

УДК 621.432

ВСТРОЕННЫЙ КОНТРОЛЬ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Бурцев А.Ю.¹, Гриценко А.В.², Шайкемелов А.А.³

¹к.т.н., доцент кафедры «Горного дела и техносферной безопасности» филиала Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева, г. Белово.

²д.т.н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт», ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (ЮУрГУ НИУ); профессор кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности», ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет» (ЮУрГАУ), г. Челябинск.

³аспирант кафедры «Автомобильный транспорт», ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (ЮУрГУ НИУ), г. Челябинск.

Аннотация. В данной статье рассмотрены принципы эффективного контроля выходных параметров турбокомпрессора при управлении его входными параметрами. Параметры информативности, стабильности, однозначности являются основой для обеспечения правильности функционирования двигателя с турбонаддувом. Контроль ошибки контроля и скорости изменения параметров обеспечивают адекватность получаемых данных и точность корректирующих действий.

Ключевые слова: двигатель, турбокомпрессор, газотурбинный наддув, контроль, входные параметры, выходные параметры, эффективность.

Актуальность исследования. Современная автотракторная техника активно оснащается газотурбинным наддувом [1, 2, 3]. Турбонаддув, без значительных переделок двигателя, позволяет на 10...50% увеличить выходную мощность [4, 5, 6]. Кроме того, оснащение газотурбинным наддувом заметно снижает выбросы отработавших газов [7, 8, 9]. Вместе с тем, появляется большое количество элементов и узлов, требующих прецизионного подхода к управлению их функционированием, обслуживанием и контролем [10, 11]. Контролю могут быть подвержены, как входные, так и выходные параметры газотурбинного наддува [12, 13, 14]. При этом, именно входные параметры процесса смазки подшипников турбокомпрессора (ТКР) будут являться управляемые, на основе результатов оценки выходных сигналов [15, 16]. С учетом сказанного, **целью исследования** является разработка методического подхода к анализу эффективности функционирования и контроля турбокомпрессоров сельскохозяйственных машин.

Материалы и методы. Эффективность функционирования двигателя с газотурбинным наддувом может быть оценена на основе контроля правильности функционирования. Правильность функционирования характеризуется выполнением основных функций ТКР и ДВС в целом [17, 18]. При этом правильность функционирования узла или элемента

автотракторного средства определяется рядом выходных величин частных и обобщенных [19].

В практике эксплуатации при разработке встроенных систем контроля технического состояния ТКР часто используется критерий – информативность оценочного параметра [20, 21]. Информативность находится из следующего статистического выражения:

$$I(y) = \frac{|\bar{y}_1 - \bar{y}_2|}{\sigma_1 + \sigma_2}, \quad (1)$$

где \bar{y}_1 – средняя величина диагностического признака при встроенном контроле исправного ТКР; \bar{y}_2 – средняя величина диагностического признака при встроенном контроле неисправного ТКР; σ_1 – среднее квадратическое отклонение величины диагностического признака при встроенном контроле исправного ТКР; σ_2 – среднее квадратическое отклонение величины диагностического признака при встроенном контроле неисправного ТКР.

Информативность диагностического признака показывает насколько разница средних величин диагностического параметра отличается от суммы средних квадратических величин диагностического параметра при рассмотрении их отношения. Так слишком большие значения средних квадратических величин (разброс от измерения к измерению) приводят к уменьшению информативности. Низкая информативность указывает на несущественные корреляционные связи диагностических параметров с реальным техническим состоянием элементов ТКР. Повысить информативность можно за счет использования средств контроля с низкой величиной погрешности и ошибки измерения.

Кроме того, при оценке технического состояния турбокомпрессора необходимо использовать параметрический контроль [22, 23].

При оценке выбранного контрольного параметра важным критерием является однозначность при $x_n \leq x \leq x_n$:

$$K_o = dS/dx \neq 0, \quad (2)$$

где K_o – параметр, характеризующий однозначность поведения контролируемого параметра; dS – приращение контролируемого параметра; dx – величина, относительно которой рассматривается изменение контролируемого параметра.

На всем протяжении изменения диагностического параметра не должно быть перегибов и экстремумов. Если имеется хотя бы один экстремум или функция сильно изменяет наклон, то процесс контроля значительно затруднен в этих зонах нелинейности и нестабильности [24, 25].

Кроме того, при параметрическом контроле очень важна стабильность при многократном контроле оцениваемого параметра ТКР:

$$K_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [S_x - \bar{S}_x]^2}{n-1}}, \quad (3)$$

где K_c – критерий, характеризующий стабильность величины контролируемого параметра; S_x – значение единичного измерения оценочного параметра при контроле ТКР; \bar{S}_x – среднее значение оценочного параметра при

контроле ТКР; n – количество измерений оценочного параметра при контроле ТКР.

Стабильность принято оценивать величиной отклонения от среднего значения контролируемого параметра ТКР.

При проведении параметрического контроля важную информацию можно получить, используя информационные характеристики встроенной экспертной системы. Из всех характеристик важным условием является непрерывный контроль выходного параметра и величины среднеквадратической ошибки σ допускаемой при контроле данного параметра встроенной системой диагностирования. Причем уровень колебания ошибки при последовательных измерениях можно оценить по критерию динамичности, который выражается формулой:

$$\Delta = \frac{3\sigma}{t}, \quad (4)$$

где Δ – критерий динамичности при контроле выходных параметров ТКР; σ – величина среднеквадратической ошибки допускаемой при контроле данного параметра встроенной системой диагностирования; t – период времени, в течении которого наблюдается контрольный параметр или их группа, для оценки критерия динамичности экспертной системы.

В процессе контроля технического состояния ТКР анализируемые параметры можно разделить на группы, среди которых выделяются: сигнальные, статические, динамические, быстроменяющиеся. Сигнальные параметры являются самыми простыми с точки зрения регистрации, обработки и использования в практике технического контроля.

Сигнальные параметры при осуществлении встроенного контроля ЭБУ можно описать условием:

$$V = \begin{cases} \infty & \text{при осуществлении процесса контроля;} \\ 0 & \text{на временных участках, когда контроль не нужен,} \end{cases} \quad (5)$$

где V – скорость изменения оценочного параметра встроенной системой контроля ТКР.

При измерениях также присутствуют малоизменяемые параметры, которые называют статическими. Для них запишем условие в виде:

$$V_{max} \leq \Delta, \quad (6)$$

где V_{max} – максимальная скорость изменения оценочного параметра встроенной системой контроля ТКР.

При измерении статических параметров важным условием является сопоставимость варьирования скорости изменения оценочного параметра с критерием динамичности. Из представленного условия (6) видно, что скорость изменения оценочного параметра при встроенном контроле технического состояния ТКР должна быть меньше критерия динамичности или равна ему. Т.е. скорость изменения оценочного параметра должна быть намного меньше тройного значения среднеквадратической ошибки 3σ , допускаемой при контроле данного параметра встроенной системой диагностирования за выбранный оценочный диапазон времени. Простота контроля статического

параметра заключается в его фактической неизменности за выбранный промежуток времени контроля.

Существенную сложность для встроенного контроля представляют собой динамические параметры. Их контроль затрудняется высокими скоростями изменения и непрерывностью наблюдения. Условие для адекватной оценки динамических параметров можно записать в следующем виде:

$$v \cdot \Delta \cdot t > V_{max} > \Delta, \quad (7)$$

где v – наибольшая частота опроса оценочного параметра при использовании встроенной системы контроля ТКР.

Наибольшая частота опроса оценочного параметра определяется из выражения:

$$v = 1/\Delta t_i, \quad (8)$$

где Δt_i – минимальные интервальные временные этапы в пределах которых производится оценка выходного параметра ТКР.

Минимальные интервальные временные этапы Δt_i выбираются исходя из того, чтобы дискретность ЭБУ позволяла оцифровать величину параметра и произвести необходимую оценку (сравнение, коррекцию, адаптивную подстройку, изменение, расчет и построение функциональной связи).

Анализ выражения (8) показывает, что максимальная скорость изменения выходного параметра должна быть меньше величины $v \cdot \Delta \cdot t$. Т.е. адекватное условие использования динамических параметров в процессе определения технического состояния ТКР состоит в разрешающей возможности по частоте опроса параметров. ЭБУ должен позволять с весомым запасом оценивать единичные значения выходных параметров без сбоев по частоте оцифровки. Т.к. количество входных каналов ЭБУ может составлять несколько десятков и параллельный контроль большого количества параметров уменьшает частоту опроса, то появляется условие ограничения по числу каналов ЭБУ при контроле динамических параметров.

Самым высоким уровнем выходного контроля является оценка быстропеременных процессов. Для них характерна высокая скорость варьирования выходных параметров при необходимости высокочастотной оцифровки данных. Условие адекватной оценки быстропеременных процессов можно записать в следующем виде:

$$v \cdot \Delta \cdot t \leq V_{max}, \quad (9)$$

Характерной особенностью быстроизменяющихся процессов является высокая скорость изменения на грани предела возможной оцифровки. Так изменение выходного параметра между двумя соседними точками может заметно превысить 3σ (тройной величины среднеквадратической ошибки). При контроле быстропеременных процессов предъявляются максимальные требования к измерительной встроенной системе (ЭБУ, каналов передачи данных, АЦП и т.д.). В случае ее перегруженности, ЭБУ не сможет произвести адекватную оценку по скорости процесса, в итоге на отдельных режимах возможны сбои и срывы измерительных процессов встроенных средств контроля.

Выводы. Анализ современного состояния технического уровня контроля турбокомпрессоров показывает на необходимость разработки новой системы. Данная система включает в себя элементы и узлы встроенного контроля правильности функционирования турбокомпрессора. Однако, для надежной работы системы необходимо выработать методические подходы, что выполнено в данной статье. Анализ эффективности функционирования и непрерывный контроль турбокомпрессоров сельскохозяйственных машин позволяет обеспечивать высокую надежность в течении срока службы двигателя.

Список литературы:

1. Обоснование возможности диагностирования подшипникового узла турбокомпрессора по расходным характеристикам в среде MATLAB / И. И. Курбаков, А. П. Иншаков, М. С. Курбакова, Г. С. Гребенцов // Техника и оборудование для села. 2023. № 9(315). С. 31-35. DOI 10.33267/2072-9642-2023-9-31-35. EDN ZORSRC.
2. Шакаматов, Р. Р. Анализ системы технического сервиса сельскохозяйственной техники в Германии / Р. Р. Шакаматов, А. В. Старунов // Наука: научно-производственный журнал. 2020. № 4. С. 104-108.
3. Старунов, А. В. Современное состояние организации технического сервиса в АПК на примере Челябинской области / А. В. Старунов, И. Н. Старунова // Наука: научно-производственный журнал. 2021. № 1. С. 102-106.
4. Скрыбин, В. А. Технология ремонта турбокомпрессоров / В. А. Скрыбин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 8. С. 9-19. DOI 10.31044/1684-2561-2022-0-8-9-19.
5. Ипатов, А. Г. Повышение эффективности работы турбокомпрессора модификацией подшипниковых сопряжений / А. Г. Ипатов, А. Г. Иванов, А. В. Малинин // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 3(71). С. 59-63.
6. Галиев, И. Г. Усовершенствование системы смазки турбокомпрессора дизельного двигателя / И. Г. Галиев, А. Т. Кулаков, А. Р. Галимов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2021. № 4(74). С. 256-261. DOI 10.34771/UZCEPU.2021.4.74.053.
7. Галиев, И. Г. Обоснование параметра работоспособности турбокомпрессора / И. Г. Галиев, А. Т. Кулаков, А. Р. Галимов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2021. № 2(72). С. 251-256. DOI 10.34771/UZCEPU.2021.72.2.048.
8. Ipatov, A. G. Modification of the Bearing Interfaces of a TKR7C-6 Turbocharger / A. G. Ipatov, A. G. Ivanov, E. V. Kharanzhevskii // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49. No. 6. P. 545-549. DOI 10.3103/S1052618820060047.
9. Определение вероятности отказов агрегатов наддува двигателя КАМАЗ - 740.63.400 / Н. И. Мошкин, П. А. Болоев, Д. Ж. Самбилов, С. С. Бадмаев // Вестник ВСГУТУ. 2018. № 3(70). С. 37-42.

10. 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.
11. Test diagnostics of engine systems in passenger cars / A. Gritsenko, V. Shepelev, E. Zadorozhnaya, K. Shubenkova // FME Transactions. – 2020. – Vol. 48, No. 1. – P. 46-52. – DOI 10.5937/fmet2001046G. – EDN SGRUWJ.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Производственный потенциал сельского хозяйства: этапы развития, состояние, проблемы модернизации / А. М. Плаксин, А. В. Гриценко, М. В. Запечалов, Н. В. Костюченков. – Челябинск: ЮУрГАУ, 2018. – 292 с. – ISBN 978-5-88156-798-9. – EDN XWKBRJ.
16. 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.
17. Технология и методы диагностирования топливных насосов: учебное пособие / А. М. Плаксин, А. В. Гриценко, А. В. Старунов [и др.]. – Челябинск: ЮУрГАУ, 2022. – 100 с. – ISBN 978-5-88156-898-6.
18. Куков, С. С. Диагностирование коренных подшипников кривошипно-шатунного механизма по параметрам давления в центральной масляной магистрали / С. С. Куков, А. В. Гриценко // Вестник КрасГАУ. – 2009. – № 3(30). – С. 143-147.
19. Куков, С. С. Диагностирование коренных подшипников коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания / С. С. Куков, А. В. Гриценко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 3. – С. 27-28.
20. Куков, С. С. Диагностирование системы смазки двигателя внутреннего сгорания / С. С. Куков, А. В. Гриценко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 1. – С. 33-34.
21. 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.

22. 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.

23. 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 CTLG0B.

24. Гриценко, А. В. Диагностирование подшипников кривошипно-шатунного механизма по параметрам давления в центральной масляной магистрали / А. В. Гриценко, С. С. Куков // Достижения науки - агропромышленному производству: Материалы XLVIII Международной научно-технической конференции, Челябинск, 29–31 января 2009 года. Том 2. – Челябинск: ЧГАУ, 2009. – С. 9-15.

25. 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.