
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

УДК 621.974

DOI 10.21685/2307-4205-2018-4-5

В. П. Перевертов, Е. А. Кузина, Г. П. Разживина

ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ПЬЕЗОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА МУФТОВОГО ВИНТОВОГО ПРЕССА

V. P. Perevertov, E. A. Kuzina, G. P. Razzhivina

DYNAMIC MODELING OF A QUICKLY EXPOSING ABOUT PIEZOHYDRAL EXECUTIVE BODY ANTI-SCREW PRESS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Муфтовые винтовые прессы (МВП) представляют собой сложную динамическую систему кузнечно-штамповочного производства, которой надо эффективно управлять для получения качественных деталей лопаток, дисков компрессоров и других поковок двигателей ракетно-космической техники и скоростного железнодорожного транспорта из титановых, жаропрочных, композитных материалов и сплавов, повышения надежности технологического оборудования в условиях ГПС. Для совершения рабочего хода деформирования МВП маховик соединяется с винтом и по окончании его отсоединяется от винта соединительной гидроприводной муфтой – исполнительный орган, быстродействие которой является важной технологической и эксплуатационной характеристикой качества управления МВП. В работе изложены основные результаты исследования моделирования быстродействующего пьезогидравлического исполнительного органа для МВП. *Материалы и методы.* Дана методика математического моделирования и натурных испытаний

Abstract. *Background.* Clutch screw press (CSP) are a complex dynamic system of forging and stamping production, which must be effectively managed to obtain high-quality blade-current parts, compressor disks and other forgings of rocket and space engineering engines and high-speed rail transport from titanium, heat-resistant, composite materials and alloys, improving the reliability of technological equipment in the conditions of FMS. To complete the deformation workflow of the CSP, the flywheel is connected to the screw and at the end of it is disconnected from the screw by the hydraulic coupling coupling – the executive body, whose speed is an important technological and operational characteristic of the quality management of the MIP. The paper presents the main results of the study of modeling of high-speed piezohydraulic actuator for the IMP. *Materials and methods.* A method of mathematical modeling and field tests of the hydraulic coupling of the CSP with a pulse dump valve (PDV) is given, which makes it possible to calculate the dynamic parameters of the coupling and ensure a high-quality technological process of control of the technolog-

гидроприводной муфты МВП с импульсным сбрасывающим клапаном (ИСК), позволяющая рассчитывать динамические параметры муфты и обеспечить качественный технологический процесс управления технологической системой. *Результаты.* Экономический эффект заключается в уменьшении трудоемкости расчетных работ при проектировании гидроприводной муфты МВП, повышении надежности и долговечности винтовой пары, деталей муфты и штампового инструмента за счет повышения быстродействия системы диагностического управления (отключения) муфты при использовании пьезоимпульсного клапана (ИСК). Полученные результаты расчета динамики срабатывания гидроприводной муфты МВП с ИСК позволяют создавать системы контроля и диагностики параметров технологического процесса и оборудования заготовительного кузнечного производства. *Выводы.* Высокое качество деталей (поковок) при изготовлении и ремонте, а также безопасность и экологичность работы сложной технологической заготовительной системы на базе невозможно без контроля и диагностики показателей качества продукции с помощью современных методов и средств измерения, включая лазерные, инфракрасные, волоконно-оптические датчики и устройства.

Ключевые слова: МВП, надежность, качество, исполнительный орган, математическое обеспечение, система, диагностика, ИСК.

ical system. *Results.* The economic effect is to reduce the complexity of the design work in the design of the hydraulic coupling of the IMP, increase the reliability and durability of the screw pair, coupling parts and die tools by increasing the speed of the diagnostic control system (shutdown) of the coupling when using a piezo pulse valve. The obtained results of the calculation of the response dynamics of the hydraulic actuator coupling of the CSP with the PDV allow you to create systems for monitoring and diagnosing the parameters of the technological process and equipment for the forging production. *Conclusions.* High quality parts (forgings) in the manufacture and repair, as well as safety and environmental friendliness of a complex technological backup system based on the impossible without monitoring and diagnosing product quality indicators using modern methods and means of measurement, including laser, infrared, fiber-optic sensors and devices.

Key words: coupling screw presses, reliability, quality, executive body, software, system, diagnostics, pulse dump valve.

Введение

Винтовые прессы (ВП) с различными типами привода (электрический, фрикционный, гидравлический, муфтовый) относятся к кузнечно-штамповочным машинам (КШМ) заготовительного производства, и их применение эффективно при изготовлении поковок повышенной точности для таких деталей, как турбинные и компрессорные лопатки и диски, не требующих последующей механической обработки [1–5].

В настоящее время более 30 крупных зарубежных и российских фирм выпускают ВП усилием от 0,25 до 315 МН для создания на их основе ГПС.

Анализ номенклатуры поковок, изготавливаемых на ВП, показал, что по своим технологическим возможностям они превосходят гидравлические и кривошипные прессы при получении деталей из жаропрочных и титановых сплавов, композитных материалов, имеющих сложную конфигурацию и тонкое полотно. Внедрение специализированных ВП для новых технологических процессов штамповки в закрытых штампах с разъемными матрицами, штамповки с кручением, с активными силами трения, сферодвижной штамповки требует повышенной энергии деформирования, которую может обеспечить муфтовый винтовой пресс (МВП), и безопасной работы в сложной технической системе [5–8]. Принцип действия МВП обуславливает необходимость быстрого и точного отключения муфты по окончании хода деформирования. При запаздывании отключения происходит интенсивный износ и выход из строя элементов исполнительного органа, перегрузке штампового инструмента и деталей пресса, приводящих к низкому качеству поковок. Поэтому быстродействие отключения разработанной муфты, осуществляемое системой управления [6–9], является важной технологической и эксплуатационной характеристикой качества управления МВП. Гидроприводная муфта с импульсным сбрасывающим клапаном (ИСК) – быстродействующий исполнительный орган для МВП является сложной динамической системой, функционирующей в циклическом режиме. Такие динамические параметры муфты: I – длительность отклю-

ния; 2 – скорость поршня муфты в конце его хода при включении; 3 – степень энергетических потерь маховика при включении и отключении муфты в большой степени определяют его технологические и эксплуатационные характеристики. Цель исследований – определение динамических показателей муфты с ИСК.

Моделирование динамических параметров гидроприводной муфты

Основным методом определения динамических параметров муфты целесообразно выбрать математическое моделирование посредством численного интегрирования системы уравнений [1]. Для анализа линеаризованной модели применялось схемотехническое моделирование и расчет средствами программного комплекса ПА-6 [10]. Для исследования динамики ИСК, являющегося быстродействующим исполнительным органом системы управления МВП, применялись как математическое моделирование, так и натурные испытания, для которых были изготовлены специальные образцы. В натурных испытаниях определялась адекватность разработанной математической модели ИСК [11].

При анализе динамики срабатывания гидроприводной муфты МВП Ф2044 установлено, что элементы разработанной динамической модели образуют две группы с общими порядками частот собственных колебаний и одинаковым гидравлическим режимом. Моделирование динамики срабатывания муфты целесообразно проводить отдельно по каждой группе. При этом для моделирования динамики элементов первой группы, характеризующихся существенной нелинейностью, целесообразно использовать численное решение уравнения математической модели по специально разработанной программе на языке высокого уровня, для второй группы элементов, характеризующейся преимущественно линейными свойствами, целесообразно использовать программный комплекс ПА-6 схемотехнического моделирования [10, 11].

Разработана программа и проведено моделирование на ЭВМ динамики срабатывания гидроприводной муфты с ИСК по нелинейной математической модели. Результаты расчета представлены на рис. 1–5: динамика гидравлической и механической подсистем при включении (отключении) гидроприводной муфты МВП с ИСК, динамика срабатывания сливного распределителя на базе ИСК.

Разработана программа на входном языке ПА-6 и проведено моделирование на ЭВМ динамики срабатывания сливного распределителя на базе ИСК линеаризованной моделей гидравлической и механической подсистем [1, 10, 12, 13].

Результаты исследований

Результаты математического моделирования на ЭВМ, представленные на рис. 1–5, позволяют провести анализ динамики срабатывания гидроприводной муфты МВП с ИСК. Расходы в элементах гидросистемы практически одинаковы, плавно возрастают к концу хода поршня до установившегося значения $Q = 20$ л/с (рис. 1). После включения муфты происходит интенсивный разгон винта с ползуном в течение 0,0016 с (рис. 2). Время разгона винта до угловой скорости ω_2 маховика $t = 0,088$ с. Энергетические потери маховика на проскальзывание в муфте при включении не больше 1,3 %.

Время включения муфты $t_{вк}$, соответствующее времени перемещения поршня муфты из исходного положения в крайнее нижнее ($x_5 = 0,003$ м), составляет 0,086 с. Скорость поршня муфты V_5 к концу его хода стабилизируется около значения $V_5 = 0,05$ м/с (рис. 2,а).

Наиболее интенсивно изменяется давление P_2 в напорной гидромагистрали: после полного открытия проходного сечения напорного распределителя ($t_{нр} = 0,02$ с) давление P_2 падает с 6,5 до 2,5 МПа, а затем возрастает до 6 МПа к окончанию включения муфты. Давления в каналах P_4 и цилиндре муфты P_5 возрастают от исходного 0,1 МПа до соответственно 0,6 и 0,4 МПа при $0 < t < t_{нр}$ и незначительно колеблются около данных значений при $t_{нр} < t < t_{вк}$ (рис. 1,а). Данные величины давлений обусловлены сопротивлением пружин поршня муфты при его перемещении. В конце хода поршня муфты давления P_2 , $P_н$, P_5 резко возрастают и стабилизируются около номинальной величины $P_н$ в ходе затухающего колебательного процесса (на рис. 1,а не представлен).

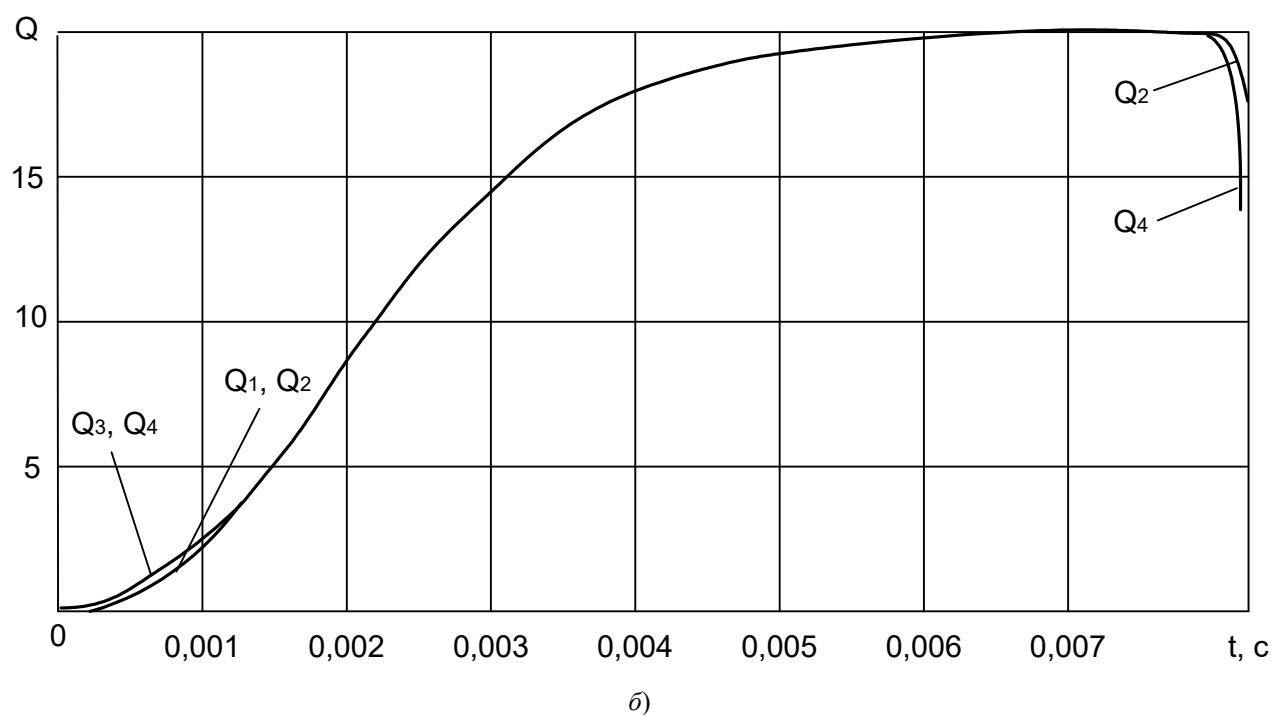
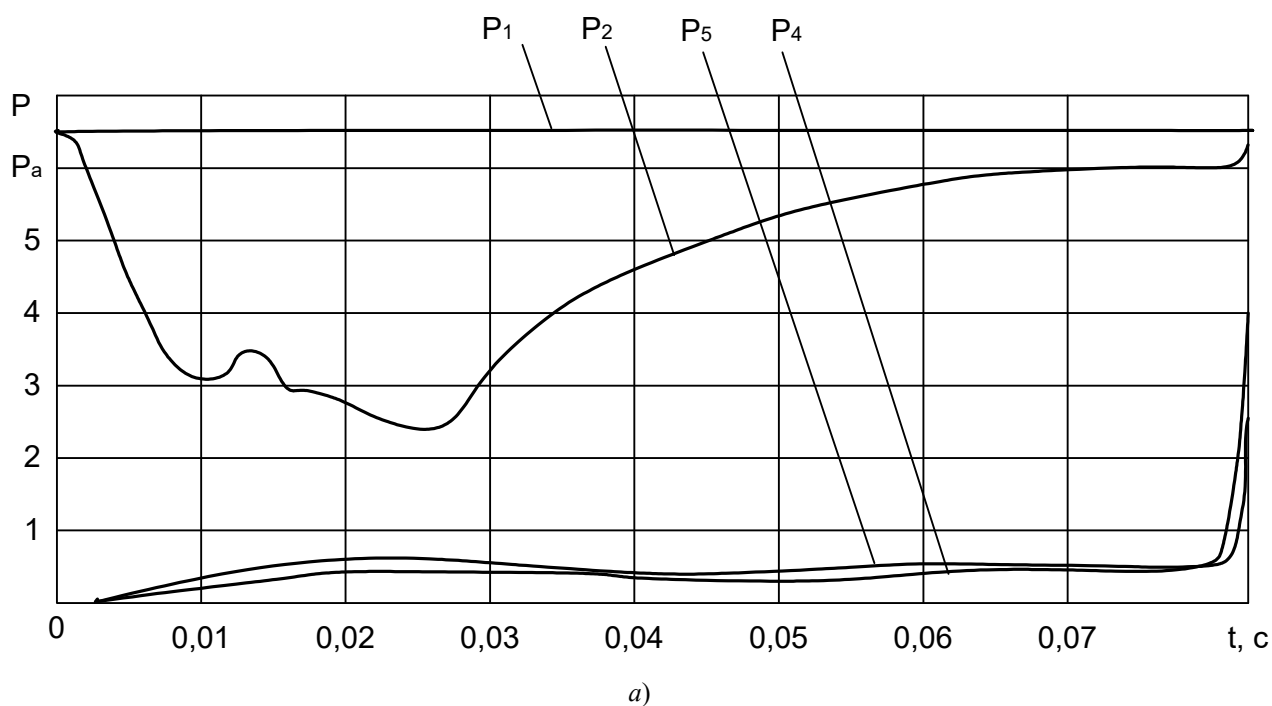


Рис. 1. Динамика гидравлической подсистемы при включении гидроприводной муфты с ИСК: а – давления: P_1 – в аккумуляторе; P_2 – в напорной гидролинии; P_4 – в каналах муфт; P_5 – в цилиндре муфты; б – расходы: Q_1 – в аккумуляторе; Q_2 – в напорной гидролинии; Q_3 – в каналах муфт; Q_4 – в цилиндре муфты

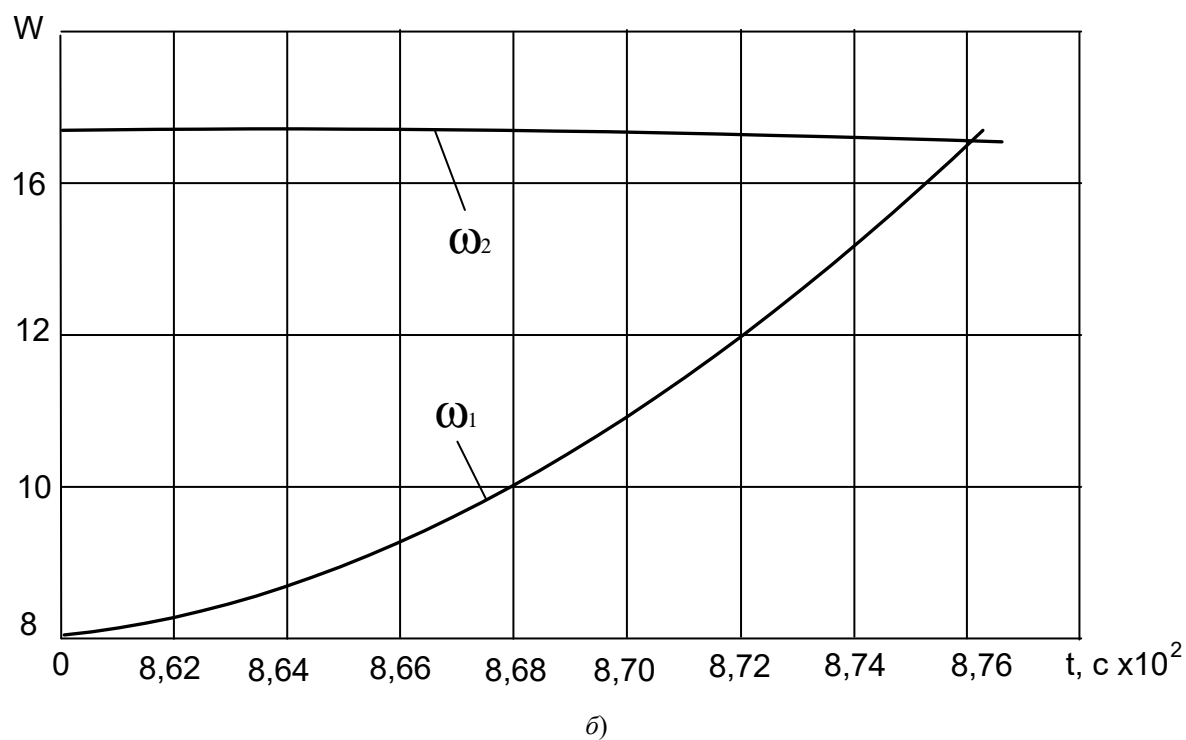
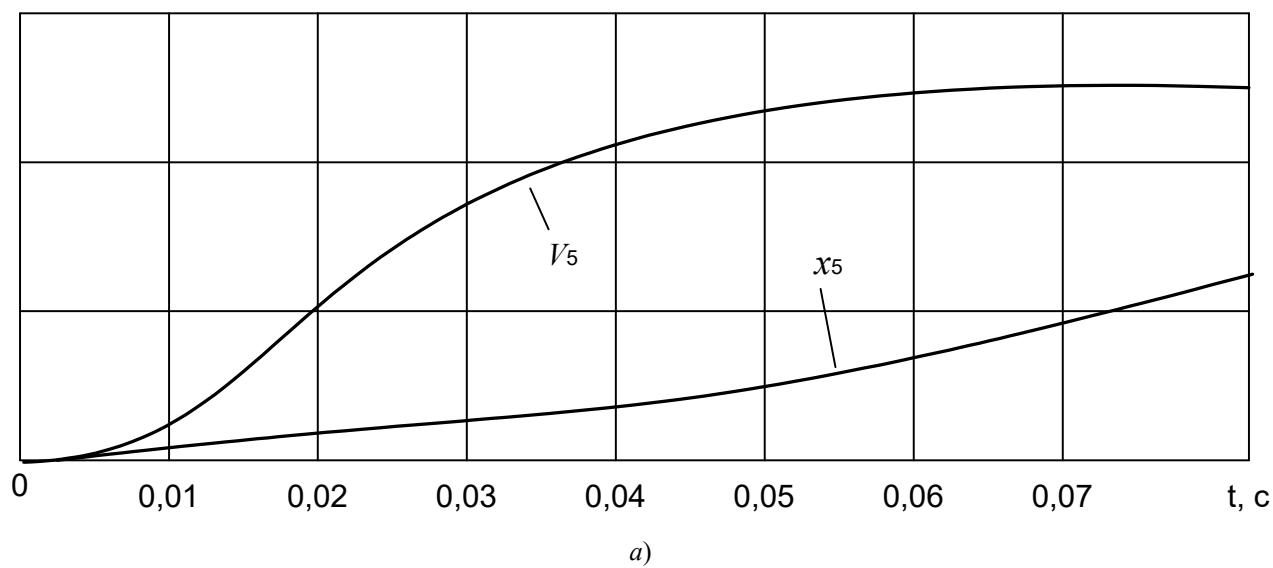


Рис. 2. Динамика механической подсистемы при включении гидроприводной муфты с ИСК:
 а – перемещение и скорость поршня муфты: x_5 – перемещения поршня муфты; V_5 – скорость поршня муфты;
 б – угловые скорости винта и маховика: ω_1 – угловая скорость винта; ω_2 – угловая скорость маховика

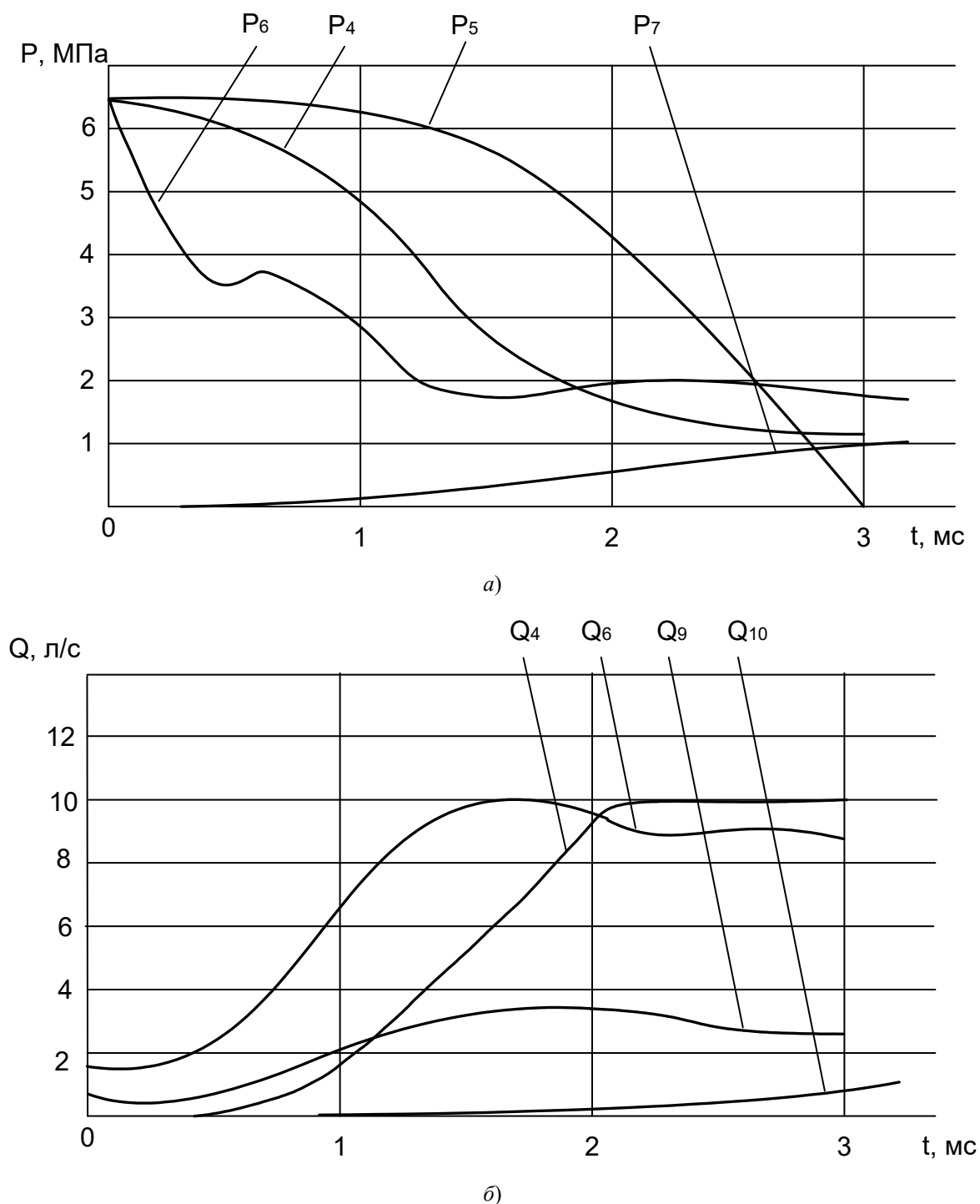


Рис. 3. Динамика гидравлической подсистемы при включении гидроприводной муфты с ИСК:
 а – давления: P_4 – в каналах муфты; P_5 – в цилиндре муфты; P_6 – перед импульсным каналом;
 P_7 – в сливной гидролинии; б – расходы: Q_4 – в каналах муфты; Q_6 – через сливной клапан;
 Q_7 – в сливной гидролинии; Q_9 – через импульсный клапан

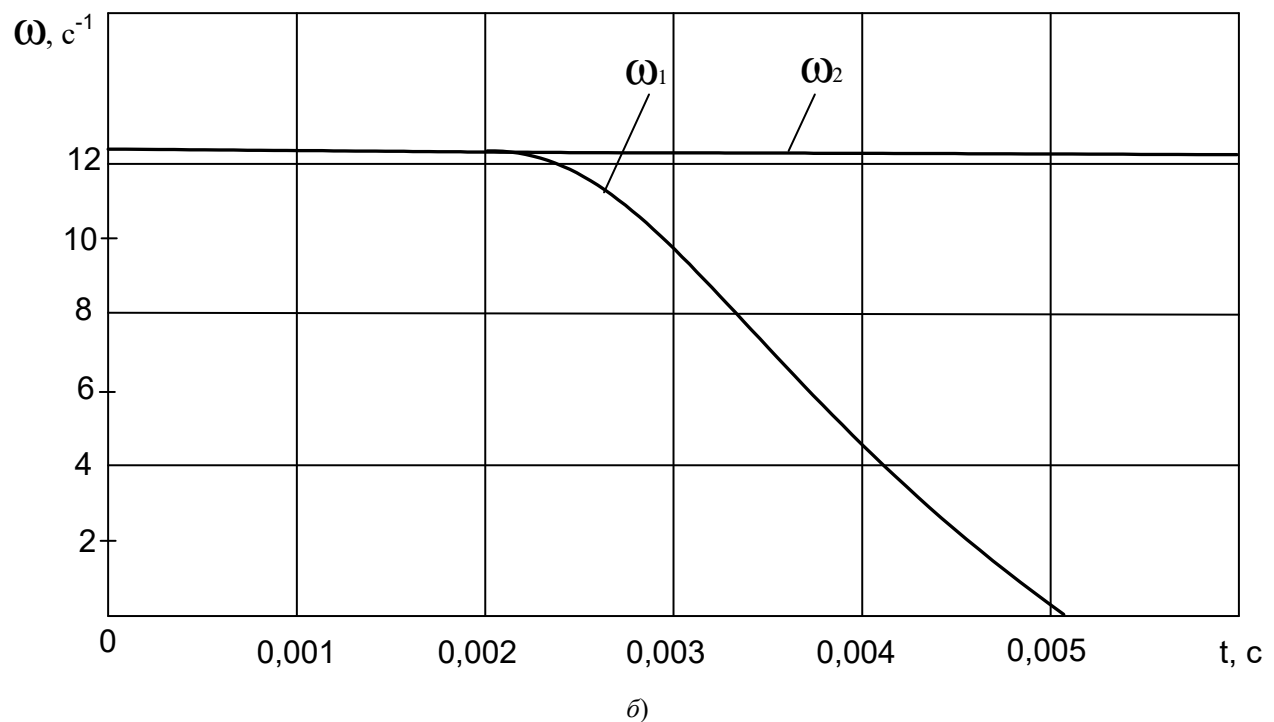
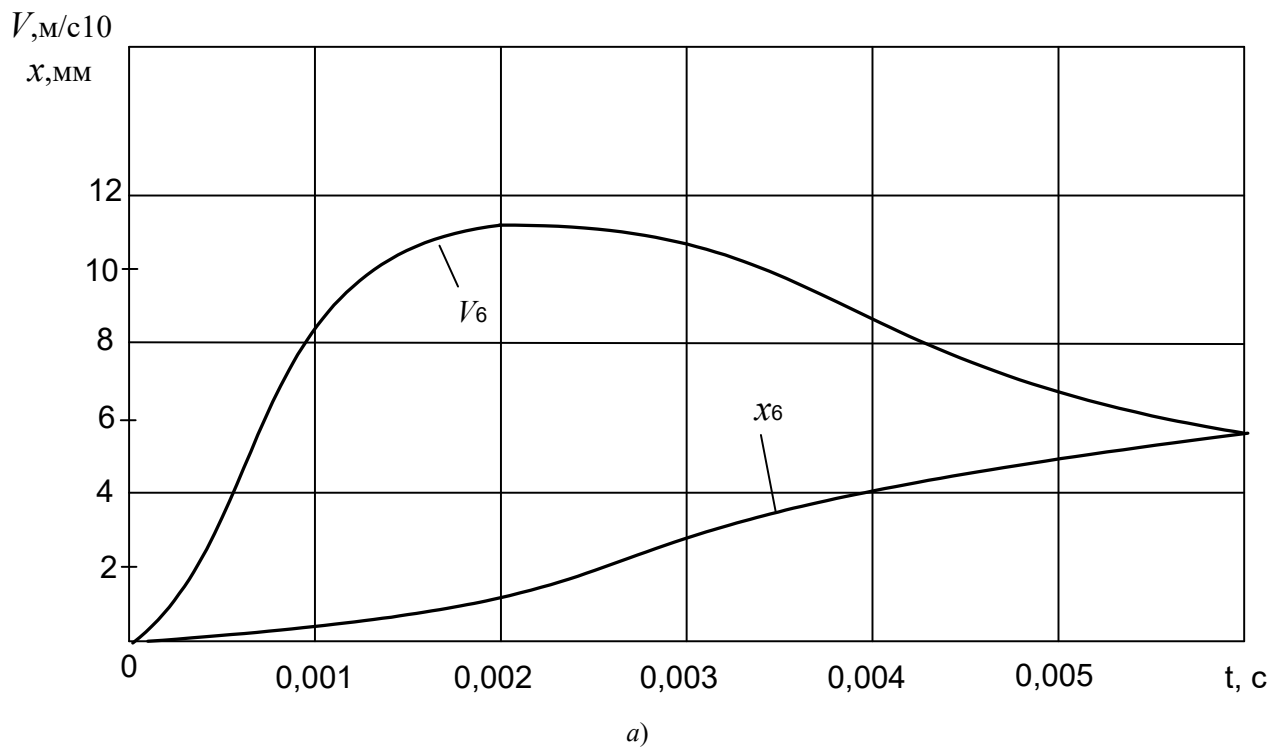


Рис. 4. Динамика механической подсистемы при отключении гидроприводной муфты с ИСК:
 а – перемещение и скорость затвора сливного клапана: x_6 – перемещение затвора сливного клапана;
 V_6 – скорость затвора сливного клапана; б – угловые скорости винта и маховика:
 ω_1 – угловая скорость винта; ω_2 – угловая скорость маховика

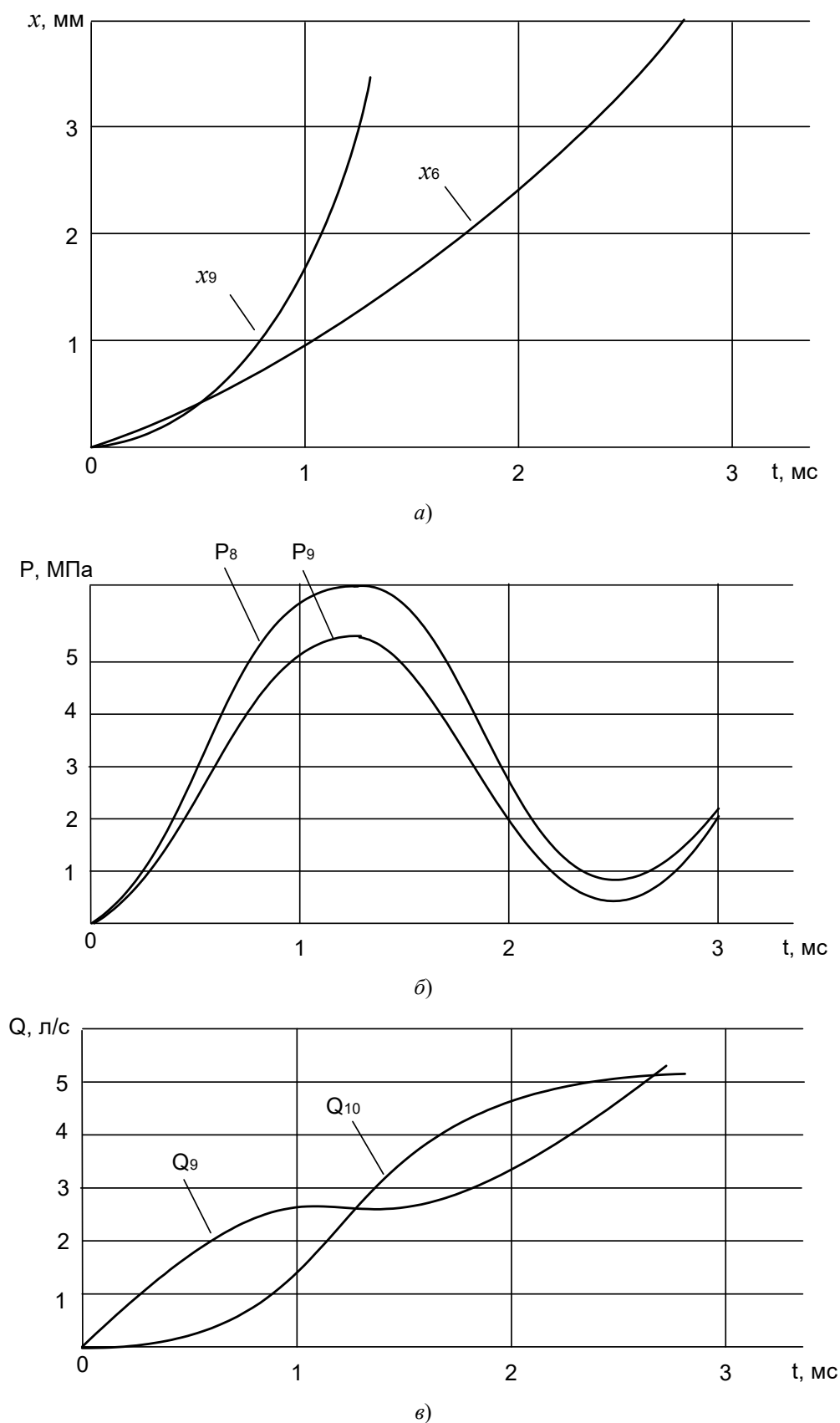


Рис. 5. Динамика срабатывания сливного распределителя на базе ИСК:

a – перемещение затворов: x_6 – сливного клапана; x_9 – импульсного клапана (ИСК); $б$ – изменение давлений:

P_8 – давление в общей поршневой полости ИСК; P_9 – давление на выходе ИСК; $в$ – изменение расходов:

Q_9 – расход через ИСК; Q_{10} – расход в канале, связывающем ИСК со сливной гидролинией

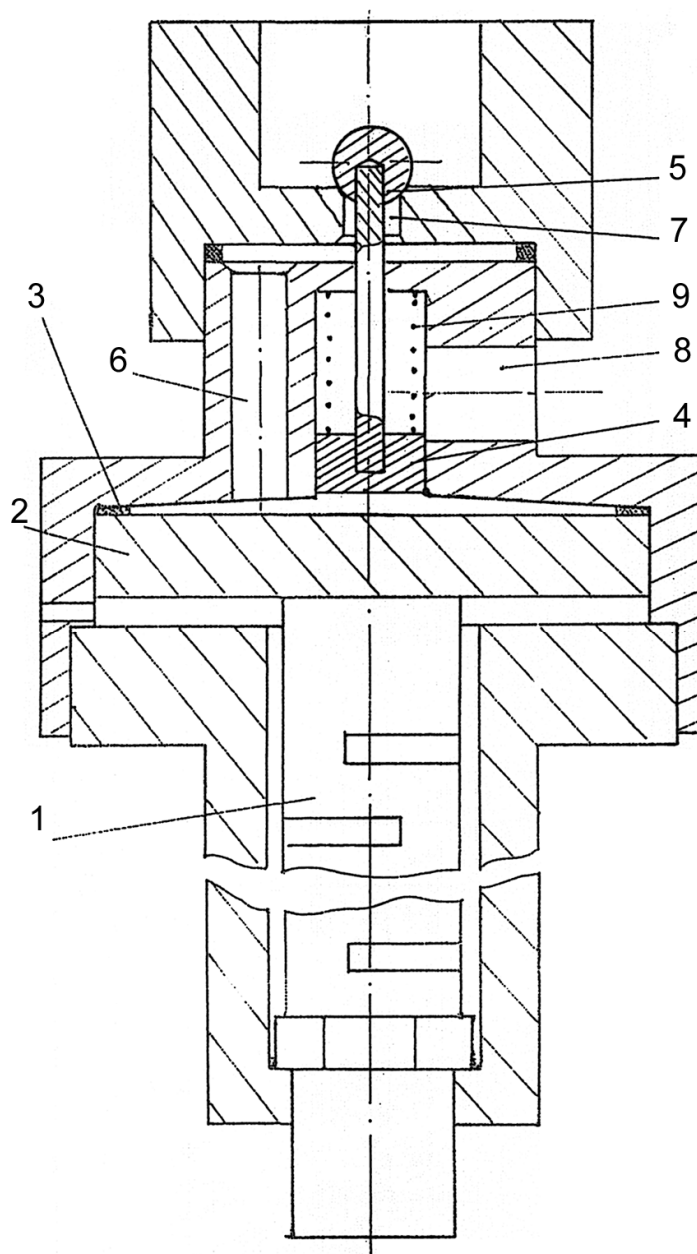


Рис. 6. Конструктивная схема экспериментального образца импульсного срабатывающего клапана (ИСК):
 1 – пьезопровод; 2 – поршень привода; 3 – общая поршневая полость; 4 – поршень затвора; 5 – затвор;
 6 – внутренний канал; 7 – входной канал; 8 – сливной канал; 9 – пружина затвора

При отключении муфты с помощью ИСК ($t = 0$ соответствует моменту срабатывания пьезопровода) давление в цилиндре муфты P_5 интенсивно падает от номинального $P_5 = P_n = 6,5$ МПа до $P_5 = 0,4$ МПа (рис. 3,а) и стабилизируется около этой величины в ходе затухающего колебательного процесса (на рис. 3,а не приведен) при отведении поршня муфты в исходное положение.

В ходе колебательного процесса давление P_5 принимает и отрицательные значения. Подобный характер колебательного процесса обусловлен использованием динамической модели с сосредоточенными параметрами. Колебания давления в каналах муфты P_4 и сливной гидролинии P_7 вследствие их большей гидравлической инерционности и большего гидравлического сопротивления имеют более плавный характер (см. рис. 3,а). Время сброса давления P_5 в цилиндре муфты определяет длительность отключения муфты. Из результатов моделирования следует, что длительность отключения муфты, соответствующая сбросу давления в ее цилиндре, составляет $t_{от} = 0,003$ с. Динамика расходов в каналах муфты Q_4 в сливной гидролинии Q_7 , через сливной клапан Q_6 , через ИСК Q_9 (рис. 3,б) соответствует динамике давлений.

Результаты моделирования (рис. 4,а) показывают, что после срабатывания пьезопривода ИСК перемещение x_6 затвора основного сливного клапана на 3 мм, соответствующее его проходному сечению в $7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, происходит за время $t = 0,003 \text{ с}$ (см. рис. 4,а). Проскальзывание в муфте после срабатывания пьезопривода ИСК начинается при $t = 0,002 \text{ с}$ (рис. 4,б). Винт останавливается при $t = 0,005 \text{ с}$ ($P_d = 2,4 \cdot 10^7 \text{ Н}$). Энергетические потери маховика на проскальзывание в муфте при сбросе давления составляют 0,1 %. Отведение поршня муфты в исходное положение составляет около 0,1 с (на рис. 4,б не показано).

Результаты моделирования динамики срабатывания выходного распределителя по линеаризованной модели средствами программного комплекса ПА-6 (см. рис. 5,а–в) показывают, что время перемещения x_9 затвора импульсного сбрасывающего клапана на 0,003 м, при котором полностью открывается входной канал клапана, составляет $t = 0,0015 \text{ с}$ (рис. 5,а). Процесс срабатывания ИСК характеризуется интенсивными практически синхронными колебаниями давления в полости клапана P_8 и на выходе клапана P_9 (см. рис. 5,б). Колебание расходов через клапан Q_9 и в канале, связывающем выход клапана со сливной гидролинией Q_{10} , незначительно (см. рис. 5,в). Проведенные натурные исследования экспериментального образца ИСК (рис. 6) подтвердили его расчетное быстроедействие и адекватность разработанной математической модели пьезоимпульсного клапана.

Заключение

1. В работе представлен анализ результатов расчета динамики выходного распределителя по нелинейной (см. рис. 4,а) и линеаризованной (см. рис. 5,а) моделям, предназначенный для разработки способов повышения надежности МВП.

2. Конструкция исполнительного органа на базе ИСК для МВП и проведенное моделирование имеют научную новизну и практическую ценность и будет внедряться на ВПО ТМП при создании МВП типа Ф2044, оснащенных современными бесконтактными датчиками, а также в других НТТС.

3. Экономический эффект заключается в уменьшении трудоемкости расчетных работ при проектировании гидроприводной муфты МВП, повышении надежности основных деталей МВП и стойкости штампового инструмента за счет повышения быстрогодействия системы управления (отключения) муфты при использовании ИСК.

Библиографический список

1. *Перевертов, В. П.* Математическая модель гидроприводной муфты МВП с импульсным срабатывающим клапаном / В. П. Перевертов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2005. – С. 146–148.
2. *Чертыковцева, Н. В.* Программно-аппаратный комплекс оптимизации режимов работы системы охлаждения дизеля тепловоза / Н. В. Чертыковцева, А. В. Иванов, В. П. Перевертов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 408–411.
3. *Перевертов, В. П.* Классификация отказов ГПМ обработки материалов давлением / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, М. М. Абулкасимов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 143–147.
4. *Перевертов, В. П.* Технология обработки материалов концентрированным потоком энергии / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, М. М. Абулкасимов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 3 (11). – С. 69–79.
5. *Перевертов, В. П.* Качество продукции и услуг РЖД в сочетании с качеством управления / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, М. М. Абулкасимов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 116–120.
6. *Юрков, Н. К.* Физические основы получения катастрофического отказа в электрорадиокомпонентах и системах / Н. К. Юрков, Н. В. Горячев, Е. А. Кузина // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 102–104.
7. *Мишанов, Р. О.* Выбор электрических параметров интегральных микросхем специального назначения для проведения индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности / Р. О. Мишанов, М. Н. Пиганов, В. П. Перевертов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 43–53.
8. *Андрончев, И. К.* Стратегия интересубъектной надежности сложных технических систем железнодорожного транспорта / И. К. Андрончев, В. П. Перевертов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 70–73.

9. Юрков, Н. К. Технология производства электронных средств : учебник / Н. К. Юрков. – 2-е изд., исправ. и доп. – СПб., 2014. – 480 с.
10. Трудоношин, В. Н. Математические модели технических объектов / В. Н. Трудоношин, Н. В. Пивоваров // Системы автоматизированного проектирования. – М. : Высш. шк., 1986. – Кн. 4. – 160 с.
11. Юрков, Н. К. Оценка безопасности сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 15–21.
12. Перевертов, В. П. Система диагностирования и технического обслуживания НТТС и ПС в условиях РЖД / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 93–95.
13. Перевертов, В. П. Система умной инфраструктуры РЖД и нанотехнологии / В. П. Перевертов, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т.1. – С. 100–102.

References

1. Perevertov V. P. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2005, pp. 146–148.
2. Chertykovtseva N. V., Ivanov A. V., Perevertov V. P. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2014, vol. 1, pp. 408–411.
3. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Abulkasimov M. M. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2016, vol. 2, pp. 143–147.
4. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Abulkasimov M. M. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2015, no. 3 (11), pp. 69–79.
5. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Abulkasimov M. M. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2017, vol. 2, pp. 116–120.
6. Yurkov N. K., Goryachev N. V., Kuzina E. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 1, pp. 102–104.
7. Mishanov R. O., Piganov M. N., Perevertov V. P. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 2 (22), pp. 43–53.
8. Andronchev I. K., Perevertov V. P. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2017, vol. 1, pp. 70–73.
9. Yurkov N. K. *Tekhnologiya proizvodstva elektronnykh sredstv: uchebnik* [Technology of production of electronic tools: a tutorial]. 2nd ed., corr. and suppl. SPb., 2014, 480 p.
10. Trudonoshin V. N., Pivovarov N. V. *Sistemy avtomatizirovannogo projektirovaniya* [CAD system]. Moscow: Vyssh. shk., 1986, vol. 4, 160 p.
11. Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems], 2013, no. 2, pp. 15–21.
12. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Yurkov N. K. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 2, pp. 93–95.
13. Perevertov V. P., Yurkov N. K. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 1, pp. 100–102.

Перевертов Валерий Петрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра наземных
транспортно-технологических средств,
Самарский государственный университет
путей сообщения
(443066, Россия, г. Самара,
Первый безымянный пер., 18)
E-mail: vperevertov@yandex.ru

Кузина Екатерина Андреевна

магистрант,
Московский технологический университет
(119454, Россия, г. Москва,
проспект Вернадского, 78)
E-mail: ketrinkuz97@mail.ru

Perevertov Valeriy Petrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of land transport
and technological means,
Samara State University
of Way of Communication
(443066, 18 Pervyy bezymyanny lane, Samara, Russia)

Kuzina Ekaterina Andreevna

master degree student,
Moscow Technologic University
(119454, 78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

Разживина Галина Петровна

доцент,
кафедра инженерной экологии,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
(440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: office@pguas.ru

Razzhivina Galina Petrovna

associate professor,
sub-department of environmental engineering,
Penza State University
of Architecture and Construction
(440028, 28 German Titov street, Penza, Russia)

УДК 621.974

Перевертов, В. П.

Динамическое моделирование быстродействующего пьезогидравлического исполнительного органа муфтового винтового пресса / В. П. Перевертов, Е. А. Кузина, Г. П. Разживина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 4 (24). – С. 48–59. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-4-5.