

А.П. Миллер

Пермский государственный аграрно-технологический университет
имени академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ СТРОИТЕЛЬНЫХ И ДОРОЖНЫХ МАШИН

Производственная эксплуатация строительных и дорожных машин происходит в условиях неблагоприятного воздействия внешних факторов, к которым можно отнести низкие температуры, высокие нагрузки, атмосферные осадки. В таких условиях большое значение приобретает обеспечение надежной работы гидравлических систем, так как без их функционирования большинство машин не смогут двигаться. Для оперативной оценки технического состояния гидравлических систем используют большое количество информационных сигналов, применение которых позволяет создать условия для появления новых и совершенствования традиционных методов и средств, используемых для технической диагностики, осуществить внедрение технического обслуживания по фактическому состоянию.

В статье представлен анализ публикаций научных статей, посвященных диагностированию гидравлических систем. Показано, что диагностический сигнал в виде изменения температуры, давления рабочей жидкости дает возможность охарактеризовать контролируемый параметр одним дискретным значением, что позволяет установить факт изменения в техническом состоянии гидросистемы. Однако использование таких диагностических сигналов, как правило, не позволяет давать прогнозные величины изменения состояния.

Также рассмотрено влияние температурных деформаций, возникающих в элементах гидравлических машин, на их надежность при эксплуатации в условиях низких температур. На примере аксиально-поршневого и шестеренного насосов показано критическое изменение зазоров в сопрягаемых элементах.

Представленный материал позволяет сделать вывод о необходимости учета температурных деформаций в элементах гидромашин и гидроаппаратуры, а также указывает на необходимость разработать особый регламент производственной эксплуатации гидравлических систем при эксплуатации строительных и дорожных машин в условиях низких температур окружающей среды. Это позволит повысить надежность гидравлических систем без использования новых конструкционных материалов и разработки новых технологий производства гидромашин.

Ключевые слова: гидропривод, температура, аксиально-поршневой насос, надежность, гидросистема.

A.P. Miller

Perm State Agro-Technological University
named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russian Federation

INCREASING THE RELIABILITY OF HYDRAULIC SYSTEMS FOR CONSTRUCTION AND ROAD MACHINES

The industrial operation of construction and road machines takes place under conditions of adverse effects of external factors, which include low temperatures, high loads, and precipitation. In such conditions, it is of great importance to ensure the reliable operation of hydraulic systems, since without their functioning most machines will not be able to move. For a quick assessment of the technical condition of hydraulic systems, a large number of information signals are used, the use of which makes it possible to create conditions for the emergence of new and improvement of old methods and tools used for technical diagnostics, and to implement the maintenance based on the actual condition.

In the article an analysis of scientific articles devoted to the diagnostics of hydraulic systems is presented. It is shown that the diagnostic signal in the form of a change in temperature and pressure of the working fluid makes it possible to characterize the controlled parameter with one discrete value, which makes it possible to establish the fact of a change in the technical state of the hydraulic system. However, the use of such diagnostic signals, as a rule, does not allow obtaining predictive values of the state change.

In the article the effect of temperature deformations occurring in the elements of hydraulic machines on their reliability during operation at low temperatures is discussed. A critical change in the clearances in the mating elements is shown by the example of axial piston and gear pumps.

The presented material allows concluding that it is necessary to take into account temperature deformations in the elements of hydraulic machines and hydraulic equipment, and also indicates the need to develop special regulations for the

production operation of hydraulic systems when operating construction and road machines in low ambient temperatures. This will improve the reliability of hydraulic systems without the use of new construction materials and the development of new technologies for the production of hydraulic machines.

Keywords: hydraulic drive, temperature, axial piston pump, reliability, hydraulic system.

Повышение надежности гидравлических систем в целом и отдельных гидравлических машин в частности является в настоящее время актуальной темой исследований. Это определяется постоянным увеличением мощности и внедрением средств автоматики, которая не только следит за исполнением рабочими органами машины команд управления, но и контролирует отдельные процессы, проходящие в самой гидравлической системе. Усложнение архитектуры гидравлических систем строительных и дорожных машин требует использования надежных гидравлических машин и элементов гидроавтоматики. Существующие пути, позволяющие достичь требуемого, направлены на оптимизацию состава гидросистемы, учет внешних условий работы, использование современных конструкционных материалов в составе узлов гидравлических машин и снижение номинальной нагрузки.

Однако использование вышеуказанных путей решения задачи повышения надежности гидросистем в настоящее время уже не приводит к повышению надежности и увеличению их ресурса. Ввиду большой неопределенности внешних воздействий и условий работы строительных машин при конструировании узлов и агрегатов используется большой коэффициент запаса прочности, что, в свою очередь, ведет к увеличению массы и габаритов. Эффекты увеличения надежности и повышения ресурса работы, достигаемые за счет использования новых конструкционных материалов и технологий обработки, могут быть потеряны при использовании традиционных методов технического обслуживания, когда гидросистемы строительных и дорожных машин эксплуатируются до наступления отказа либо обслуживаются по установленному заводом-изготовителем регламенту. Интервалы обслуживания и набор технологических воздействий определяются статистически. Как показывает статистика отказов гидросистем строительных и дорожных машин, обслуживание и ремонт по регламенту не снижают частоту выхода их из строя. В ряде научных работ отмечается, что в результате технического обслуживания возможно снижение надежности отдельных узлов гидросистем, обусловленное формированием ранее отсутствовавших дефектов из-за осуществления технологических манипуляций при обслуживании [1–4].

Анализ научной литературы ведущих технических центров, занимающихся вопросами надежности гидравлических систем, позволяет сделать вывод, что комплексное обеспечение повышения ресурса работы возможно за счет технической диагностики в реальном времени. Это позволит оперативно изменять нагрузочные характеристики на рабочих органах и предотвращать катастрофический износ высоконагруженных элементов гидромашин.

Состояние гидросистем оценивают с помощью системы контроля, которая в самом распространенном варианте контролирует давление и температуру в отдельных точках гидросистемы. Собираемая информация не всегда дает адекватную картину состояния гидравлических машин и гидроаппаратуры, не позволяет выявить причины их выхода из строя, обнаружить дефект, который непосредственно не влиял на функционирование гидросистемы, но повышал вероятность отказа. До недавнего времени первичный диагностический анализ технического состояния гидросистем возлагался на оператора строительной машины или ремонтную бригаду. Увеличение уровней контроля и наличие большого количества информационных систем, обеспечивающих данные о состоянии отдельных узлов гидросистемы, усложняют процесс принятия решения. Это обусловлено большим объемом получаемой информации, протеканием взаимосвязанных процессов внутри гидравлической системы, быстротечностью происходящих процессов, ошибочной оценкой технического состояния.

Развитие электронных устройств в настоящее время позволяет создать автоматизированные средства технической диагностики. Внедрение в процесс диагностики теории распознавания создало условия для появления новых и совершенствования традиционных методов и средств,

используемых для технической диагностики. Необходимо осуществить переход от обслуживания и ремонта по регламенту к ремонту и обслуживанию по фактическому состоянию. По данным из различных источников, за счет внедрения средств диагностики возможно сократить трудоемкость и время ремонта более чем на 40 %, уменьшить расход используемой энергии на 4 % и увеличить коэффициент использования гидравлических систем на 12 %.

Появление различных технических и электронных средств диагностики, использующих различную природу контролируемого сигнала о состоянии объекта, с одной стороны, позволяет получить точную картину происходящего, с другой – могут формировать ложное суждение о причинно-следственной связи.

Гидравлические системы при осуществлении рабочих процессов подвергаются физическим, термическим и механическим воздействиям. В этой связи техническая диагностика гидравлических систем требует правильного выбора диагностического сигнала. Произвести оценку технического состояния гидросистемы в целом или отдельных гидравлических машин и элементов гидроаппаратуры возможно, используя возмущения (изменения показателей): механические (износ, деформация, перемещение сопрягаемых и отдельных элементов); электрические (напряжение, ток, мощность); химические (состав рабочей жидкости, кислотное и щелочное число), физические (величина давления рабочей жидкости, излучение тепловой, электромагнитной, акустической энергии).

Диагностический сигнал в виде изменения температуры, давления рабочей жидкости, присутствия или изменения количества твердых частиц в ней дает возможность охарактеризовать контролируемый параметр одним дискретным значением. Это позволяет установить факт изменения в техническом состоянии гидросистемы в настоящее время. Однако использование таких диагностических сигналов, как правило, не позволяет давать прогнозные величины изменения состояния. Некоторые исследователи для получения точной картины технического состояния элементов гидросистем с прогнозными заключениями предлагают использовать второстепенные диагностические показатели, к которым можно отнести гидродинамический шум, вибрацию, возникающие на элементах гидросистем, и скорость изменения температуры рабочей жидкости и поверхности самих гидромашин. При использовании обоснованной методики определения соотношения изменения указанных выше величин с изменением технического состояния гидросистемы они обладают большим объемом диагностической информации. При их анализе используется не дискретное значение диагностического сигнала, а целый набор показателей, который содержится в уровне определенных полос частот, соотношения между этими уровнями, в величине амплитуды, частот и начальных фазах, в соотношениях между амплитудой и частотой. Возникновение дефекта в элементах гидросистемы генерирует колебательные силы, которые возбуждают вибрацию непосредственно в узле его появления. Вибрационные волны могут без существенных потерь распространяться до точки ее диагностирования, что позволяет диагностировать изменение технического состояния гидросистемы без ее остановки и предварительной разборки.

Примером могут служить исследования [5, 6], которые показывают влияние различных факторов на надежность отдельных компонентов гидросистемы. В статье [7] представлены экспериментальные исследования воздействия давления рабочей жидкости, изменения температуры, вязкости жидкости на показатели гидросистем. Показано, что условия эксплуатации играют важную роль в обеспечении надежности отдельных гидравлических машин или гидросистемы в целом [8]. При достижении определенных пороговых значений безопасная работа и техническая надежность гидравлических систем не может быть обеспечена.

Рост значений давления, вязкости рабочей жидкости, концентрации мелких загрязнителей (твердых частиц) приводит к увеличению гидравлических сопротивлений и, как следствие этого, росту температуры.

Ряд исследователей в своих статьях показывают значимость именно изменения температуры рабочей жидкости для диагностики гидросистемы. Использование методов управления

температурой гидравлической жидкости и элементов гидравлической системы позволяет достичь увеличения ресурса работы и уменьшить риски возникновения внезапных отказов [9–14].

Показано, что надежность гидросистемы может быть увеличена не на стадии проектирования за счет использования более качественных материалов, а на стадии эксплуатации. Это обеспечивается учетом температурных деформаций, возникающих при работе гидросистемы в условиях большого температурного градиента рабочая жидкость – окружающая среда.

Анализ научной литературы показывает, что определение дискретных значений давления, вибрации, шума может указать на случившиеся факты нарушения работы элементов гидросистем. Диагностический сигнал в виде изменения скорости нагрева рабочей жидкости в отдельном узле или в гидросистеме в целом позволяет не только установить факт нарушения работоспособности, но и реализовать мероприятия, направленные на снижение катастрофических деформаций сопрягаемых элементов гидромашин или износа, вызванного внешними или внутренними факторами.

Это подтверждается исследованиями, проведенными польским исследователем из Гданьского технологического университета на примере аксиально-поршневого гидромотора [15, 16]. На основании анализа нескольких циклов нагрева поршня, достигнутых в нескольких сериях испытаний, было определено, что скорость нагрева плунжера всегда ниже или равна скорости гидростатического нагрева опорной поверхности плунжера. На рис. 1 представлены процессы нагрева плунжера и блока цилиндров, при разнице температур между поршнем и блоком цилиндров для параметров запуска: температура окружающей среды $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура рабочей жидкости $48\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость вращения блока цилиндров 1100 об./мин, давление 5 МПа.

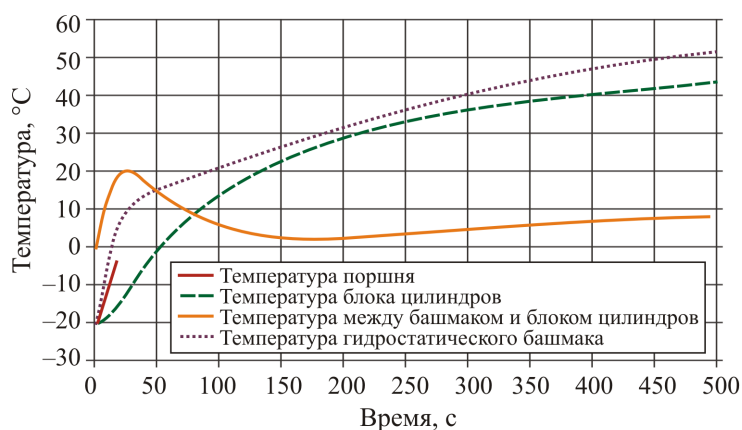


Рис. 1. Изменения температуры гидростатического башмака поршня и блока цилиндров аксиально-поршневого насоса от времени работы [15]

На основании температурных графиков, полученных в результате испытаний нагрева элементов гидравлических компонентов, возможно точно определить изменение зазора между взаимодействующими элементами.

В многопоршневых радиальных и аксиальных насосах и двигателях есть несколько мест, где потеря зазора между сопрягаемыми элементами может привести к внезапному выходу из строя. Один из них – эффективный зазор (l_e) между плунжерами, движущимися в отверстиях блока цилиндров (рис. 2).

Эффективный зазор зависит не только от монтажного зазора, но и от деформации элементов из-за воздействия давления и теплового расширения взаимодействующих элементов. Температурные деформации характерны и для шестеренных гидромашин. Установлено, что при максимальном рабочем давлении шестеренного насоса смещение вала шестерни в подшипнике и его люфт могут достигать 20–25 мкм. Это приводит к уменьшению размера зазора между вершинами зубьев шестерни и отверстием в корпусе и, как следствие, повышенному износу.

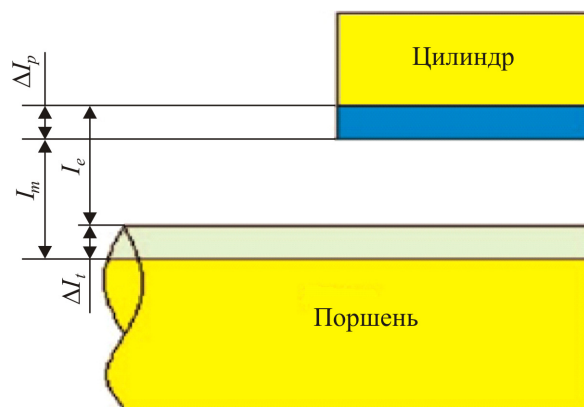


Рис. 2. Графическая интерпретация изменения эффективного зазора в многопоршневых радиальных и аксиальных насосах [15]

Представленные выше исследования позволяют сделать вывод о необходимости учета температурных деформаций в элементах гидромашин и гидроаппаратуры, а также разработки особого регламента производственной эксплуатации при использовании техники в условиях низких температур окружающей среды. Это позволит повысить надежность гидравлических систем без использования новых конструкционных материалов и разработки новых технологий производства гидромашин.

Список литературы

1. Determination of pressure losses in hydraulic pipeline systems by considering temperature and pressure / V. Savić, D. Knežević, D. Lovrec, M. Jocanović, V. Karanović // *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. – 2009. – Vol. 55, no. 4. – P. 237–243.
2. Reliability-based maintenance scheduling of hydraulic system of rotary drilling machines / Mohammad Javad Rahimdel, Mohammad Ataei, Reza Khalokakaei, Seyed Hadi Hoseinie // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2013. – Vol. 23, iss. 5. – P. 771–775.
3. Sliwinski P. The methodology of design of axial clearances compensation unit in hydraulic satellite displacement machine and their experimental verification // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 19, iss. 4. – P. 1163–1182.
4. Addison Alexander, Andrea Vacca, Davide Cristofori. Active vibration damping in hydraulic construction machinery // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 176. – P. 514–528.
5. Тимохов Р.С., Шоль Н.Р., Бурмистров В.А. Исследование влияния отрицательных температур на изменение показателей гидравлических систем // *Успехи современной науки*. – Белгород, 2017. – № 6, Т. 2. – С. 95–99.
6. Piramatov U.A., Pugin K.G. Improving the efficiency of existing methods of diagnosing the hydraulic drive of road-building machines // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. International Scientific Conference Interstroyteh, 2019, С. 012007. – P. 1–7.
7. Review of boom potential energy regeneration technology for hydraulic construction machinery / Tianliang Lin, Qiang Chen, Haoling Ren, Weiping Huang, Qihuai Chen, Shengjie Fu // *Renewable and sustainable energy reviews*. – 2017. – Vol. 79. – P. 358–371.
8. Energy saving of cutterhead hydraulic drive system of shield tunneling machine / Hu Shi, Huayong Yang, Guofang Gong, Huaiyin Liu, Dianqing Hou // *Automation in Construction*. – 2014. – Vol. 37. – P. 11–21.
9. Masayoshi Muraki, Eiji Kinbara, Toru Konishi. A laboratory simulation for stick-slip phenomena on the hydraulic cylinder of a construction machine // *Tribology international*. – 2003. – Vol. 36, iss. 10. – P. 739–744.
10. Пугин К.Г., Власов Д.В., Шаякбаров И.Э. Тепловой удар в гидравлических системах строительно-дорожных машин // *Автомобилестроение: проектирование, конструирование, рас-*

чет и технологии ремонта и производства: материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. – Ижевск, 2020. – С. 93–97.

11. Пугин К.Г., Пираматов У.А. Совершенствование методов диагностирования гидросистем гидрофицированных машин // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сб. материалов III Нац. науч.-практ. конф. – Омск, 2020. – С. 49–53.

12. Пугин К.Г. Повышение надежности гидросистем строительно-дорожных машин // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2020. – № 3. – С. 29–35.

13. Пираматов У.А., Пугин К.Г. Совершенствование гидропривода строительно-дорожных машин с целью повышения надежности // Химия. Экология. Урбанистика. – 2020. – Т. 2020–3. – С. 224–228.

14. Шаякбаров И.Э., Пугин К.Г., Власов Д.В. Повышение надежности строительно-дорожных машин в условиях низких температур // Химия. Экология. Урбанистика. – 2020. – Т. 2020–3. – С. 279–283.

15. Jasiński R. Problems of the starting and operating of hydraulic components and systems in low ambient temperature (Part 2) // Polish Maritime Research. – 2008. – Vol. 15. – P. 61–72.

16. Jasiński R. Problems of the starting and operating of hydraulic components and systems in low ambient temperature (Part 3) // Polish Maritime Research. – 2009. – Vol. 16. – P. 22–31.

References

1. Savić, V., Knežević, D., Lovrec, D., Jocanović, M., Karanović, V. (2009). Determination of pressure losses in hydraulic pipeline systems by considering temperature and pressure. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, vol. 55, no. 4, pp. 237–243.

2. Mohammad Javad Rahimdel, Mohammad Ataei, Reza Khalokakaei, Seyed Hadi Hoseinie. Reliability-based maintenance scheduling of hydraulic system of rotary drilling machines. *International Journal of Mining Science and Technology*. Volume 23, issue 5, 2013, pp. 771–775.

3. Pawel Sliwinski. The methodology of design of axial clearances compensation unit in hydraulic satellite displacement machine and their experimental verification. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. Volume 19, issue 4, 2019, pp. 1163–1182.

4. Addison Alexander, Andrea Vacca, Davide Cristofori. Active vibration damping in hydraulic construction machinery. *Procedia Engineering*. Volume 176, 2017, pp. 514–528.

5. Timokhov R.S., Shol' N.R., Burmistrov V.A. Issledovanie vliianiia otritsatel'nykh temperatur na izmenenie pokazatelei gidravlicheskiikh sistem [Study of the influence of negative temperatures on the change in indicators of hydraulic systems] *Uspekhi sovremennoi nauki*. Belgorod, 2017, no. 6, vol. 2, pp. 95–99.

6. Piramatov U.A., Pugin K.G. Improving the efficiency of existing methods of diagnosing the hydraulic drive of road-building machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference Interstroyemeh*, 2019, C. 012007, pp. 1–7.

7. Tianliang Lin, Qiang Chen, Haoling Ren, Weiping Huang, Qihuai Chen, Shengjie Fu. Review of boom potential energy regeneration technology for hydraulic construction machinery. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2017, volume 79, pp. 358–371.

8. Hu Shi, Huayong Yang, Guofang Gong, Huaiyin Liu, Dianqing Hou. Energy saving of cutterhead hydraulic drive system of shield tunneling machine. *Automation in Construction*. 2014, volume 37, pp. 11–21.

9. Masayoshi Muraki, Eiji Kinbara, Toru Konishi. A laboratory simulation for stick-slip phenomena on the hydraulic cylinder of a construction machine. *Tribology international*. 2003, volume 36, issue 10, pp. 739–744.

10. Pugin K.G., Vlasov D.V., Shaiakbarov I.E. Teplovoi udar v gidravlicheskiikh sistemakh stroitel'no-dorozhnykh mashin [Thermal shock in hydraulic systems of road construction machines] *Avtomobilstroenie: proektirovanie, konstruirovaniye, raschet i tekhnologii remonta i proizvodstva*. Materialy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Izhevsk, 2020, pp. 93–97.

11. Pugin K.G., Piramatov U.A. Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniia gidrosistem gidrofitsirovannykh mashin [Improvement of diagnostic methods for hydraulic systems of hydraulic machines] *Obrazovanie. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo*. Sbornik materialov III Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 2020, pp. 49–53.

12. Pugin K.G. Povyshenie nadezhnosti gidrosistem stroitel'no-dorozhnykh mashin [Improving the reliability of hydraulic systems of road construction machines] *Transport. Transportnye sooruzheniia. Ekologiya*. 2020, no. 3, pp. 29–35.

13. Piramatov U.A., Pugin K.G. Sovershenstvovanie gidroprivoda stroitel'no-dorozhnykh mashin s tsel'iu povysheniia nadezhnosti [Improvement of the hydraulic drive of road construction machines in order to increase reliability] *Khimiia. Ekologiya. Urbanistika*. 2020, vol. 2020–3, pp. 224–228.

14. Shaiakbarov I.E., Pugin K.G., Vlasov D.V. Povyshenie nadezhnosti stroitel'no-dorozhnykh mashin v usloviakh nizkikh temperature [Improving the reliability of road construction machines in low temperatures] *Khimiia. Ekologiya. Urbanistika*. 2020, vol. 2020–3, pp. 279–283.

15. Jasiński R. Problems of the starting and operating of hydraulic components and systems in low ambient temperature (Part 2). *Polish Maritime Research*. 2008, vol. 15, pp. 61–72.

16. Jasiński R. Problems of the starting and operating of hydraulic components and systems in low ambient temperature (Part 3), *Polish Maritime Research*. 2009, vol. 16, pp. 22–31.

Получено 01.11.2020

Об авторе

Миллер Александр Павлович (Пермь, Россия) – магистр, ассистент кафедры «Технический сервис и ремонт машин» Пермского государственного аграрно-технологического университета имени академика Д.Н. Прянишникова (614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, 23, e-mail: aleksandrmillera@mail.ru).

About the author

Alexander P. Miller (Perm, Russian Federation) – Master, Department of Technical Service and Machine Repair, Master, Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov (23, Petropavlovskaya st., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: aleksandrmillera@mail.ru).