доцент, филиал КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева, г. Белово.

**Аннотация:** В статье приведен анализ нескольких моделей, в среде MATLAB Simulink. Модели позволяют наглядно увидеть изменение параметров процессов турбокомпрессора и скорректировать их в сторону улучшения.

**Ключевые слова:** система турбонаддува, турбокомпрессор, моделирование, анализ, программа, контроль.

**Abstract:** The article presents an analysis of several models in the MATLAB Simulink environment. The models allow one to visually see the change in the parameters of the turbocharger processes and adjust them for improvement.

**Keywords:** turbocharging system, turbocharger, modeling, analysis, program, control.

Актуальность вопроса. На сегодня актуальным направлением машиностроения выступает даунсайсинг [1, 2]. Даунсайсинг это комплекс технических решений, направленный на обеспечение высоких мощностных показателей ДВС при минимизации размеров [3, 4]. Его центральной основой является установка системы турбонаддува [5, 6]. Турбонаддув заметно повышает мощность ДВС и косвенно влияет на экологические и экономические показатели автотракторных средств [7, 8, 9]. Вместе с тем, система турбонаддува существенно усложняет тепловой и нагрузочные режимы ДВС [10, 11]. Для надежной работы ДВС с турбонаддувом применяется большое количество разработок, материалов и технических решений [12, 13, 14]. Модернизация ДВС путем установки турбонаддува и различных дополнительных систем требует проведения комплекса мероприятий [15, 16]. Но на первичном этапе выступает процесс моделирования [17, 18]. На сегодняшний день известно большое разнообразие программ для целей моделирования систем турбонаддува совместно с ДВС [19, 20]. Рассмотрим несколько рабочих моделей в программе MATLAB Simulink [21, 22]. Разберем преимущества и недостатки моделей с точки зрения качества моделирования рабочих процессов турбокомпрессора [23, 24]. Основной акцент все же делая на системе смазки подшипников турбокомпрессора [25]. Целью исследования является проведение анализа программных продуктов для моделирования систем турбонаддува.

Материалы и методы. Проведем краткий анализ программных продуктов и используемых встроенных блоков. Рассмотрение начнем с программного продукта MATLAB, с использованием надстройки Simulink. Так, например, на рисунке 1 представлена модель системы смазки турбокомпрессора.

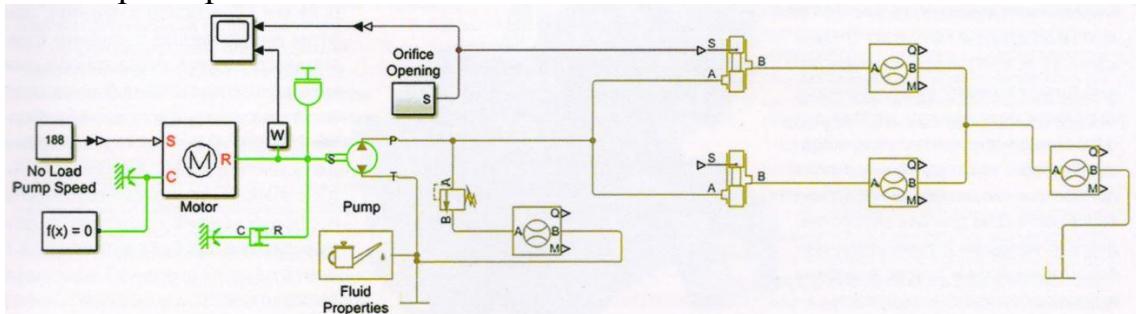


Рисунок 1 – Модель работы упрощенной масляной магистрали ТКР

Показанная на рисунке 1 модель представляет собой классическую упрощенную систему смазки автотракторных ДВС, главным образом состоящую из узла привода масляного насоса, датчика контроля частоты вращения привода масляного насоса, редукционного клапана системы смазки, датчика контроля количества масла, уходящего через редукционный клапан. Кроме того на схеме модели представлены: масляный картер «мокрой» системы смазки, элемент настройки свойств рабочего тела (масло SAE 5W-30), модуль имитации суммарных общих утечек через элементы смазки ДВС, сенсорный узел контроля параметров расхода масла через ДВС, радиальный подшипник с возможностью имитации рабочего зазора радиального подшипника с подключенным к нему датчиком контроля расхода масла через радиальный подшипник ТКР, коммуникационные связи между элементами.

Особенностью функционирования данной модели является значительное упрощение двигателя, который заменяется электродвигателем привода масляного насоса, позволяющего формировать необходимые параметры начальной подачи масла. Утечка масла через многочисленные элементы ДВС заменяется на общую суммарную утечку через имитационный блок, недостатком которого является необходимость непрерывного вмешательства и корректировки утечек масла через элементы ДВС, которые зависят от режима работы ДВС (связанные также с частотой вращения привода масляного насоса).

Основным недостатком модели является упрощенное изменение радиального зазора в подшипнике ТКР, что не отражает реальные процессы, сопровождающие работу турбокомпрессора в эксплуатации. Описание характеристик работающего масла упрощается путем задания исходной температуры поступающего масла, без привязки к реальным температурным процессам, сопровождающим работу турбокомпрессора. Не учитывается кратность циркуляции масла, особенности изменения его динамических характеристик и неравномерность его подачи. Не учитывается частота вала

ротора ТКР, ее изменение и нестационарное воздействие на расход масла. Модель на рисунке 1 не учитывает переходные и нестационарные процессы.

Преимуществом модели (рисунок 1) является простота обеспечения стационарных режимов работы ДВС и ТКР, отсутствие необходимости кинематической привязки отдельных элементов ДВС и ТКР и масляного насоса между собой, исключение динамичности и нестационарности процессов. Значительно упрощается подход к изменению характеристик работающего масла. В обобщенной модели значительно утрированы и упрощены гидравлические связи отдельных элементов между собой, они заменены суммарными гидравлическими сопротивлениями обобщенной системы смазки. Кроме того, радиальные утечки через подшипник ТКР рассматриваются в стационарном режиме без учета переходных явлений и эксцентризитета. В качестве всеобъемлющей модели ее использование исключается, требуются более приближенные к реальности модели.

В современной версии представлена рабочая модель турбокомпрессора в MATLAB Simulink (рисунок 2).

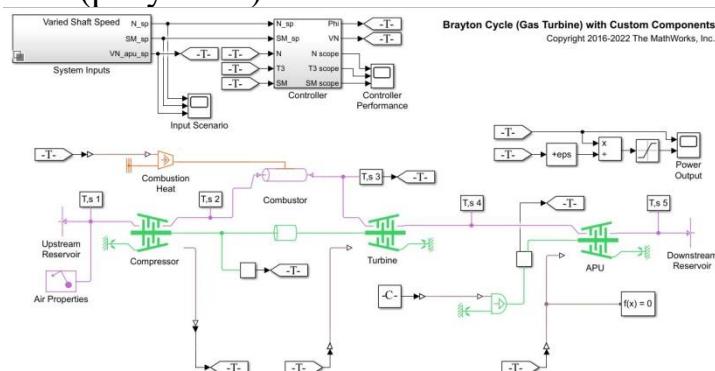


Рисунок 2 – Модель турбокомпрессора с имитацией рабочих процессов

Основой разработки, представленной на рисунке 2 модели, является имитация рабочих процессов полноразмерной силовой установки рабочей турбины, все процессы которой организованы по типовому циклу Брайтона. Типовой цикл Брайтона представляет собой модель процесса в виде термодинамического цикла реально работающей турбины с обратной связью. Цикл Брайтона, реализованный моделью (рисунок 2) представляет собой комплекс упрощенных процессов, близко имитирующих работу реальной турбины.

Преимуществами являются разветвленность модели, существенное разделение дискретизации объектов, расширенные функции управления и регулирования, значительное количество встроенных датчиков контроля, возможность отображения осцилограмм изменяющихся процессов.

Недостатками является отсутствие масляного контура системы смазки ТКР и ДВС, нет поступления отработавших газов. В данной модели невозможен контроль разгонных и выбеговых процессов. Исключена возможность теплового контроля подшипника ТКР и движущегося в нем масла, невозможно изучение влияния попадания абразивных частиц на

систему ТКР и изменения сечения каналов вследствие осмоления, перегрева, отсутствуют реальные элементы воздухоподачи с изменяющимися условиями.

Выводы: Таким образом, проведенный анализ моделей позволил выявить их недостатки, заключающиеся в ограниченности варьируемых режимов, невозможности моделирования нестационарных режимов. Приведенные модели, реализованные в среде MATLAB Simulink могут приближенно использоваться для моделирования разнообразных режимных ситуаций при работе ТКР.

#### 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.]; ЮУрГАУ, Институт агронженерии. – 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 XNXMZK.
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. Гриценко // Достижения науки - агропромышленному производству: МАТЕРИАЛЫ LIV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Челябинск, 29–31 января 2015 года / Под редакцией П.Г. Свечникова. Том II. – Челябинск: ЧГАА, 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: Казанский ГАУ, 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: Казанский ГАУ, 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. – Р. 861-871. – DOI 10.1007/978-3-319-95630-5\_90. – EDN YTAKVV.
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

versity. 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 агротехнической 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: ЛII Международная научно-техническая конференция, Челябинск, 24–26 января 2013 года. Том 3. – Челябинск: ЧГАА, 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. Гималдинов // 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: Казанский ГАУ, 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 IXHMGE.

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.