



## Повышение качества проведения испытаний гидравлической аппаратуры на специализированном измерительном стенде

<b>Ю. А. Гладили</b>	кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории - главный акустик; АО «Концерн «НПО «Аврора», г. Санкт-Петербург ; gladil_01@mail.ru
<b>А. А. Франтов</b>	кандидат технических наук, старший научный сотрудник - заместитель главного акустика; АО «Концерн «НПО «Аврора», г. Санкт-Петербург; aafantov@gmail.com
<b>А. Н. Видяски</b>	аспирант; Самарский университет, г. Самара; vidiaskina@yandex.ru
<b>Э. Г. Берестовицкий</b>	доктор технических наук, старший научный сотрудник; г. Санкт-Петербург; berest40@mail.ru

*Испытания оборудования являются важнейшим этапом его создания. Повышение качества проведения испытаний гидравлической аппаратуры связано с разработкой мероприятий по снижению уровней собственных помех стендов, повышению степени автоматизации процессов испытаний и поддержанию стабильности параметров гидросистем стендов.*

*Стенды для контроля акустических и вибрационных характеристик гидравлической аппаратуры являются достаточно сложными инженерными сооружениями. В их состав входят насосные агрегаты, регулирующая и предохранительная арматура, сами трубопроводы с фасонными элементами. Для возможности получения в ходе стендового контроля достоверных данных необходимо принять все возможные меры для снижения уровней акустических помех от работающих стендовых механизмов до значений гораздо меньших, чем уровни акустического возмущения, создаваемые работающим контролируемым гидравлическим прибором.*

*Система комплексной автоматизации процессов проведения испытаний предназначена для автоматизации установки и поддержания режимов, процессов измерений и обработки полученных результатов. Она включает в себя систему задания и поддержания режимов, а также виброизмерительный комплекс.*

*Система задания и поддержания режимов позволяет с пультов управления, установленных на измерительных участках, входящих в состав стендовых установок, дистанционно управлять следующими процессами:*

- автоматизированной установкой параметров расхода рабочей жидкости и давлений в магистралях стенда;
- включением и выключением насосных агрегатов;
- изменением частоты вращения электроприводов насосных агрегатов;
- работой запорной и регулирующей арматуры.

*В процессе совершенствования стенда был разработан и реализован оригинальный способ программного управления заданием и поддержанием параметров рабочей среды. Применение этого способа позволяет обеспечить минимизацию уровней вибрации и шумности от оборудования и регулирующих органов стенда путём оптимизации комбинации параметров их работы.*

**Ключевые слова:** измерительный стенд; частотное регулирование; виброакустическая защита; система управления; шум; вибрация

**Цитирование:** Гладилин, Ю. А. Повышение качества проведения испытаний гидравлической аппаратуры на специализированном измерительном стенде / Ю. А. Гладилин, А. А. Франтов, А. Н. Видяскина, Э. Г. Берестовицкий // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10, №3. – С. 111-120. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-3-111-120

---

## Введение

Испытания (определение характеристик) оборудования являются важнейшим этапом его изготовления. Повышение качества проведения испытаний гидравлической аппаратуры связано с разработкой мероприятий по снижению уровней собственных помех стендов, повышению степени автоматизации процессов испытаний и поддержанию стабильности параметров гидросистем стендов [1, 7, 8].

Стенды для контроля акустических и вибрационных характеристик гидравлической аппаратуры являются достаточно сложными инженерными сооружениями. В их состав входят насосные агрегаты, регулирующая и предохранительная арматура, сами трубопроводы с фасонными элементами. Для возможности получения в ходе стендового контроля достоверных данных необходимо принять все возможные меры для снижения уровней акустических помех от работающих стендовых механизмов до значений гораздо меньших, чем уровни акустического возмущения, создаваемые работающим контролируемым гидравлическим прибором [2, 4].

Система комплексной автоматизации процессов проведения испытаний предназначена для автоматизации установки и поддержания режимов, процессов измерений и обработки полученных результатов. Она включает в себя систему задания и поддержания режимов, а также виброизмерительный комплекс.

Система задания и поддержания режимов позволяет с пультов управления, установленных на измерительных участках, входящих в состав стендовых установок, дистанционно управлять следующими процессами [5]:

- автоматизированной установкой параметров расхода рабочей жидкости и давлений в магистралях стенда;
- включением и выключением насосных агрегатов;
- изменением частоты вращения электроприводов насосных агрегатов;
- работой запорной и регулирующей арматуры.

### 1 Снижение собственной помехи стенда

Важной проблемой для выполнения исследований виброакустических характеристик (ВАХ) гидравлического оборудования является корректное их определение (и прежде всего гидродинамического шума – ГДШ) в условиях значительных акустических и гидродинамических помех, возбуждаемых различным стендовым оборудованием [6]. На примере специализированного трубопроводного, насосного измерительного стенда приводится ряд технических решений, позволяющих бороться с источниками собственных помех на измерительном участке. Укрупненная схема стенда по исследованию ВАХ оборудования гидравлических систем представлена на рисунке 1.

При испытаниях требуемые режимы устанавливаются за счет совместного управления клапанами: напорным НК, сливным СК, и байпасным БК. ВАХ испытуемого оборудования

определяются по пульсациям давления до и после объекта, а также по вибрации и шуму гидроприбора [1].

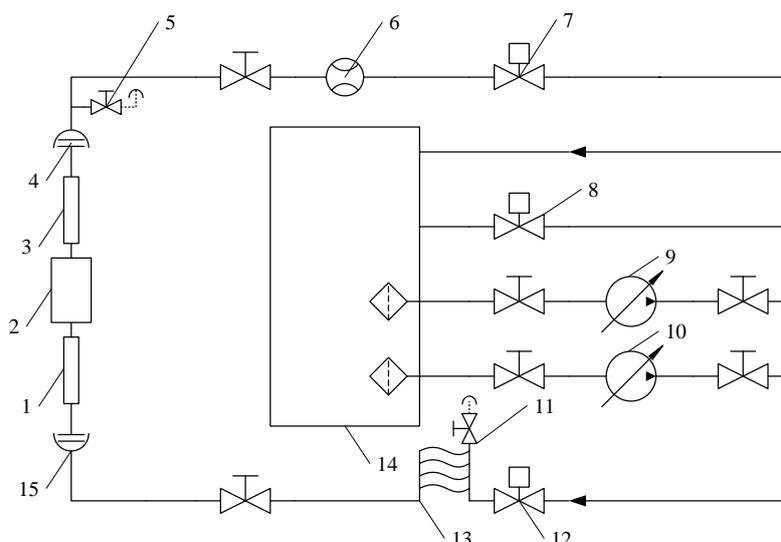


Рисунок 1 – Схема испытательного насосного стенда:

1, 3 – измерительные участки; 2 – объект испытаний; 4, 15 – компенсаторы длины; 5, 11 – клапаны вентиляции; 6 – расходомер; 7, 8, 12 – регулируемые клапаны; 9, 10 – насосные агрегаты; 13 – виброразвязка; 14 – бак

Для снижения собственных виброакустических помех испытательного трубопроводного стенда наиболее эффективны следующие меры:

- применение новых эффективных гасителей колебаний и шума в трубопроводных системах;
- оптимизация трассировки трубопроводов непосредственно вблизи виброизмерительных участков (ВИУ);
- применение эффективных средств вибро- и шумогашения на поверхности магистральных трубопроводов.

Одним из основных источников, вносящих существенный вклад в формирование собственного ГДШ на ВИУ стенда, является трубопровод сливной магистрали. Его трассировка закладывалась таким образом, чтобы в помещении измерительного участка стенда развернуть поток рабочей жидкости на 180°. Это достигалось путём «закольцовки» сливного трубопровода Ду200. Такое конструктивное решение позволило реализовать плавный разворот потока в стеснённых габаритах помещения измерительного участка. При этом в ходе эксплуатации выявилось его возрастающее влияние на формирование стендовой помехи с ростом объёмного расхода.

Для снижения собственных помех стенда необходимо отказаться от плавного кольцевого участка сливной магистрали в пользу резкого изменения направления движения потока рабочей жидкости в конце сливного трубопровода на измерительном участке. При этом в месте разворота установлены специальные ёмкости, совмещающие в себе как возможности гибкой развязки, так и свойства гасителей пульсации потока [3]. Такие устройства выполняют на ВИУ стенда роль виброакустической защиты (ВАЗ).

Эффективность виброизоляции ВАЗ можно оценить (пренебрегая трением) из следующей зависимости:

$$\Delta L_{ВИ} = 20 \cdot \log \left( 1 + \frac{f^2}{f_c^2} \right), \quad (1)$$

где  $f$  - частота внешнего возмущения,  $f_c$  - собственная частота амортизаторов.

Расчёты по представленной выше формуле показывают, что данные меры позволяют обеспечить виброизоляцию даже при частоте 5 Гц свыше 11 дБ.

Эффективность комплекта ёмкостей по снижению ГДШ оценивается по формуле:

$$\Delta L = 20 \lg \left( \frac{Y_c}{Y_{и} + Y_{нагр}} \right), \quad (2)$$

где  $Y_c$ ,  $Y_{и}$ ,  $Y_{нагр}$  – акустическая проводимость ёмкостей, источника и нагрузки. При этом  $Y_c = V \cdot \omega / V_{см}$ ,  $Y_{и} = Y_{нагр} = 1/Z_v$ , при этом  $V$  – объём ёмкости,  $V_{см}$  – объёмная жёсткость жидкости в ёмкости с воздушной полостью,  $\omega$  – частота колебаний,  $Z_v = \rho \cdot a / S$  – выходное сопротивление входного и выходного трубопровода ( $S$  – площадь сечения трубы).

Расчёты по последней формуле показали, что даже при минимальной необходимой частоте 20 Гц снижение ГДШ составляет около 5 дБ.

Общая схема модернизированного измерительного участка приведена на рисунке 2.

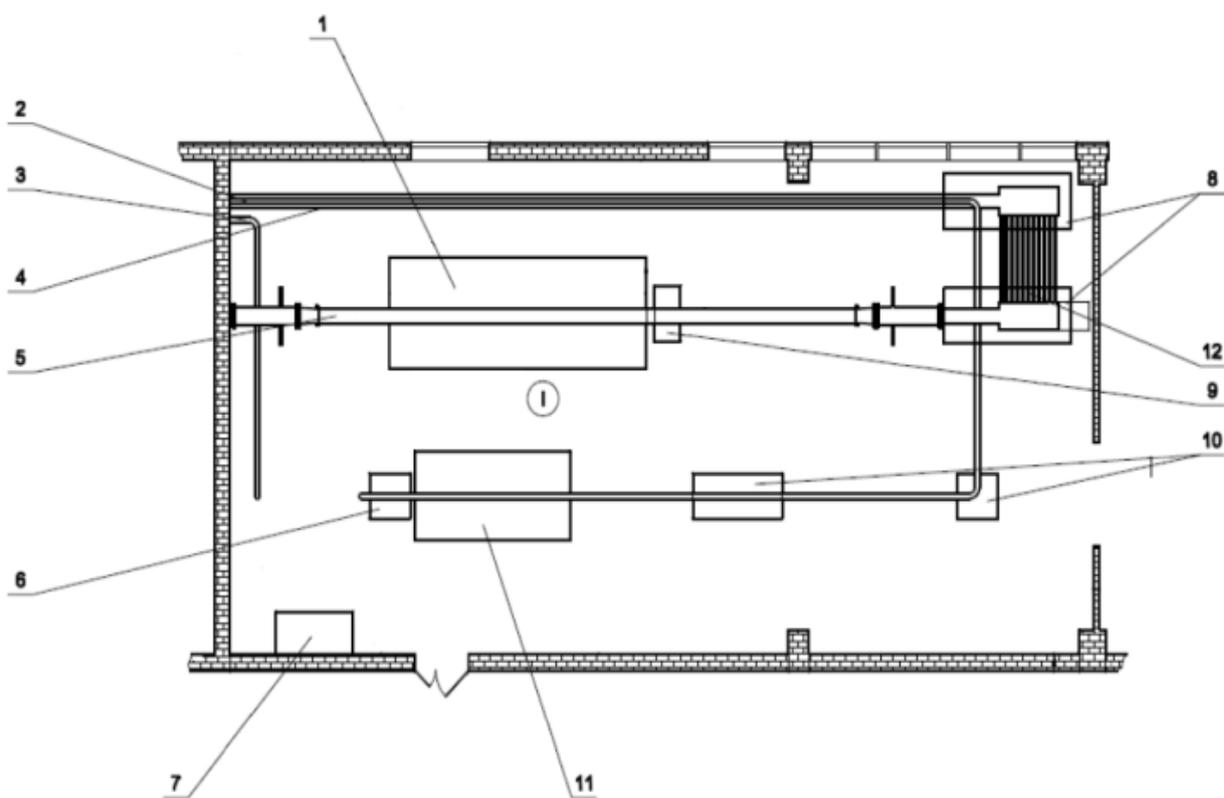


Рисунок 2 – Схема испытательного насосного стенда после модернизации:

1 – амортизированная платформа; 2 – напорный трубопровод «малого» ИУ; 3 – сливной трубопровод «малого» ИУ; 4 – сливной трубопровод «Основного» ИУ; 5 – напорный трубопровод «Основного» ИУ; 6, 8, 10 – виброзадерживающий массив; 7 – пульт дистанционного управления; 9 – сливной приямок; 11 – амортизированная платформа; 12 – виброакустическая защита (ВАЗ)

По результатам проведённой реконструкции были выполнены контрольные испытания собственного ГДШ стенда. На измерительном участке был установлен режим №1. Его результаты в сравнении с первоначальными данными приведены на рисунке 3.

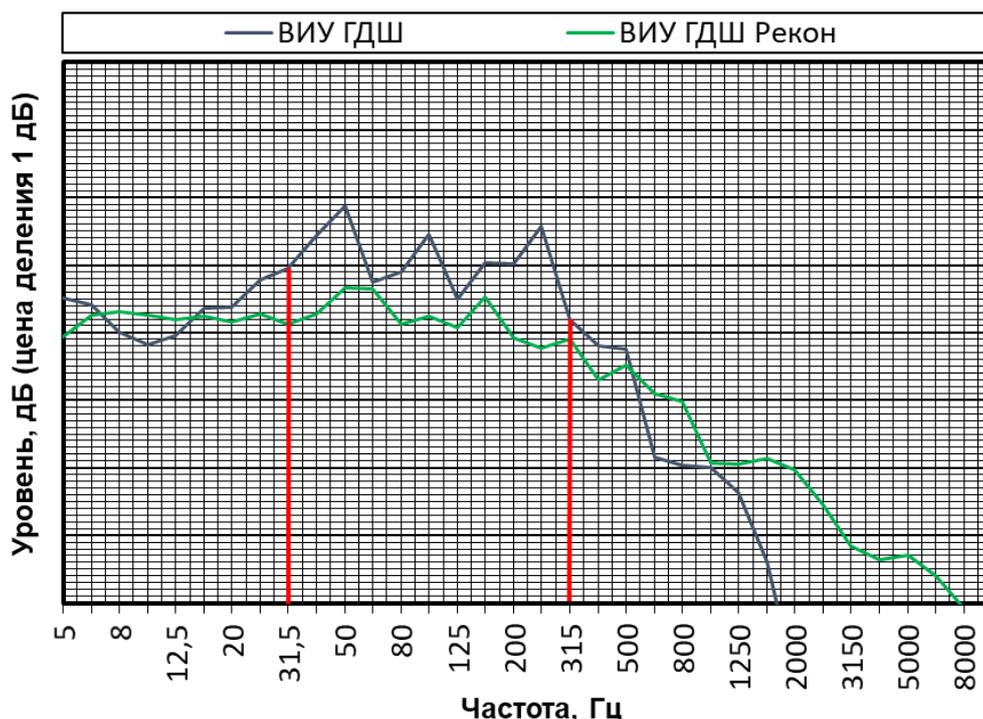


Рисунок 3 – Сравнение уровней ГДШ на измерительном участке стенда на режиме №1 по результатам модернизации.

Применение технических решений, реализованных в комплекте ВА3, позволило виброизолировать сливную магистраль гидросистемы стенда от ВИУ, а также снизило влияние сливного клапана как источника шума (рисунок 4).

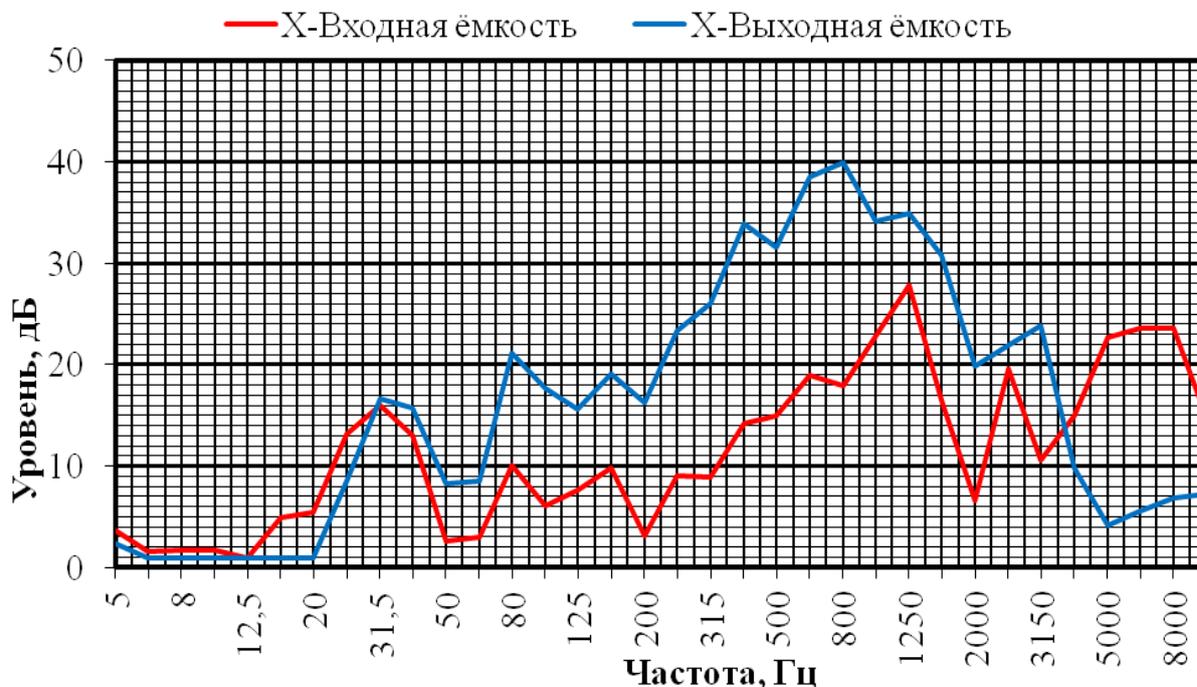


Рисунок 3 – Вибрационные характеристики на фланцах входной и выходной ёмкостей ВА3 в направлении X (по потоку рабочей жидкости)

## 2 Применение частотного регулирования при проведении испытаний

Для уменьшения уровней собственных вибрационных и шумовых помех стенда путём минимизации влияния проточных частей управляющих клапанов внедрены системы частотного регулирования электроприводами насосных агрегатов [2]. При установке преобразователя частоты (ПЧ) скорость вращения ротора трёхфазного асинхронного двигателя насоса регулируется за счёт преобразования напряжения питания переменного тока в напряжение постоянного тока, которое впоследствии снова преобразуется в напряжение с переменной частотой и амплитудой. Управление ПЧ осуществляется с помощью ПЭВМ со специальным программным обеспечением на основе SCADA.

Регулирование оборотной частотой электропривода насосного агрегата позволило сместить дискретную составляющую спектра, соответствующую оборотной частоте привода, в низкочастотную область, что в случае измерения вибрационных и шумовых характеристик испытываемого изделия позволяет минимизировать влияние насосной установки на получаемые характеристики.

Ещё одним положительным результатом от использования ПЧ в составе насосной установки стенда стала возможность перераспределять параметры открытия управляющих клапанов стенда. Тем самым, в широком диапазоне меняя гидравлические сопротивления управляющих клапанов, появилась возможность подбирать оптимальный режим проведения испытаний гидроаппаратуры с минимальным влиянием стендовой вибрационной и шумовой помехи на измерительный участок стенда.

Кроме того, работа насосного агрегата становится менее нагруженной, т.к. производится плавный запуск и остановка, что увеличивает ресурс работы агрегата. Внешний вид насосного агрегата ЦНС 105-490 и частотного преобразователя, а также график изменения вибрационной характеристики насосного агрегата в зависимости от частоты вращения привода приведены на рисунке 4.

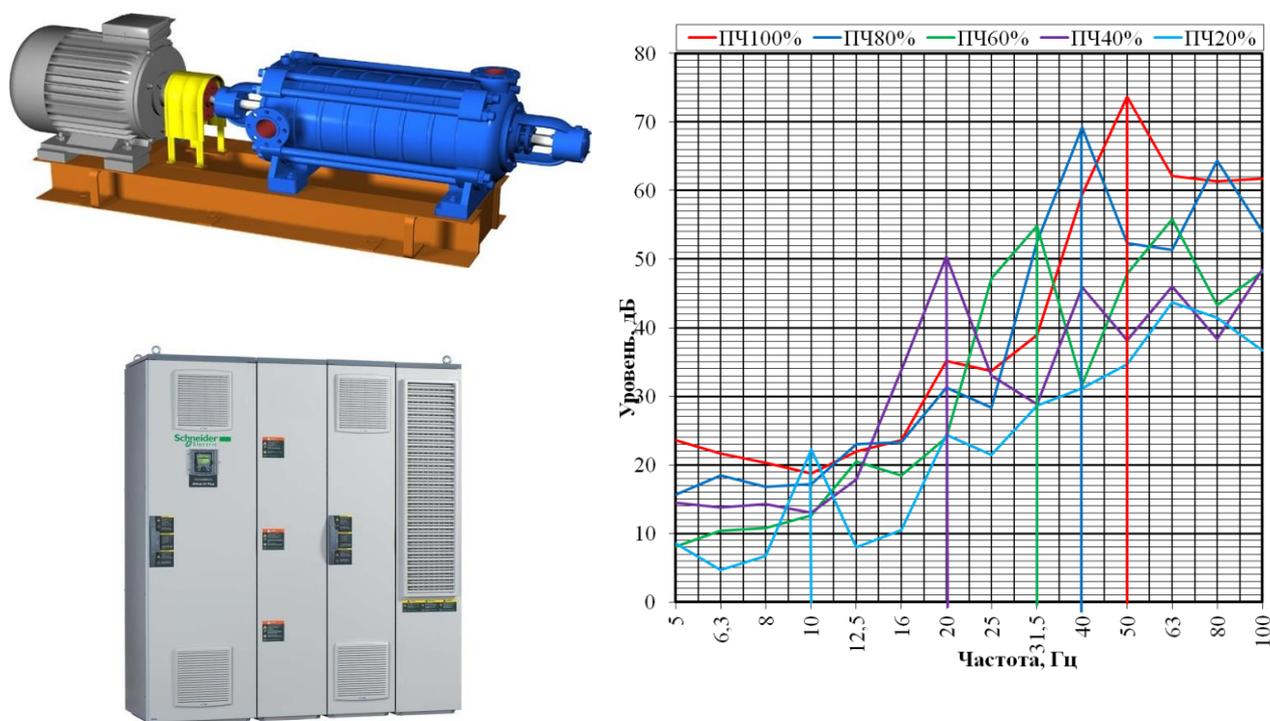


Рисунок 4 – Насосное оборудование и график смещения оборотной частоты агрегата в зависимости от заданных параметров ПЧ.

Интерфейс панели управления работой автоматизированного специализированного измерительного стенда для испытаний гидравлической аппаратуры представлен на рисунке 5.

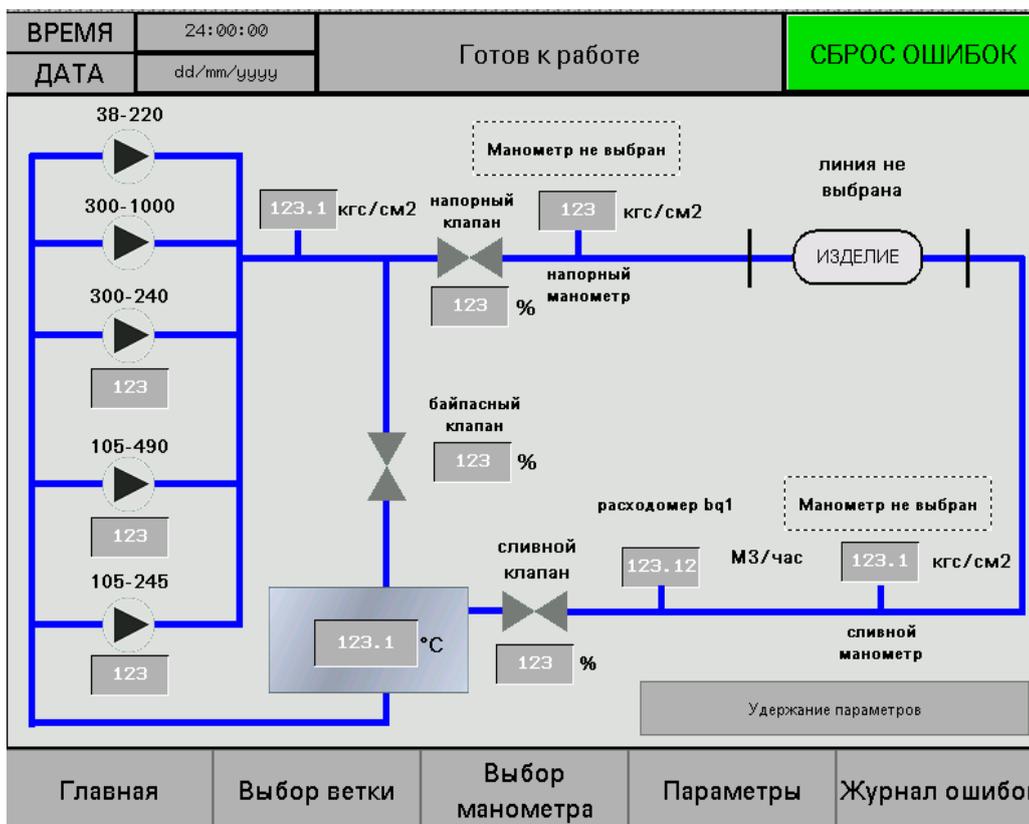


Рисунок 5 – Главный экран панели управления работой автоматизированного специализированного измерительного стенда.

Заданием конкретных значений уставок на главной панели управления можно регулировать частоту вращения насосных агрегатов и степень открытия регулирующих клапанов, таким образом задается режим испытания, а затем осуществляется автоматическое поддержание параметров заданного режима.

### Заключение

В процессе совершенствования стенда был разработан и реализован оригинальный способ программного управления заданием и поддержанием параметров рабочей среды. Применение этого способа позволяет обеспечить минимизацию уровней вибрации и шумности от оборудования и регулирующих органов стенда путём оптимизации комбинации параметров их работы.

### Список использованных источников

1. Берестовицкий, Э. Г. Создание насосного стенда измерения вибрации и шума перспективных гидравлических приборов / Э.Г. Берестовицкий, Ю.А. Гладилин, А.А. Франтов // Сборник тезисов и докладов по результатам конференции «Динамика и виброакустика машин» (17-21 июля 2018 г.) / Самара, Самарский университет. – Самара, 2018.
2. Берестовицкий, Э. Г., Гладилин, Ю. А., Франтов, А. А. Регулирование параметров рабочей среды с помощью насосной установки переменной производительности в условиях стенда СУ ПЭУ /

Э. Г. Берестовицкий, Ю. А. Гладилин, А. А. Франтов // Науч.-техн. сб. АО «Концерн «НПО «Аврора»: «Системы управления и обработки информации». – 2019. – март. – №1(44) – С. 82-92.

3. Берестовицкий, Э. Г. Оценка эффективности комплекса мер по снижению собственных виброакустических помех испытательного трубопроводного стенда / Э. Г. Берестовицкий, А. Н. Видяскина, Ю. А. Гладилин, А. А. Франтов // Труды VI международной конференции «Динамика и виброакустика машин» (21-23 сентября 2022) / Самара, Самарский университет. – Самара, 2022. – С.96-98.

4. Берестовицкий, Э. Г. Распространение колебательной мощности по трубопроводам стенда / Э. Г. Берестовицкий, Ю. А. Гладилин // Системы управления и обработки информации. – 2021. – № 4 (55). – С. 65-74.

5. Берестовицкий, Э. Г. Разработка методов и средств снижения вибрации и шума гидравлических приборов систем управления техническими средствами: специальность 01.04.06 «Акустика»: диссертация ... доктора технических наук / Э. Г. Берестовицкий. – Санкт-Петербург, 2011.

6. Гладилин, Ю. А. Снижение акустической помехи гидравлического стенда за счет управления частотой вращения электропривода насоса и применения гасителей гидродинамического шума / Ю. А. Гладилин., Г. М. Макарянц // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2014. – № 1 (27). – С. 6-12.

7. Crocker, M. J. Handbook of Noise and Vibration Control [Text] / Ed. Malcolm, M. J. Crocker // N.Y. : John Wiley and Sons. – 2007. – 1584 p.

8. Смольяков, А. В. Шум турбулентных потоков [Текст] / А. В. Смольяков. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2005. – 312 с.

## Improving the quality of testing of hydraulic equipment on a specialized measuring stand

<b>Yu. A. Gladilin</b>	Candidate of Science (Engineering), Head of the Laboratory - Chief Acoustician; Concern Avrora Scientific and Production Association JSC, Saint-Petersburg, Russian Federation; gladil_01@mail.ru
<b>A. A. Frantov</b>	Candidate of Science (Engineering), Senior Research Fellow - Deputy Chief Acoustics; Concern Avrora Scientific and Production Association JSC, Saint-Petersburg, Russian Federation; aafrantov@gmail.com
<b>A. N. Vidyaskina</b>	Postgraduate student; Samara National Research University, Samara Russian Federation; vidiaskina@yandex.ru
<b>E. G. Berestovitsky</b>	Doctor of Science (Engineering), Senior Research Fellow; St. Petersburg; Russian Federation; berest40@mail.ru

*Improving the quality of testing of electro-hydraulic equipment is associated with the development of measures to reduce the levels of the stands own noise, increasing the stability of the operation of hydraulic systems by increasing the degree of test automation and maintaining the stability of the operating parameters of the test bench's hydraulic systems.*

*Stands for control of noise and vibration of electro-hydraulic equipment are quite complex engineering structures which include pumps, control valves and the pipelines themselves with fittings. To be able to obtain reliable data during bench testing, it is necessary to take all possible measures to reduce the levels of acoustic interference from operating bench mechanisms to values much lower than the levels of acoustic disturbance created by a working controlled hydraulic device.*

*The comprehensive automation system for testing processes is designed to automate the installation and maintenance of modes, measurement processes and processing of the results obtained. It includes a system of setting and maintaining modes, as well as a vibration measuring complex.*

*The system for setting and maintaining modes allows you to remotely control the following processes from control panels installed at the measuring sections included in the bench installations:*

- *automated installation of parameters flow of working fluid and pressure in the lines of the stand;*
- *turning on and off pumping units;*
- *changing the rotation speed of electric drives of pumping units;*
- *operation of shut-off and control valves.*

*In the process of improving the stand, an original method of programmatic control of setting and maintaining the parameters of the working environment was developed and implemented. The use of this method makes it possible to minimize vibration and noise levels from the equipment and regulatory bodies of the stand by optimizing the combination of their operating parameters.*

**Keywords:** *measuring stand; frequency regulation; vibroacoustic protection; control system; noise; vibration*

**Citation:** Gladilin, Yu. A., Frantov, A. A., Vidyaskina, A. N. and Berestovitsky, E. G. (2024), "Improving the quality of testing of hydraulic equipment on a specialized measuring stand", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 10, no. 3, pp. 111-120. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-3-111-120. (In Russian; abstract in English).

## References

1. Berestovitsky, E. G., Gladilin, Yu. A. and Frantov, A. A. (2018), "Creation of a pumping stand for measuring vibration and noise of promising hydraulic devices", *Collection of abstracts and reports on the results of the conference "Dynamics and vibroacoustics of machines"* at Samara University. (In Russian)
2. Berestovitsky, E. G., Gladilin, Yu. A. and Frantov, A. A. (2019), "Regulation of the parameters of the working environment using a pumping unit of variable capacity in the conditions of the SU PES stand Scientific and Technical Collection of JSC Concern NPO Aurora", *Information management and processing systems*, issue No. 1(44), pp. 82-92. (In Russian)
3. Berestovitsky, E. G., Vidyakina, A. N., Gladilin, Yu. A. and Frantov, A. A. (2022), "Evaluation of the effectiveness of a set of measures to reduce the intrinsic vibroacoustic interference of a test pipeline stand", *Proceedings of the VI International Conference "Dynamics and vibroacoustics of machines"*, DVM-2022, Samara, September 21-23, pp.96-98. (In Russian)
4. Berestovitsky, E. G. and Gladilin, Yu. A. (2021), "Propagation of oscillatory power through the pipelines of the stand", *Information management and processing systems*, No. 4 (55), pp. 65-74. (In Russian)
5. Berestovitsky, E. G. (2011), "Development of methods and means of reducing vibration and noise of hydraulic devices of control systems of technical means", Abstract of Doctor of Technical Sciences Dissertation, St. Petersburg, Russia. (In Russian)
6. Gladilin, Yu. A. and Makaryants, G. M. (2014), "Reduction of acoustic interference of the hydraulic stand by controlling the rotation frequency of the electric pump drive and the use of hydrodynamic noise dampers", *Technical and technological problems of the service*, no. 1 (27), pp. 6-12. (In Russian)
7. Crocker, M. J., Ed. Malcolm. (2007), *Handbook of Noise and Vibration Control*, John Wiley and Sons, 1584 p.
8. Smolyakov, A. V. (2005), *Noise of turbulent flows*, St. Petersburg: Central Research Institute named after academician A. N. Krylov, 312 p. (In Russian)