



## Статическая характеристика измерительного преобразователя угловой скорости для адаптивных систем управления гидравлическими приводами

© 2024. В. В. Голубовский, Н. А. Симанин, В. В. Коновалов ✉

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», г. Пенза, Российская Федерация

*Цель исследований – получение статической характеристики измерительного преобразователя угловой скорости разработанной конструкции и определение его конструктивных параметров. Методика исследований предусматривает теоретическое обоснование статической характеристики предложенного измерительного преобразователя угловой скорости с инерционной заслонкой и соплами. В статье рассмотрен принцип действия различных конструкций измерительных преобразователей угловой скорости с инерционными массами. Обоснован вариант конструктивного исполнения измерительного преобразователя угловой скорости с инерционной заслонкой и соплами, для которого получена статическая характеристика. На основе полученных выражений определены основные конструктивные параметры устройства. Рассмотрена методика расчета статической характеристики измерительных преобразователей угловой скорости в адаптивной системе управления гидравлическим приводом. Полученное выражение статической характеристики предложенной конструкции измерительного преобразователя угловой скорости связывает внешнее возмущающее воздействие (угловую скорость) и перепад давлений в междрозсельных камерах в установившемся режиме работы. Рекомендуемые параметры элементов измерительного преобразователя угловой скорости: диаметр отверстия сопла в интервале 0,5–1,5 мм, диаметр торца сопла в интервале 1,2–1,5 диаметра отверстия сопла, ход заслонки до 0,1 диаметра отверстия сопла. Следует отметить, что при диаметрах отверстий постоянного дросселя и сопла меньше 0,5 мм, а также при перемещении заслонки менее 0,02 мм возможно возникновение облитерации, то есть зарастивание проходных сечений сопротивлений поляризованными молекулами жидкости, что нарушает работоспособность измерительного преобразователя угловых скоростей. Полученное выражение статической характеристики предложенной конструкции измерительного преобразователя угловой скорости с инерционной заслонкой и соплами позволяет определить конструктивные параметры его элементов и на их основе динамические характеристики.*

**Ключевые слова:** гидрофицированное оборудование, система автоматического управления, датчик угловой скорости, регулятор частоты вращения, сопло-заслонка, статическая характеристика, соотношение параметров датчика

**Благодарности:** работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Голубовский В. В., Симанин Н. А., Коновалов В. В. Статическая характеристика измерительного преобразователя угловой скорости для адаптивных систем управления гидравлическими приводами. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):495–506. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.495-506>

Поступила: 16.02.2024

Принята к публикации: 17.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

## Static characteristic of angular velocity measuring transducer for adaptive control systems of hydraulic drives

© 2024. Vitaly V. Golubovsky, Nikolay A. Simanin, Vladimir V. Konovalov ✉

Penza State Technological University, Penza, Russian Federation

*The aim of the research is to obtain the static characteristic of the angular velocity measuring transducer of the developed design and to determine its design parameters. The research methodology provides theoretical substantiation of the static characteristic of the proposed angular velocity measuring transducer with inertial flap and nozzles. The paper considers the principle of operation of various designs of measuring transducers of angular velocity with inertial masses. The variant of constructive execution of angular velocity measuring transducer with inertial flap and nozzles is substantiated, for which the static characteristic is obtained. On the basis of the obtained expressions the main design parameters of the device are determined. The methodology of calculation of static characteristic of angular velocity measuring transducers in the adaptive control system of hydraulic drive is considered. The obtained expression of the static characteristic of the proposed design of the angular velocity measuring transducer connects the external disturbing influence (angular velocity) and the pressure drop in the inter-throttle chambers in the steady-state mode of operation. The recommended parameters of the elements of the angular velocity transducer are: nozzle orifice diameter in the range of 0.5–1.5 mm, nozzle face diameter in the range of 1.2–1.5 nozzle orifice diameter, flap stroke up to 0.1 nozzle orifice diameter. It should be noted that at diameters of permanent throttle and nozzle orifices less than 0.5 mm, as well as at the flap movement less than 0.02 mm, obliteration may occur, i.e. overgrowing of resistance passage sections by polarised liquid molecules, which breaks the performance of the angular velocity transducer.*

*The obtained expression of the static characteristic of the proposed design of the angular velocity transducer with an inertial flap and nozzles allows us to determine the design parameters of its elements and, on their basis, the dynamic characteristics.*

**Keywords:** hydroficated equipment, automatic control system, angular velocity sensor, speed controller, nozzle-flap, static characteristic, sensor parameter ratio

**Acknowledgments:** the work was done without financial support in the framework of the initiative topics.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

**Conflict of interest:** the authors declared no conflict of interest.

**For citation:** Golubovskiy V. V., Simanin N. A., Kononov V. V. Static characteristic of angular velocity measuring transducer for adaptive control systems of hydraulic drives. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):495–506. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.495-506>

Received: 16.02.2024

Accepted for publication: 17.05.2024

Published online: 26.06.2024

В настоящее время системами автоматического управления оснащаются большое количество технологического оборудования, имеющего гидравлические приводы, включая грузоподъемные устройства лесного хозяйства [1, 2] и транспорта [3, 4]. Для гидравлических приводов вращательного движения следует использовать измерительные преобразователи угловой скорости (ИПУС), которые определяют качество переходных процессов в системе автоматического управления. Такой преобразователь предназначен для измерения и контроля угловой скорости объектов в системах автоматического регулирования гидравлических приводов промышленного оборудования, сельскохозяйственных, подъемных, транспортных и других технологических машинах. Дальнейшее повышение эффективности управления рабочими процессами невозможно без применения систем автоматического управления. Подобные системы получили широкое распространение, включая транспортные машины [5], производственное [6] и технологическое оборудование [7, 8]. Проектирование систем автоматического управления тесно связано с разработкой измерительных преобразователей [9, 10]. От их точности и чувствительности напрямую зависит быстродействие системы управления.

Анализ систем управления показывает, что для гидравлических систем автоматического управления поддержания скоростных показателей целесообразно использовать измерительные преобразователи на основе гидравлического усилителя типа «сопло-заслонка». Данный вид гидравлического усилителя получил широкое применение в строительной технике [11, 12] и транспорте [13, 14].

**Цель исследований** – получение статической характеристики измерительного преобразователя угловой скорости разработанной конструкции и определение его конструктивных параметров.

**Научная новизна** – получение выражений статической характеристики измерительного преобразователя угловых скоростей оригинальной/предлагаемой конструкции для работы гидравлического силового привода и системы его автоматического управления рабочими органами гидрофицированного технологического оборудования без многократного преобразования видов энергии.

**Материал и методы.** Методика исследований предусматривает теоретическое обоснование статической характеристики предложенного измерительного преобразователя угловой скорости. На основе полученных выражений определены основные конструктивные параметры устройства.

Для гидравлических приводов вращательного движения следует использовать измерительные преобразователи угловой скорости, которые служат в качестве источника информации о контролируемом параметре объекта и могут применяться в системах стабилизации скорости вращения рабочих органов в гидравлических приводах машин, при этом стабилизация угловой скорости достигается путем непрерывного регулирования расхода жидкости, подводимой к гидравлическому двигателю привода, в зависимости от изменения нагрузки. Возможность поддержания заданной угловой скорости валов обеспечивает снижение инерционных сил на механические элементы привода [15, 16, 17].

Основными конструктивными элементами преобразователей угловой скорости являются: инерционная масса, упругие элементы, постоянные и переменные сопротивления (дрессели), демпфирующие элементы и устройства и т. д.

В измерительных преобразователях переменные дроссели сопло-заслонка обычно используют совместно с последовательно включенными на их входах постоянными дросселями шайба или втулка, образующими мостовую измерительную схему (рис. 1). Между постоян-

ными и переменными сопротивлениями образованы междроссельные камеры, к которым (в диагональ моста) подключают исполни-

тельный элемент (автоматический регулятор) адаптивной системы управления гидравлическим приводом.

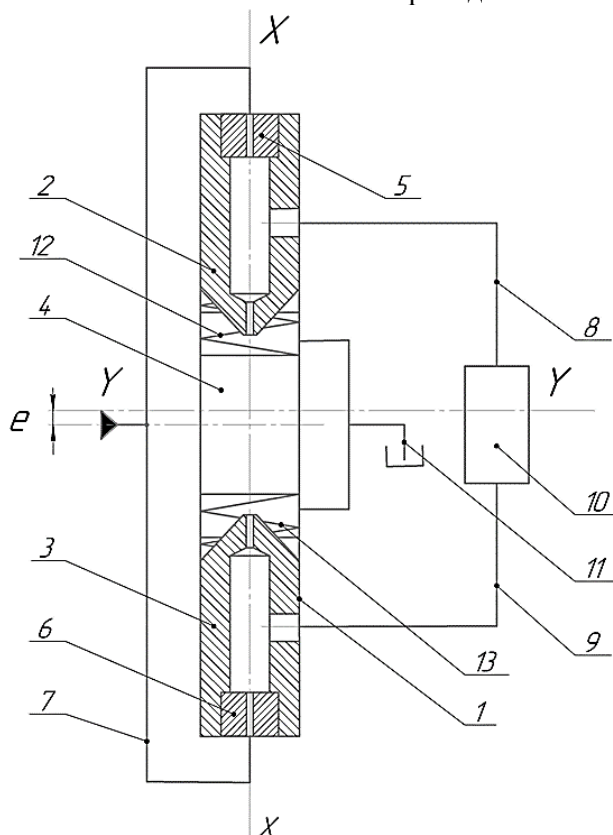


Рис. 1. Принципиальная схема измерительного преобразователя угловой скорости с инерционной заслонкой и соплами: 1 – корпус; 2, 3 – сопла; 4 – инерционная заслонка; 5, 6 – постоянные дроссели; 7 – напорная линия; 8, 9 – линии управления исполнительным элементом; 10 – исполнительный элемент (автоматический регулятор); 11 – сливная линия; 12, 13 – пружины /

Fig. 1. Principal scheme of angular velocity transducer with inertial flap and nozzles: 1 – housing; 2, 3 – nozzles; 4 – inertial flap; 5, 6 – permanent throttles; 7 – pressure line; 8, 9 – control lines of the executive element; 10 – executive element (automatic regulator); 11 – drain line; 12, 13 – springs

Ось вращения  $Y - Y$  объекта, перпендикулярная оси чувствительности  $X - X$ , должна находиться на некотором расстоянии  $e$  от геометрического центра корпуса преобразователя. Центробежная сила  $F$ , действующая на инерционную заслонку, будет определяться зависимостью  $F = m\omega^2 e$ , где  $m$  – масса инерционной заслонки;  $\omega$  – угловая скорость вращения объекта.

Конструктивная схема опытного образца инерционного измерительного преобразователя угловой скорости с элементами сопло-заслонка приведена на рисунке 2 [18]. Предварительная настройка измерительного преобразователя включает в себя два этапа.

Первый этап предусматривает настройку требуемых статических характеристик преобразователя (по расходу, по давлению в междроссельных камерах и т. д.), что обеспечивает

регулировка зазоров между торцами сопел 2, 3 и заслонкой 4, путем осевого смещения сопел по резьбе в корпусе 1, и одновременное изменение деформации центрирующих пружин 12 и 13. Зазоры между торцами сопел и заслонкой должны быть одинаковыми. Эту настройку можно производить вне ротора преобразователя.

Второй этап настройки предусматривает установку корпуса 1 в расточке ротора 15 преобразователя в положение, при котором геометрический центр находится на некотором заданном расстоянии от оси вращения  $Y - Y$ , для чего винтами 18 и 19 устанавливают и контргайками 22 и 23 фиксируют положение упоров 20 и 21.

Детали опытного образца инерционного измерительного преобразователя угловой скорости с элементами сопло-заслонка приведен на рисунке 3.

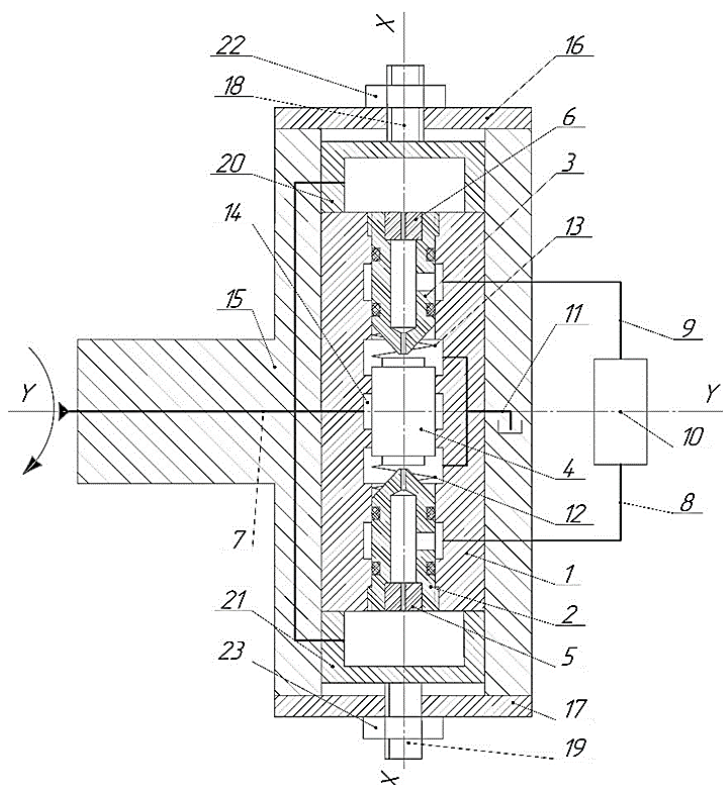


Рис. 2. Конструктивная схема измерительного преобразователя угловой скорости с инерционной заслонкой и соплами: 1 – корпус; 2, 3 – сопла; 4 – инерционная заслонка; 5, 6 – постоянные дроссели; 7 – напорная линия; 8, 9 – линии управления исполнительным элементом; 10 – исполнительный элемент (автоматический регулятор); 11 – сливная линия; 12, 13 – пружины; 14 – гидравлическая опора; 15 – ротор; 16, 17 – крышки; 18, 19 – регулировочные винты; 20, 21 – подвижные упоры; 22, 23 – контргайки /

Fig. 2. Design scheme of angular velocity transducer with inertial flap and nozzles: 1 – housing; 2, 3 – nozzles; 4 – inertial flap; 5, 6 – permanent throttles; 7 – pressure line; 8, 9 – control lines of the executive element; 10 – executive element (automatic regulator); 11 – drain line; 12, 13 – springs; 14 – hydraulic support; 15 – rotor; 16, 17 – covers; 18, 19 – adjusting screws; 20, 21 – movable stops; 22, 23 – lock nuts

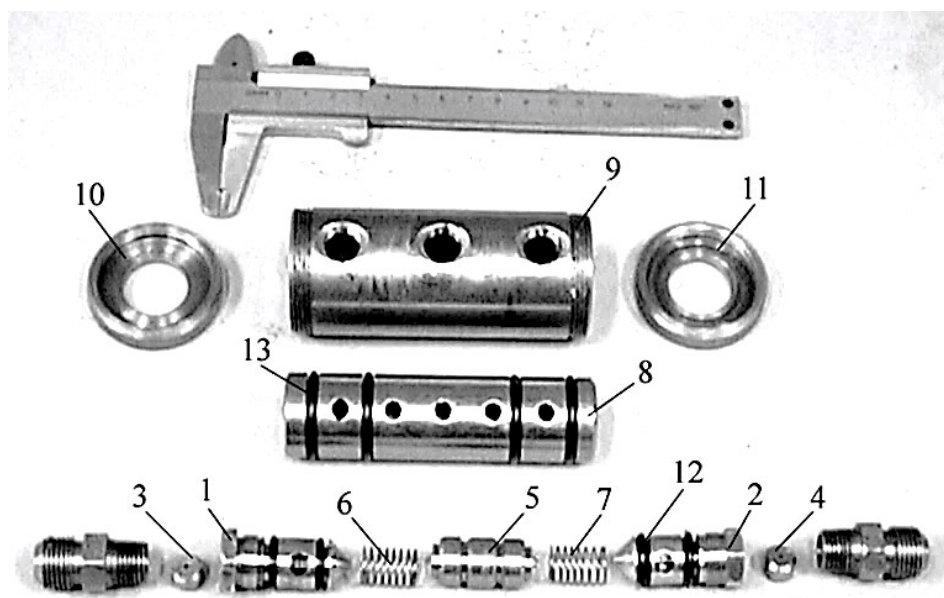


Рис. 3. Детали опытного образца инерционного измерительного преобразователя с элементами сопло-заслонка: 1, 2 – сопла; 3, 4 – постоянные дроссели; 5 – инерционная заслонка; 6, 7 – пружины; 8 – гильза; 9 – корпус; 10, 11 – крышки; 12, 13 – уплотнения /

Fig. 3. Details of the prototype of inertial measuring transducer with elements of nozzle-flap: 1, 2 – nozzles; 3, 4 – permanent throttles; 5 – inertial flap; 6, 7 – springs; 8 – sleeve; 9 – housing; 10, 11 – covers; 12, 13 – seals

Величина настроенного эксцентриситета, масса заслонки и силы пружин определяют чувствительность преобразователя. Изменяя эксцентриситет и предварительный натяг пружин, можно настраивать преобразователь на различные диапазоны измерения угловой скорости.

Подвод и отвод жидкости производится через неподвижный коллектор (на рис. 2 не показан) и каналы, выполненные в корпусе и роторе преобразователя.

Измерительный преобразователь угловой скорости работает следующим образом. Рабочая среда, подведенная с избыточным давлением в гидравлическую опору 14, создает равномерно распределенную по цилиндрической поверхности центрирующую силу, удерживающую заслонку 4 на оси чувствительности  $X - X$ . Жидкость, проходящая из опоры в сливные полости преобразователя и далее в сливную линию 11 через радиальные зазоры между корпусом и заслонкой, предотвращает возникновение сухого трения.

При вращении ротора преобразователя, соединенного с контролируемым объектом, возникает центробежная сила инерции, направленная вдоль оси чувствительности  $X - X$  (на рис. 2, например, в сторону сопла 3). Центробежная сила будет пропорциональна массе заслонки, величине настроенного эксцентриситета и квадрату угловой скорости объекта.

Под действием этой силы заслонка 4 смещается и изменяет гидравлическое сопротивление сопел 2 и 3. Сопротивление истечению масла из сопла 2 уменьшается, а из сопла 3 увеличивается, что приводит к изменению давлений в междроссельных камерах и линиях управления исполнительным элементом, давление в линии 8 уменьшается, а в линии 9 увеличивается. Возникающая разность (перепад) давлений используется как управляющий сигнал на входах исполнительного элемента.

Для формирования выходного сигнала исполнительный элемент 10 выполняется в виде четырехщелевого золотникового распределителя с пружинным центрированием. Под действием разности давлений в линиях 8 и 9 управляющего сигнала и под торцами золотника последний смещается в своем корпусе, изменяя проходные сечения соответствующих щелей и, тем самым, формируя результирующий сигнал, который используется для автоматического управления приводом устройства.

Благодаря сравнительно небольшим габаритным размерам и массе измерительного преобразователя угловой скорости можно уста-

навливать на вращающихся валах привода промышленного оборудования в любом удобном для монтажа и обслуживания месте вне рабочей зоны, при этом ось чувствительности  $X - X$  должна быть перпендикулярна оси вращения  $Y - Y$  контролируемого объекта.

Измерительный преобразователь может быть встроен в детали, передающие вращение рабочим органам оборудования (шкив, муфта, маховик и т. д.), или использоваться в виде отдельного устройства, установленного на вращающихся частях машины.

Для упрощения конструкции разработана схема измерительного преобразователя угловой скорости с неподвижным корпусом, показанная на рисунке 4.

Настройка преобразователя зависит от заданного диапазона измерения угловой скорости, производится при не вращающемся роторе и предусматривает предварительную деформацию пружин регулировочными гайками, что определяет положение конических заслонок, расположенных на центробежных грузах относительно сопел. При этом в измерительной камере устанавливается максимальное рабочее давление жидкости.

Измерительный преобразователь угловой скорости работает следующим образом. При вращении ротора преобразователя, соединенного с контролируемым объектом, возникают центробежные силы инерции, которые воздействуют на грузы, установленные на цилиндрических направляющих, и заставляют их перемещаться радиально от оси вращения.

Конические заслонки смещаются относительно сопел, уменьшая сопротивление течению жидкости в сливную камеру. Давление в измерительной камере и на входе исполнительного элемента уменьшается на величину, пропорциональную угловой скорости вращения объекта.

Недостатком преобразователей, приведенных на рисунках 2 и 4, является невозможность их установки на сплошном валу между опорами. Этот недостаток устранен в измерительном преобразователе угловой скорости с инерционными грузами и элементами сопло-заслонка, конструктивная схема которого в исходном положении показана на рисунке 5.

Входы постоянных дросселей соединены с источником питания рабочей жидкостью с постоянным давлением  $P_{\text{п}}$ . Постоянные дроссели и сопла соединены по мостовой схеме, а междроссельные камеры сопел сообщаются с полостями управления исполнительного механизма 15, включенного в диагональ моста.

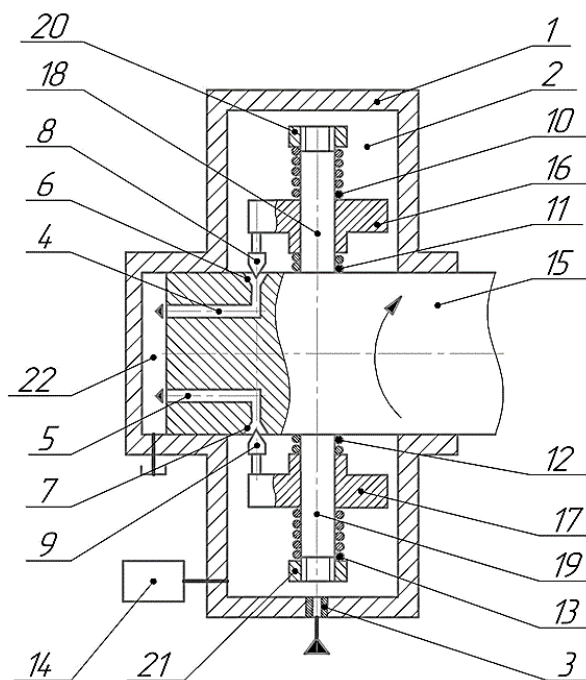


Рис. 4. Измерительный преобразователь угловой скорости с элементами сопло-заслонка: 1 – корпус; 2 – измерительная камера; 3 – постоянное сопротивление; 4, 5 – сливные линии сопел; 6, 7 – сопла; 8, 9 – конические заслонки; 10, 11, 12, 13 – пружины; 14 – исполнительный элемент; 15 – ротор; 16, 17 – центробежные грузы; 18, 19 – цилиндрические направляющие; 20, 21 – регулировочные гайки; 22 – сливная камера /

Fig. 4. Angular velocity transducer with nozzle-flap elements: 1 – body; 2 – measuring chamber; 3 – constant resistance; 4, 5 – nozzle drain lines; 6, 7 – nozzles; 8, 9 – conical flaps; 10, 11, 12, 13 – springs; 14 – actuator; 15 – rotor; 16, 17 – centrifugal weights; 18, 19 – cylindrical guides; 20, 21 – adjusting nuts; 22 – drain chamber

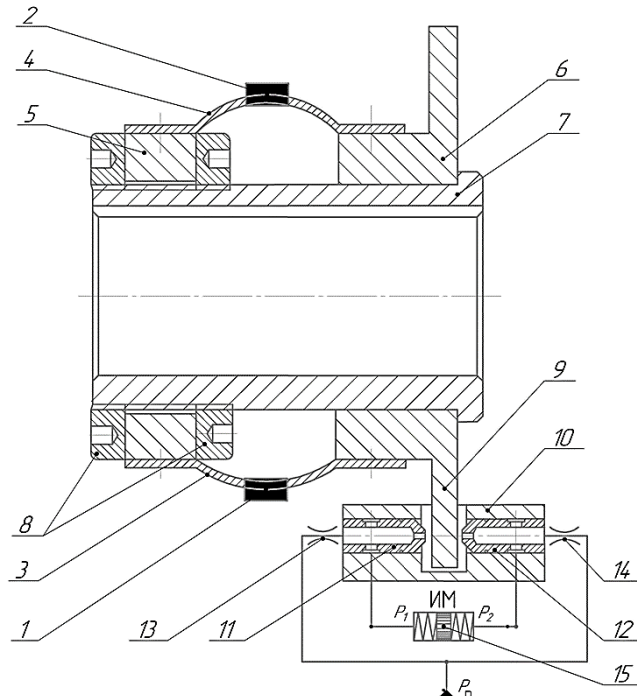


Рис. 5. Измерительный преобразователь угловой скорости с инерционными грузами и элементами сопло-заслонка: 1, 2 – инерционные грузы; 3, 4 – упругие элементы; 5 – неподвижная втулка; 6 – подвижная втулка; 7 – ступица; 8 – регулировочные гайки; 9 – фланец; 10 – неподвижный кронштейн; 11, 12 – сопла; 13, 14 – постоянные дроссели; 15 – исполнительный механизм /

Fig. 5. Angular velocity transducer with inertial weights and nozzle-flap elements: 1, 2 – inertial weights; 3, 4 – elastic elements; 5 – fixed sleeve; 6 – movable sleeve; 7 – hub; 8 – adjusting nuts; 9 – flange; 10 – fixed bracket; 11, 12 – nozzles; 13, 14 – permanent throttles; 15 – actuator

Предварительная настройка измерительного преобразователя включает в себя два этапа. Оба этапа настройки преобразователя выполняются при неработающем приводе обору-дования, когда подвижная втулка с фланцем находится в крайнем правом положении и при-жата упругими элементами к бурту ступицы.

Первый этап настройки предусматривает регулировку положения сопл в кронштейне для настройки одинаковых зазоров между торцами сопл и фланцем подвижной втулки, для чего используют резьбовые соединения сопл с кронштейном. В результате регулировки давления  $P_1$  и  $P_2$  жидкости в линиях управления исполнительного механизма должны быть одинаковыми. Регулировка зазоров для прохода рабочей жидкости между торцами сопл и фланцем обеспечивает настройку преобразователя на заданный диапазон измерения угловой скорости.

Второй этап настройки предусматривает предварительную деформацию упругих элементов, которая настраивается регулировочными гайками, определяющими положение неподвижной втулки на ступице, в зависимости от заданного диапазона измерения угловой скорости.

Измерительный преобразователь угловой скорости работает следующим образом. При вращении механической части преобразователя, соединенной через ступицу с валом привода контролируемого объекта, возникают центробежные силы инерции, которые воздействуют на грузы, закрепленные на упругих элементах, и заставляют их перемещаться радиально от оси вращения. Упругие элементы деформируются на величину, пропорциональную центробежной силе. Деформация упругих элементов приводит к соответствующему перемещению влево подвижной втулки с фланцем.

Фланец подвижной втулки, являющийся заслонкой и расположенный между соплами формирователя выходного сигнала, изменяет зазоры для прохода рабочей жидкости. Зазор между торцом сопла 11 и фланцем уменьшается, а зазор между торцом сопла 12 и фланцем увеличивается. Сопротивление течению жидкости из сопла 11 увеличивается, а из сопла 12 уменьшается, что приводит к изменению давлений в междроссельных камерах сопл и линиях управления исполнительным механизмом. Давление  $P_1$  возрастает, а давление  $P_2$  уменьшается. Возникающая разность давлений (перепад) используется как управляющий сигнал на

входах исполнительного механизма, например, автоматического регулятора адаптивной системы управления гидравлическим приводом машины.

Недостатком данной конструкции является необходимость размещать измерительный преобразователь в закрытых элементах типа коробки скоростей и т. п.

**Результаты и их обсуждение.** Расчет статической характеристики измерительного преобразователя угловой скорости. Расчет статической характеристики измерительного преобразователя угловой скорости выполняется на примере конструкции, изображенной на рисунке 2, т. к. она является наиболее универсальной по способам применения.

При расчетах сделаны следующие общепринятые допущения: рабочая жидкость считается несжимаемой; утечки рабочей жидкости в подвижных соединениях отсутствуют; давление питания задано и остается постоянным; проливочные характеристики сопл с заслонкой, дросселей с постоянным проходным сечением и усилия на заслонке известны; потери давления в соединительных гидравлических линиях и на нерегулируемых участках сопла отсутствуют; давление жидкости на сливе преобразователя равно атмосферному; температура рабочей жидкости постоянна; течение жидкости в сопротивлениях турбулентное, то есть коэффициенты расхода постоянные.

Статическая характеристика измерительного преобразователя угловой скорости устанавливает связь между входным (угловая скорость  $\omega$ ) и выходным (перепад давлений  $\Delta p_{ип}$  в междроссельных камерах) параметрами в установившемся режиме:

$$\Delta p_{ип} = f(\omega). \quad (1)$$

В рассматриваемом преобразователе (рис. 1) чувствительным элементом является инерционная заслонка. Поэтому для определения статической характеристики преобразователя необходимо получить закон перемещения заслонки в установившемся режиме от угловой скорости контролируемого объекта.

Структурная схема измерительного преобразователя угловой скорости представлена на рисунке 6.

Перемещение заслонки определяется не только центробежной силой и силами центрирующих пружин, но и усилием, создаваемым жидкостью, вытекающей из сопл, а также силой трения между заслонкой и корпусом.

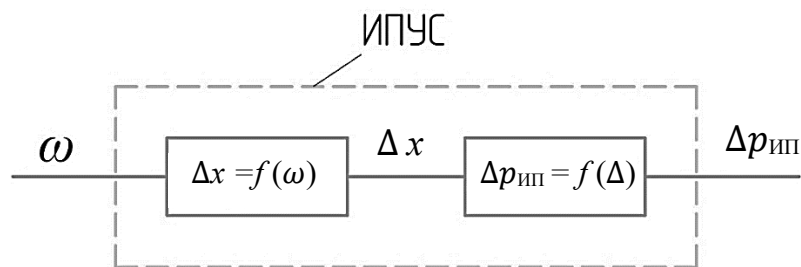


Рис. 6. Структурная схема измерительного преобразователя угловой скорости /  
Fig. 6. Structural diagram of the angular velocity transducer

При равновесии сил на управляющей заслонке:

$$F_{\text{и}} = F_{\text{пр}} + F_{\text{г}} + F_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где  $F_{\text{и}}$  – центробежная сила инерции;  $F_{\text{и}} = m\omega^2 e$ ;  $F_{\text{пр}}$  – усилие от действия центрирующих пружин;  $F_{\text{г}}$  – усилие, создаваемое жидкостью на заслонке, расположенной между двумя соплами;  $F_{\text{тр}}$  – сила сухого трения. Силой вязкого (жидкостного) трения пренебрегаем, так как при установившемся режиме работы преобразователя скорость движения заслонки равна нулю.

Сделаем допущение, что перемещение управляющей заслонки мало, а усилие, создаваемое потоком жидкости, пропорционально лишь перепаду давлений в междроссельных камерах.

Запишем выражение (3), которое представляет собой регулировочную характеристику по давлению  $\Delta p_{\text{ип}}(x)$  измерительного преобразователя (рис. 1) и показывает зависимость перепада давлений в междроссельных камерах от смещения заслонки при ее поступательном движении вдоль оси сопл [19]:

$$\Delta p_{\text{ип}} = p_1 - p_2 = p_{\text{п}} \left[ \frac{a_5^2}{a_5^2 + b_2^2 (x_0 + x)^2} - \frac{a_6^2}{a_6^2 + b_3^2 (x_0 - x)^2} \right], \quad (3)$$

$$a_5 = a_6 = \mu_{\text{др}} \frac{\pi d_{\text{др}}^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}}, \quad (4)$$

$$b_2 = b_3 = \mu_c \pi d_c \sqrt{\frac{2}{\rho}}, \quad (5)$$

где  $p_1, p_2$  – давление в междроссельных камерах измерительного преобразователя угловой скорости;  $p_{\text{п}}$  – давление питания измерительного преобразователя угловой скорости;  $a_5, a_6$  – гидравлические проводимости постоянных дросселей типа шайба;  $b_2, b_3$  – относительные гидравлические проводимости переменных дросселей сопло-заслонка;  $x_0 \pm x$  – текущее изменение зазора между соплом и заслонкой;  $\mu_{\text{др}}$  – коэффициент расхода постоянного дросселя;  $\mu_c$  – коэффициент расхода элемента

сопло-заслонка;  $d_{\text{др}}, d_c$  – диаметры отверстий постоянного дросселя типа шайба и сопла;  $\rho$  – плотность жидкости.

Уравнение (3) нелинейно относительно  $\Delta x = x_0 \pm x$ . Воспользуемся его линейным приближением:

$$\Delta p_{\text{ип}} = \left( \frac{\partial \Delta p_{\text{ип}}}{\partial \Delta x} \right)_{\Delta x=0} \Delta x, \quad (6)$$

где  $\left( \frac{\partial \Delta p_{\text{ип}}}{\partial \Delta x} \right)_{\Delta x=0} = (k_{px})_{\Delta x=0}$  – коэффициент усиления преобразователя по давлению.

Для приближенного расчета силового воздействия потока на заслонку на практике обычно пользуются формулой, которая применима в основном к соплам с соотношением диаметров  $d_{\text{т}}/d_c = 1,2$ , где  $d_{\text{т}}$  – диаметр торца сопла;  $d_c$  – диаметр отверстия сопла [20]:

$$F_{\text{г}} = \frac{\pi d_c^2}{4} \Delta p_{\text{ип}}, \quad (7)$$

где  $\Delta p_{\text{ип}}$  – перепад давлений в диагонали моста.

Линеаризованная характеристика может быть представлена в виде:

$$F_{\text{г}} = S_c k_{px} \pi d_c \Delta x, \quad (8)$$

где  $S_c$  – эффективная площадь отверстия сопла.

Усилие, развиваемое центрирующими пружинами преобразователя при их линейных характеристиках:

$$F_{\text{пр}} = c_{\text{пр}} \Delta x, \quad (9)$$

где  $c_{\text{пр}}$  – суммарная жесткость центрирующих пружин преобразователя.

Сила сухого трения заслонки о стенки корпуса возникает вследствие радиальной неуравновешенности сил, действующих на заслонку, в результате несоосного расположения заслонки относительно корпуса, а также неправильности геометрических форм заслонки и отверстия в корпусе:

$$F_{\text{тр}} = K d l p_{\text{max}} f, \quad (10)$$

где  $K = 0,15 \dots 0,30$  – коэффициент, характеризующий точность изготовления заслонки и корпуса;  $d$  – диаметр заслонки;  $l$  – длина,

на которой может действовать одностороннее давление;  $p_{max}$  – максимальное давление под торцами заслонки;  $f$  – коэффициент трения заслонки о стенки корпуса.

Тогда с учетом выражений (8) – (10) и элементарных преобразований, уравнение (2) примет вид:

$$m\omega^2 e = (c_{пр} + S_c k_p \pi d_c) \Delta x + F_{тр}. \quad (11)$$

Из выражения (11) получим линейное приближение статической характеристики, связывающей входное угловое ускорение и перемещение управляющей заслонки:

$$\Delta x = \frac{m\omega^2 e - F_{тр}}{c_{пр} + S_c k_p \pi d_c} = \omega^2 e K_{п1} - K_{п2}, \quad (12)$$

где  $K_{п1}$  и  $K_{п2}$  – коэффициенты передачи.

Для получения статической характеристики инерционного измерительного преобразователя вида (1) необходимо уравнение (12) подставить в выражение (3). В результате такого преобразования получим:

$$\Delta p_{ип} = \left( \frac{1}{1 + \left(1 - \frac{\omega^2 e K_{п1} - K_{п2}}{x_0}\right)^2} - \frac{1}{1 + \left(1 + \frac{\omega^2 e K_{п1} - K_{п2}}{x_0}\right)^2} \right) P_{п}. \quad (13)$$

Выражение (13) представляет собой статическую характеристику преобразователя угловых скоростей, связывающую внешнее возмущающее воздействие (угловую скорость) и перепад давлений в междроссельных камерах в установившемся режиме работы.

*Рекомендации по выбору конструктивных параметров измерительных преобразователей с элементами сопло-заслонка.* На основе теоретических и экспериментальных исследований, проведенных авторами [21, 22, 23], установлено, что при проектировании измерительных преобразователей сопло-заслонка

предпочтительны следующие соотношения конструктивных параметров устройства:

- постоянное сопротивление дросселя шайба

$$0,5 \text{ мм} < d_{др} < 1,5 \text{ мм}; \frac{d_{др}}{D} < 0,1;$$

$$l_{др} < d_{др}; \quad \xi = 1,5; \quad \mu = 0,8;$$

- переменное сопротивление сопло-заслонка

$$0,5 \text{ мм} < d_c < 1,5 \text{ мм}; 1,2 d_c < d_t < 1,5 d_c;$$

$$d_c < l_c < 2 d_c; L_3 = 3 d_c; \quad 0 < x < 0,1 d_c;$$

$$60^\circ < \theta < 90^\circ; 1 < \xi < 1,5; \quad \mu = 0,7 \dots 0,8.$$

Следует отметить, что при диаметрах отверстий постоянного дросселя  $d_{др}$  и сопла  $d_c$  меньше 0,5 мм, а также при  $x_0 - x < 0,02$  мм возможно возникновение облитерации, то есть зарастивание проходных сечений сопротивлений поляризованными молекулами жидкости, что нарушает работоспособность измерительного преобразователя угловых скоростей.

**Выводы.** Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования подтверждают актуальность применения измерительных преобразователей различного назначения, в том числе устройства на базе гидравлического усилителя сопло-заслонка.

Полученное выражение статической характеристики предложенной конструкции измерительного преобразователя угловой скорости с инерционной заслонкой и соплами позволяет определить конструктивные параметры его элементов и на их основе динамические характеристики.

Рекомендуемые параметры элементов ИПУС следующие: диаметр отверстия сопла в интервале 0,5–1,5 мм, диаметр торца сопла в интервале 1,2–1,5 диаметра отверстия сопла, ход заслонки до 0,1 диаметра отверстия сопла.

#### Список литературы

1. Chetverikova I., Popikov P., Glushkov S. Improving the efficiency of manipulator-type machines with an improved hydraulic drive. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;875(1):012055. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012055>
2. Glushkov S., Popikov P., Chetverikova I., Druchinin D. Reduction of dynamic loads on the hydraulic drive of forest boom lifter. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020;595(1):012023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012023>
3. Lagerev A. V., Tarichko V. I., Lagerev I. A. Modeling of hydrodynamic and kinematic processes during the operation of a mobile cargo rope complex. Journal of Physics: Conference Series. 2021;1753(1):012022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012022>
4. Kumar M., Naik S. M., Rahul D., Kumar S. N. S. S. Design modification in hydraulic puller for increased efficiency for dismantling TTC coupling. AIP Conference Proceedings. 2021;2358(1):050019. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0058136>

5. Mitov A., Slavov T., Krlev J. Robustness Analysis of an Electrohydraulic Steering Control System Based on the Estim-at-ed Uncertainty Model. Information (Switzer-land). 2021;12(12):512.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/info12120512>
6. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Automatic control system for electrohydraulic drive of production equip-ment. Russian Internet Journal of Industrial Engineering. 2018;6(2):8501609.  
URL: <https://journals.i-publ.ru/index.php/IndEng/article/view/2852>
7. Yan X., Chen B. Analysis of a novel automatic control approach for the free forging hammer. Applied Sciences. 2020;10(24):9127. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10249127>
8. Medvedev Y. A., Kuznetsov V. P. Dynamics of a Multimotor Electrohydraulic Drive in an Automatic Control System. Russian Engineering Research. 2011;31(6):527–538.  
URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X11060165>
9. Neyezhnikov P., Zakharov I. Determination of the time constant of measuring transducers. Measurement: Sensors. 2021;18:100278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100278>
10. Rybaczuk D. Application of the mems accelerometer as the position sensor in linear electrohydraulic drive. Sensors. 2021;21(4):1479. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041479>
11. Lytviak O., Komar S., Derevyanko O., Duriev V. Devising quality control criteria for manufacturing control valves of the type «Nozzle-Flap». Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021;1/1(109):12–34.  
URL: <https://zenodo.org/records/4772583>
12. Корнюшенко С. И. Гидроусилители типа «сопло-заслонка» и «струйная трубка». СТТ: Строительная техника и технологии. 2015;(7(115)):76–79. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25675609> EDN: VPWISF
13. Ермишин А. В. Исследование влияния давления питания на работу электрогидравлического усилителя типа сопло-заслонка. Гидравлика. 2023;(20):115–124.  
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54829568> EDN: VVZXXF
14. Очкур Г. В. Расчет динамической характеристики электрогидравлического преобразователя типа сопло-заслонка для модернизации системы управления топливоподачей двигателя автомобиля. Вестник Брянского государственного технического университета. 2020;(5(90)):32–38.  
DOI: <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-5-32-38> EDN: FXMFEW
15. Авроров В. А., Мурашкина О. А., Сарафанкина Е. А. Определение величины прогиба оси ротора диспергатора численными методами. XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022;11(2):55–58.  
DOI: <https://doi.org/10.46548/21vek-2022-1158-0009> EDN: XDQAVQ
16. Овтов В. А., Орехов А. А., Поликанов А. В., Чиркова Н. С., Фролов Д. А., Колдаев Н. Н., Костромитин А. С., Девликамов Р. И. Моделирование напряженно-деформированного состояния вала роторного лопастного ориентирующего устройства. Нива Поволжья. 2022;(3(63)):3001.  
DOI: <https://doi.org/10.36461/NP.2022.63.3.003> EDN: IYOZWW
17. Мачнев А. В., Мачнев В. А., Мачнева О. Ю., Быков А. В., Шилина В. Д., Черняев Д. О. Теоретическое обоснование трехлопастного ротационного питателя. Нива Поволжья. 2022;(2(62)):3002.  
DOI: <https://doi.org/10.36461/NP.2022.62.2.005> EDN: RMJIZI
18. Симанин Н. А., Голубовский В. В. Измерительный преобразователь угловой скорости: пат на полезную модель №188919 Российская Федерация. № 2018147346; заявл. 27.12.2018; опубл. 29.04.2019. Бюл. № 13. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38146615> EDN: BUJPK
19. Симанин Н. А., Голубовский В. В. Проектирование элементов и систем автоматического регулирования гидравлических приводов технологического оборудования: монография. Пенза: Пензенский государственный технологический университет, 2015. 180 с.
20. Урекин В. С., Истомина Ю. В. Разработка гидравлических систем автоматического управления приводами технологического оборудования. Инновации технических решений в машиностроении и транспорте: сб. ст. II Всеросс. науч.-техн. конф. для молодых ученых и студентов с международным участием, Пенза, 15–17 апреля 2016 года. Пенза: Пензенская государственная сельскохозяйственная академия, 2016. С. 259–262. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26518376> EDN: WIHVRJ
21. Golubovsky V., Konovalov V., Doncova M. Modeling static characteristics of angular velocity measuring transducer of the "nozzle-damper" type. Journal of Physics: Conference Series. 2020;1614:012084.  
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012084>
22. Golubovsky V., Konovalov V., Doncova M. Modelling the force action of a liquid on the shutter of a measuring transducer. E3S Web of Conferences. Key Trends in Transportation Innovation (KTTI 2019). 2020;157:02007.  
DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015702007>
23. Golubovsky V., Konovalov V., Doncova M. Influence of flapper-nozzle transducer parameters on the flow rate amplification factor. Transportation Research Procedi. 2022;63:853–858.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.082>

*References*

1. Chetverikova I., Popikov P., Glushkov S. Improving the efficiency of manipulator-type machines with an improved hydraulic drive. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;875(1):012055. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012055>
2. Glushkov S., Popikov P., Chetverikova I., Druchinin D. Reduction of dynamic loads on the hydraulic drive of forest boom lifter. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020;595(1):012023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012023>
3. Lagerev A. V., Tarichko V. I., Lagerev I. A. Modeling of hydrodynamic and kinematic processes during the operation of a mobile cargo rope complex. Journal of Physics: Conference Series. 2021;1753(1):012022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012022>
4. Kumar M., Naik S. M., Rahul D., Kumar S. N. S. S. Design modification in hydraulic puller for increased efficiency for dismounting TTC coupling. AIP Conference Proceedings. 2021;2358(1):050019. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0058136>
5. Mitov A., Slavov T., Králev J. Robustness Analysis of an Electrohydraulic Steering Control System Based on the Estimated Uncertainty Model. Information (Switzerland). 2021;12(12):512. DOI: <https://doi.org/10.3390/info12120512>
6. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Automatic control system for electrohydraulic drive of production equipment. Russian Internet Journal of Industrial Engineering. 2018;6(2):8501609. URL: <https://journals.i-publ.ru/index.php/IndEng/article/view/2852>
7. Yan X., Chen B. Analysis of a novel automatic control approach for the free forging hammer. Applied Sciences. 2020;10(24):9127. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10249127>
8. Medvedev Y. A., Kuznetsov V. P. Dynamics of a Multimotor Electrohydraulic Drive in an Automatic Control System. Russian Engineering Research. 2011;31(6):527–538. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X11060165>
9. Neyezhnikov P., Zakharov I. Determination of the time constant of measuring transducers. Measurement: Sensors. 2021;18:100278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100278>
10. Rybarczyk D. Application of the mems accelerometer as the position sensor in linear electrohydraulic drive. Sensors. 2021;21(4):1479. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041479>
11. Lytviak O., Komar S., Derevyanko O., Durieiev V. Devising quality control criteria for manufacturing control valves of the type «Nozzle-Flap». Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021;1/1(109):12–34. URL: <https://zenodo.org/records/4772583>
12. Korniyushenko S. I. Hydraulic amplifiers of the "nozzle-flap" and "jet tube" type. *STT: Stroitel'naya tekhnika i tekhnologii* = Construction Equipment and Technologies. 2015;(7(115)):76–79. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25675609>
13. Ermishin A. V. Investigation of the effect of supply pressure on the operation of an electrohydraulic nozzle-flap type amplifier. *Gidravlika*. 2023;(20):115–124. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54829568>
14. Ochkur G. V. Dynamic characteristics calculation for electro-hydraulic converter of nozzle-flap type for modernization of system for motor-car fuel feeding control. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of Bryansk state technical university. 2020;(5(90)):32–38. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-5-32-38>
15. Avrorov V. A., Murashkina O. A., Sarafankina E. A. Determination of the deflection value of the rotor axis of a high-speed dispersant by numerical methods. *XXI vek: Itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* = XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus. 2022;11(2):55–58. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.46548/21vek-2022-1158-0009>
16. Ovtov V. A., Orekhov A. A., Polikanov A. V., Chirkova N. S., Frolov D. A., Koldaev N. N., Kostromitin A. S., Devlikamov R. I. Modelling the stress-strain state of the rotary paddle orienting device shaft. *Niva Povolzh'ya* = Volga Region Farmland. 2022;(3(63)):3001. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36461/NP.2022.63.3.003>
17. Machnev A. V., Machnev V. A., Machneva O. Yu., Bykov A. V., Shilina V. D., Chernyaev D. O. Theoretical substantiation of three-blade rotary feeder. *Niva Povolzh'ya* = Volga Region Farmland. 2022;(2(62)):3002. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36461/NP.2022.62.2.005>
18. Simanin N. A., Golubovskiy V. V. Angular velocity measuring converter: pat for a utility model RF. No. 188919. 2019. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38146615>
19. Simanin N. A., Golubovskiy V. V. Design of elements and systems of automatic control of hydraulic drives of technological equipment: monograph. Penza: *Penzskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet*, 2015. 180 p.
20. Urekin V. S., Istomina Yu. V. Development of hydraulic automatic control system drives technological equipment. Innovations of technical solutions in mechanical engineering and transport: collection of articles of the II All-Russian Scientific and Technical Conference for Young Scientists and Students with international participation, Penza, April 15-17, 2016. Penza: *Penzskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya*, 2016. pp. 259–262. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26518376>

21. Golubovsky V., Konovalov V., Doncova M. Modeling static characteristics of angular velocity measuring transducer of the "nozzle-damper" type. Journal of Physics: Conference Series. 2020;1614:012084.

DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012084>

22. Golubovsky V., Konovalov V., Doncova M. Modelling the force action of a liquid on the shutter of a measuring transducer. E3S Web of Conferences. Key Trends in Transportation Innovation (KTTI 2019). 2020;157:02007.

DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015702007>

23. Golubovsky V., Konovalov V., Doncova M. Influence of flapper-nozzle transducer parameters on the flow rate amplification factor. Transportation Research Procedi. 2022;63:853–858.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.082>

#### *Сведения об авторах*

**Голубовский Виталий Вадимович**, кандидат техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, г. Пенза, Российская Федерация, 440039, e-mail: [prk@penzgtu.ru](mailto:prk@penzgtu.ru),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3952-187X>

**Симанин Николай Алексеевич**, кандидат техн. наук, профессор, кафедра «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, Российская Федерация, 440039, e-mail: [prk@penzgtu.ru](mailto:prk@penzgtu.ru),

✉ **Коновалов Владимир Викторович**, доктор техн. наук, профессор, кафедра «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, Российская Федерация, 440039, e-mail: [prk@penzgtu.ru](mailto:prk@penzgtu.ru),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5011-5354>, e-mail: [konovalov-penza@rambler.ru](mailto:konovalov-penza@rambler.ru)

#### *Information about the authors*

**Vitaly V. Golubovsky**, PhD in Engineering, associate professor, Head of the Department «Machine Building Technology», Penza State State Technological University, Baidukova Ave/Gagarina St., 1a/11, Penza, Russian Federation, 440039, e-mail: [prk@penzgtu.ru](mailto:prk@penzgtu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3952-187X>

**Nikolay A. Simanin**, PhD in Engineering, professor, Department «Machine Building Technology», Penza State Technological University, Penza, Baidukova Ave/Gagarina St., 1a/11, Russian Federation, 440039, e-mail: [prk@penzgtu.ru](mailto:prk@penzgtu.ru)

✉ **Vladimir V. Konovalov**, DSc in Engineering, professor, Department «Machine Building Technology», Penza State Technological University, Penza, Baidukov Ave/Gagarina St., 1a/11, Russian Federation, 440039, e-mail: [prk@penzgtu.ru](mailto:prk@penzgtu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5011-5354>, e-mail: [konovalov-penza@rambler.ru](mailto:konovalov-penza@rambler.ru)

✉ – Для контактов / Corresponding author