

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Роднов К.В.¹, Малозёмов Г.А.²

¹ООО «Челябинский тракторный завод – УРАЛТРАК», Челябинск;

²Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), Челябинск

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, математическая модель, имитационная модель, цифровой двойник, изнашивание, накопление повреждений, ресурс.

Аннотация. Выполнен обзор и анализ исследований по теме имитационного моделирования процессов изнашивания и накопления повреждений поршневых двигателей внутреннего сгорания. Показано, что в настоящее время не существует методов имитационного моделирования, реализованных в виде программного обеспечения и позволяющих с достаточной для решения инженерных задач достоверностью и приемлемой трудоемкостью, прогнозировать ресурс и динамику изменения показателей поршневых двигателей в ходе эксплуатации. Для решения обозначенных проблем обосновано применение подхода, основанного на методологии ускоренных испытаний на надежность.

PROBLEMS AND PROSPECTS OF RECIPROCATING ENGINE LIFE TIME PREDICTION USING SIMULATION METHODS

Rodnov K.V.¹, Malozemov G.A.²

¹LLC «Chelyabinsk tractor plant – URALTRAK», Chelyabinsk;

²South Ural state university (National research university), Chelyabinsk

Keywords: internal combustion engine, mathematical model, simulation model, digital twin, wear, damage accumulation, life time.

Abstract. A review and analysis of studies on the topic of simulation modeling of wear and damage processes in reciprocating internal combustion engines is carried out. It is shown that at present there are no simulation methods implemented in the form of software that allow predicting the resource and the dynamics of changes in the reciprocating engines performance during operation with sufficient reliability and acceptable labor intensity for solving engineering problems. To solve this problems, the application of an approach based on the accelerated reliability tests methodology is justified.

Одним из актуальных направлений развития мировой экономики является всё более широкое внедрение технологии цифровых двойников. Согласно исследованиям компании Gartner [1], в мировой экономике 13% организаций уже используют цифровые двойники и 62% организаций планируют это сделать. Технология цифровых двойников в отечественном двигателестроении находится в зачаточном состоянии, предлагаемые решения чаще всего представляют собой набор 3D моделей отдельных узлов и деталей, не сопряженных между собой на уровне единой математической модели в составе двойника. Большинство исследователей считают, что в основе цифрового двойника технической системы должна лежать одномерная или нульмерная имитационная модель, которая с требуемой точностью описывает процессы так, как они проходили бы в

действительности и с которой можно проводить вычислительные эксперименты для получения информации о динамике системы. В настоящее время существует ограниченное количество специализированного зарубежного программного обеспечения для имитационного моделирования поршневых двигателей, которое в той или иной мере соответствует концепции цифрового двойника. Например, это программы фирм AVL [2], Gamma Technologies [3], Siemens [4], Modelon [5], Claytex [6], которые на основании компонентного подхода позволяют создавать комплексные имитационные модели двигателей и включать в их состав детальные 3D подмодели отдельных компонентов. Имитационная модель в составе цифрового двойника должна позволять моделировать изменение показателей объекта в ходе эксплуатации, прогнозировать различные виды отказов в зависимости от режима и условий функционирования, однако в настоящее время нет программ, позволяющих это делать.

В большинстве работ, посвященных вопросам надежности, расходованию ресурса и изменению параметров в ходе эксплуатации поршневых двигателей сводится к процессу изнашивания деталей [7], то есть к постепенному изменению формы, размера, массы деталей, зазоров и т.д. Скорость изнашивания обычно определяется прямыми замерами деталей и зазоров или по динамике изменения концентрации продуктов изнашивания в смазочном масле. Из-за изнашивания деталей изменяются показатели работы двигателя – максимальная мощность, удельный расход топлива и масла и т.д. Причиной этого является изменение характеристик топливной аппаратуры и газораспределительного механизма, увеличение зазора в сопряжении «поршень – поршневые кольца – гильза цилиндра» и другие процессы. Следствием изнашивания деталей двигателя и изменения его показателей в ходе эксплуатации является параметрический отказ. Существуют эмпирические зависимости (например, М.С. Ждановского [8] или А.А. Малозёмова [9]), позволяющие оценить динамику изменения параметров двигателя вследствие изнашивания, но они не подходят для применения в составе компонентных имитационных моделей. Более сложные модели, например, J. Gonera [10] или С.А. Загайко [11], позволяют определить абсолютные величины износов и, на основе этих данных, изменение показателей двигателя.

В основе большинства математических модели изнашивания лежит гипотеза J.F. Archard [12], предполагающая, что объёмный износ равен произведению номинальной площади на сближение поверхностей пары трения. В эту зависимость коэффициент трения не входит в явном виде, его можно выразить через силу трения (по Амонтону). Соответственно, задача прогнозирования износа сводится к определению силы (момента) трения. Силы трения зависят от вязкости масла и, соответственно от его температуры. В большинстве работ (S.K. Chen [13], С.М. Taylor [14], D.L. Tang [15] и др.) уравнения для оценки сил трения предназначены для моделирования номинальных режимов с постоянной температурой и вязкостью масла, поэтому они не подходят для создания цифровых двойников поршневых двигателей, т.к. не учитывают неявные термодинамические связи. Феноменологические зависимости момента трения в отдельных компонентах двигателя от различных факторов, в том числе от температуры масла, предложены в работах J. Shayler, D.

Leong, M. Murphy [16], K.J. Patton, R.G. Nitschke, J.B. Heywood [17]. Их недостаток – они не разрешены по углу поворота коленчатого вала. Модель, разрешенная относительно угла поворота коленчатого вала, предложена S.F. Rezeка и N.A. Hanien [18]. Программное обеспечение Gamma Technologies частично обеспечивает аналогичные возможности, но при температуре масла не ниже 20°C (что явно недостаточно для условий России), это связано с особенностями применяемой модели трения M. Schwarzmeier [19]. Другая модель трения – G. Fischer [20], является эмпирической и применяется только для двигателей с искровым воспламенением. Более сложные математические модели потерь на трение, основанные на гидродинамике смазочного слоя в трибосопряжениях, разработаны С.В. Путинцевым [21], В.Н. Прокопьевым и Ю.В. Рождественским [22], фирмами AVL (Excite), Ricardo (Engdin, Pisdyn, Ringpak) и др. Основной их недостаток в контексте создания имитационных моделей – высокая трудоёмкость.

По статистике вследствие изнашивания случается от 20 % до 65 % [7, 23] всех отказов, в то же время из-за поломок, трещин, разрушений и разрывов происходит от 35 % до 70 % отказов, поэтому при прогнозировании ресурса двигателя кроме изнашивания необходим учет накоплений механических и термических повреждений, влекущих функциональный отказ. Существует большое количество программных продуктов, позволяющих с высокой точностью прогнозировать прочностные показатели машин (ANSYS, MSC, Siemens и др.), но их трудоёмкость неприемлема для решения задач моделирования двигателя как единой комплексной системы. Более простые и менее трудоёмкие математические модели процесса расходования ресурса вследствие накопления усталостных и термических повреждений могут быть получены на основе принципа суперпозиции, усталостных моделей выработки ресурса и теории линейного суммирования повреждений [7, 24]. В большинстве моделей [25-27] скорость процесса накопления повреждений определяется суммарным воздействием инерционных сил, газовых сил, тепловых нагрузок (макротеплосмен), переменного скоростного режима (ускорений). Режим эксплуатации двигателя определяет частоту и амплитуду этих факторов.

Несмотря на относительную (относительно 3D FEM и CFD-моделей) простоту и меньшую трудоёмкость нульмерных и одномерных моделей, прямой расчет режимов реальной эксплуатации практически невозможен, т.к. «скорость» процессов цифрового двойника на несколько порядков меньше, чем «скорость» процессов реального двигателя. В реальных условиях эксплуатации изменение показателей двигателя происходит очень медленно, обычно необходимо не менее 200 часов работы, чтобы их заметить. Поэтому для экспериментального подтверждения показателей надежности часто применяют методы ускоренных испытаний (ALT – Accelerated Life Testing) [28, 29], в ходе которых, путем форсирования циклически изменяющихся влияющих факторов существенно ускоряют процессы изнашивания и накопления повреждений. Представляется целесообразным применить подобный подход при виртуальных испытаниях цифрового двойника, т.е. заменить модель реальной эксплуатации суррогатной моделью. При этом основными задачами будут: обоснование суррогатной модели

эксплуатации и корректное определение коэффициента ускорения для неё (см. работы L.M. Klyatis [30], B. Dodson и H. Schwab [31], K. Denkmayrb [32], А.С. Гишваров [33] и др.). В отличие от упомянутых работ, объектом испытаний будет являться не реальный двигатель, а его цифровой двойник.

Согласно F. Schenkelberg [34] можно выделить шесть «классических» методов ускорения при проведении ресурсных испытаний: исключение пауз между рабочими циклами; увеличение амплитуды нагрузок; заданная модель ускорения; ступенчато-стрессовый метод; метод шоковых нагрузок (например, реализация метода «термошок»); метод деградации. Все эти методы основаны, в первую очередь, на статистике и во вторую – на физике процессов. Методы, основанные на статистике, мало подходят для целей прогнозирования показателей вновь разрабатываемых или существенно модернизируемых двигателей, т.к. требуют большого объёма испытаний реальных образцов и этим самым минимизируется эффект внедрения технологии цифровых двойников. Более современными и эффективными являются методы: FMVT (Failure Mode Verification Testing) в основе которого лежит метод HALT (Highly Accelerated Life Testing) для которого была снижена частота изменения факторов [35]; FSLT (Full System Life Testing – моделирование полного жизненного цикла изделия) [36]; метод Locati, достоинством которого является возможность ограничить объём испытаний одним образцом [37]; метод Loreti – ступенчатое повышение нагрузки после каждого цикла до наступления отказа [37]. В целом, теория и методология составления и оптимизации планов ускоренных ресурсных испытаний в настоящее время хорошо разработана, однако большинство методов слишком трудоёмко и не может служить основой планов виртуальных испытаний цифровых двойников.

Б.И. Бойцовым и Е.П. Оболенским [37] было предложено генерировать выборки для компьютерной реализации методов Locati и Loreti на основе теоретического распределения предела выносливости, при этом количество виртуальных экспериментов варьируется от 7 до 1000. Этот подход основан на проведении ограниченного числа расчетных экспериментов по плану, который в наибольшей степени соответствует модели эксплуатации двигателя (другими словами, плотность распределения влияющих факторов суррогатной модели эксплуатации тождественна реальной модели) и в то же время обеспечивает требуемую достоверность при минимальной выборке.

Имитационное моделирование ускоренных испытаний позволяет относительно просто использовать такие методы ускорения, как разупрочнение, замена материалов, локальный нагрев и охлаждение, замена вида нагрузки и места её сосредоточения, замена очередности вида нагружения, увеличение дисбаланса, целенаправленная сборка, испытания в экстремальных внешних условиях и т.д.

Таким образом, проведенный анализ показал, что в настоящее время не существует методов имитационного моделирования, реализованных в виде программного обеспечения и позволяющих с достаточной для решения инженерных задач достоверностью и приемлемой трудоемкостью, прогнозировать ресурс и динамику изменения показателей поршневых

двигателей в ходе эксплуатации. Возможным направлением решения этой проблемы является применение подхода, основанного на методологии ускоренных испытаний на надежность, что является целью дальнейших исследований, проводимых совместно Южно-Уральским государственным университетом и Челябинским тракторным заводом в рамках разработки и внедрения технологии цифровых двойников поршневых двигателей.

Список литературы

1. Gartner: использование цифровых двойников становится массовым // Изд-во «Открытые системы»: [электронный ресурс]: режим доступа: <https://cio.ru/news/250219-Gartner-ispolzovanie-tsifrovyyh-dvoynikov-stanovitsya-massovym>.
2. Advanced Simulation Technologies // AVL GmbH: [электронный ресурс]: режим доступа: <https://www.avl.com/simulation>.
3. GT-SUITE – A Revolutionary MBSE Tool // Gamma Technologies LLC: [электронный ресурс]: режим доступа: <https://www.gtisoft.com/>.
4. Products for Digital Innovation // Siemens PLM Software: [электронный ресурс]: режим доступа: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/>.
5. Modelon // Modelon AB: [электронный ресурс]: режим доступа: <https://www.modelon.com/>.
6. Claytex // Claytex Services Ltd. [электронный ресурс]: режим доступа: <https://www.claytex.com/>.
7. Гимазетдинов Р.Р. Разработка методов имитационного моделирования поршневых двигателей внутреннего сгорания на основе компонентного подхода в составе когенерационных энергетических установок: дисс. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Гимазетдинов Руслан Раифович. – Челябинск: 2019. – 191 с
8. Ждановский Н.С. Режимы работы двигателей энергонасыщенных тракторов / Н.С. Ждановский, А.В. Николаенко, В.С. Шкрабак и др. –Л: Машиностроение, 1981. – 240 с.
9. Малозёмов А.А. Расчетно-экспериментальная оценка влияния уровня дефорсирования на ресурс дизеля типа В-2 / А.А. Малозёмов, А.С. Шикин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2009 – № 24. – Вып. 13. – С. 89-96.
10. Gonera J. Model for forecasting the geometry of the floor panel of a passenger car during its operation / J. Gonera, J. Napiórkowski // Maintenance and Reliability, vol. 20, no. 4. – 2018. – P. 689-695.
11. Загайко С.А. Математическое моделирование изнашивания деталей ЦПГ ДВС // Вестник УГАТУ т.17 № 3. – 2013. – С. 231-238.
12. Archard J.F. Wear theory and mechanism / J.F. Archard, M.B. Peteson, W.O. Winer // Wear control handbook. ASME. – 1980.
13. Chen S.K. Development of single cylinder compression ignition research engine / S.K. Chen, P.F. Flynn // SAE Paper 650733, 1965. – P. 750-770.
14. Taylor C.M. Engine tribology. – Amsterdam: Elsevier, 1993. – 311 p.
15. Tang D.L. A dynamic engine starting model for computer-aided control system design / D.L. Tang, M.C., M.F. Sutan // Proc. ASME Winter Annu. Conf., Advanced Automotive Technologies, vol. 13, 1989. – P. 203-222.
16. Shayler J. Contributions to engine friction during cold, low-speed running and the dependence on oil viscosity / J. Shayler, D. Leong, M. Murphy // SAE Paper 2005-01-1654, 2005. – P. 145-159.
17. Patton K.J. Development and evaluation of a friction model for spark-ignition engines / K.J. Patton, R.G. Nitschke, J.B. Heywood // SAE Paper 890836, 1989. – P. 1441-1461.
18. Rezek S.F. A new approach to evaluate instantaneous friction and its components in internal combustion engines. / S.F. Rezek, N.A. Henien // SAE Paper 840179, 1984. – P. 159-163.
19. Schwarzmeier M. Der Einfluß des Arbeitsprozeßverlaufs auf den Reibmitteldruck von Dieselmotoren // Dissertation, TU München, 1992.

20. Fischer G. Ermittlung einer Formel zur Vorausberechnung des Reibmitteldrucks von Ottomotoren // Reibmitteldruck – Ottomotor Vorhaben № 629 - Abschluss-bericht, FVV Heft 685 Frankfurt am Main 1999.
21. Путинцев С.В. Снижение механических потерь в автотракторных двигателях внутреннего сгорания: дисс. ... докт. техн. наук: 05.04.02 / Путинцев Сергей Викторович. – Москва: 1997. – 391 с.
22. Прокопьев В.Н. Пакет прикладных программ «Орбита-поршень». Версия 1.0 / В.Н. Прокопьев, Ю.В. Рождественский, Е.А. Задорожная и др. // Реестр программ для ЭВМ РосАПО № 950326 от 19.09.1995.
23. Лукинский В.С. Определение надежности автомобильных двигателей // Обзорная информация. – М: НАМИ, 1982. – 45 с.
24. Хевиленд Р. Инженерная надежность и расчёт на долговечность. – Л: Энергия, 1966. – 231с.
25. Гусятников В.А. Основы формирования циклов при ускоренных испытаниях дизелей промышленных тракторов // Тез. Всесоюзн. конф. по теории и расчёту мобильных машин и двигателей внутреннего сгорания. – Тбилиси: 1985. – С. 84-86.
26. Костин А.К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания (справочное пособие) / А.К. Костин, В.В. Ларионов, Л.И. Михайлов. – Л: Машиностроение, 1979. – 220 с.
27. Иващенко Н.А. Конструирование двигателей внутреннего сгорания / Н.А. Иващенко, А.Н. Краснокутский, Л.Л. Мягков, Н.Д. Чайнов. – М: Машиностроение, 2008. – 496 с.
28. Шикин А.С. Ускоренные испытания двигателей двойного назначения // Материалы Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах» – Том 1. – СПб: 2009. – С. 282-283.
29. Гусятников В.А. Проведение ускоренных испытаний дизелей путём увеличения амплитуд повреждающих факторов / В.А. Гусятников, С.И. Леонтьев, Г.В. Котов. // Современные проблемы кинематики и динамики ДВС. (Тез. докл. научн.-техн. конфер.). – Волгоград: 1985. – С. 61-62.
30. Klyatis L.M. Trends in development of accelerated testing for automotive and aerospace engineering. – London: Elsevier, 2020. – 347 p.
31. Dodson B. Accelerated testing: a practitioner's guide to accelerated and reliability testing / B. Dodson, H. Schwab. – Warrendale: SAE International. – 2006. – 270 p.
32. Denkmayrb K. AVL's reliability engineering process for engine development // IEEE proceedings annual reliability and maintainability symposium. – 2003. – P. 455-458.
33. Гишваров А.С. Оптимизация ускоренных испытаний на надежность и ресурс авиационных двигателей и агрегатов // Вестник УГАТУ. – 2001. – №1(3). – С. 77-90.
34. Schenkelberg F. Determine and design the best ALT. RAMS proceedings, 2012.
35. Alexander J.P. Failure mode verification testing: applying highly accelerated life testing methods to mechanical systems // SAE technical paper series 982403, 1998.
36. Intertek: [электронный ресурс]: режим доступа: www.intertek.com/AST.
37. Boitsov B.Y. Accelerated tests of determining the endurance limit as an efficient method of evaluating the accepted design and technological solutions / B.Y. Boitsov, E.P. Obolenskii // Strength of Materials. – 1983. – №15.

Сведения об авторах:

Роднов Константин Валерьевич – к.т.н., начальник управления технического контроля;
Малозёмов Георгий Андреевич – студент.