

УДК 658.562:621.512

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОПРИБОРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Э.Г. Берестовицкий
Ю.А. Гладилин
Н.В. Пялов
А.Е. Федоров

ОАО «Концерн «НПО «Аврора»,
ул. Карбышева, 15,
Санкт-Петербург, Россия, 194021
mail@avrorasystems.com

Исследовано влияние расхода жидкости и перепада давления на уровень вибраций в условиях постоянного открытия рабочих окон электрогидравлического усилителя (ЭГУ). Показано, что уровень вибрации определяется величиной скорости её течения в окнах ЭГУ. При скоростях, большей критической, её влияние на уровень вибраций незначительно. Изменение уровня вибраций существенно до перепада давления 30 кГс/см², при дальнейшем его возрастании уровень вибрации изменяется незначительно. Показано также, что высокое содержание воздуха в жидкости приводит к образованию околзвучковых течений рабочей жидкости, характеризующихся повышенной виброактивностью гидравлических устройств.

Ключевые слова: электрогидравлический усилитель, вибрации, расход, перепад давления, исследование, число Маха.

Исследование связи гидравлических и виброакустических характеристик гидроприборов систем управления движением (СУД) позволяет определить принципиальные методы борьбы с их вибрациями и шумом. Поскольку физические процессы возникновения вибрации и шума в проточных частях гидроаппаратуры различного типа подобны, для качественной характеристики этой связи достаточно рассмотреть её применительно к одному типу гидравлических устройств – электрогидравлическим усилителям мощности.

Электрогидравлические усилители (ЭГУ) мощности предназначены для преобразования электрического сигнала управления в расход рабочей жидкости и распределения её в полости исполнительного гидромеханизма рулевых устройств СУД. Они являются ответственными элементами СУД, во многом определяющими динамические и эксплуатационные характеристики систем, рулевых устройств и объекта в целом.

Источники вибрации в ЭГУ – дросселирующие элементы управляющего и распределительного каскада. Наибольший вклад в виброактивность ЭГУ вносит распределительный каскад, для которого важнейшей составляющей является гидродинамическая. При этом основными источниками гидродинамического шума будут турбулентный поток и кавитация.

1 Влияние турбулентности и кавитации на виброакустические характеристики

Турбулентный поток, как результат взаимодействия рабочей жидкости с внутренней поверхностью гидравлических устройств, характеризуется наличием вихревого течения. Он вызывает турбулентный шум, являющийся совокупностью акустических явлений, обусловленных пульсациями скорости и давления непосредственно за местом дросселирования. Теоретическое исследование принципиальных вопросов излучения звука турбулентным потоком проведено Лайтхиллом [1], который показал, что акустическая мощность звука, сгенерированного безграничным турбулентным потоком, имеет порядок $N_a \sim \rho V^3 l^2 c^{-5}$, где ρ – плотность среды; V – скорость потока; c – скорость звука в ней; l – размер обтекаемого тела, т.е. пропорциональна восьмой степени скорости течения.

При наличии твёрдых границ физическая схема генерирования и излучения турбулентным потоком несколько меняется за счёт вклада дополнительных акустических источников. Однако общие закономерности измерения интенсивного звукового поля, излучаемого турбулентностью, в зависимости от скорости сохраняются.

Как известно, кавитация представляет собой образование разрывов сплошности потока при понижении давления вследствие увеличения скорости течения жидкости в

проходном сечении. Процесс захлопывания кавитационных пузырьков при их переходе в зону повышенного давления сопровождается своего рода гидравлическими ударами с характерным шумом [1]. Причём частота кавитационных ударов резко возрастает с увеличением скорости – пропорционально шестой степени скорости. В работах [2, 3] показано, что наличие высокой скорости в месте дросселирования потока является причиной вибрации и шума ЭГУ, как в случае турбулентного, так и в случае кавитационного механизма их возникновения.

В гидравлических приборах СУД используются унифицированные проточные части, представляющие собой профилированные окна, открываемые поясками распределительного золотника. В соответствии с методикой расчёта таких окон [3] в качестве главных параметров выбраны скорость жидкости в рабочих окнах и их площадь при полном открытии. Остальные гидравлические параметры (перепад давления, расход) однозначно вычисляются с помощью главных параметров или их производных. Вследствие этого все профили заданного ряда могут быть представлены в виде некоторой безразмерной величины, зависящей от открытия окон и не зависящей от расчётного расхода. Поэтому процессы, протекающие в проточных частях для различных типоразмеров ЭГУ, принципиально подобны. В качестве исследуемого выбран промежуточный типоразмер (прибор НГ1.32.04), рассчитанный на номинальный расход 100 л/мин.

С целью определения связи гидравлических характеристик и вибрационно-акустических характеристик (ВАХ) проведены экспериментальные исследования уровней вибрации прибора при открытиях рабочих окон от 1 до 9 мм для фиксированных значений перепада давления на приборе в диапазоне от 10 до 80 кГс/см².

Анализ полученных зависимостей выполнен при частоте $f=10$ кГц, поскольку частотное исследование расхода и уровня вибраций (рисунок 1) показало идентичность характеристик на различных частотах и наличие наибольших уровней вибраций на частоте 10 кГц.

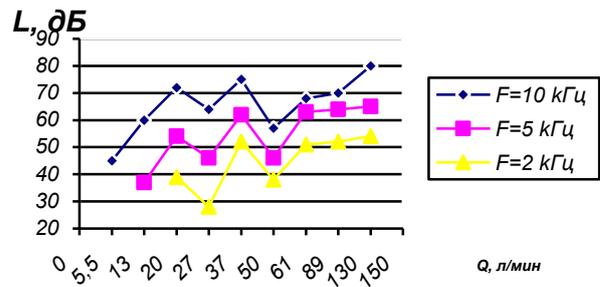


Рисунок 1. Влияние расхода рабочей жидкости при фиксированном перепаде давления ($\Delta P=60$ кГс/см²) на уровень вибрации для различных частот f

Влияние расхода рабочей жидкости на уровень вибрации для фиксированных открытий приведено на рисунке 2.

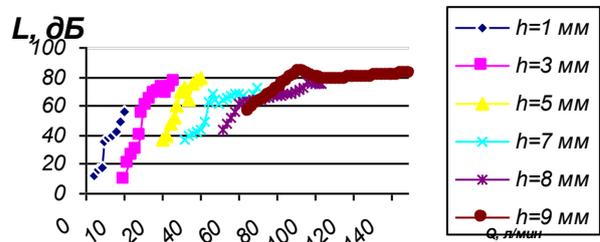


Рисунок 2. Зависимость уровней вибраций на частоте $f=10$ кГц от расхода жидкости от 0 до 140 л/мин для различных открытий рабочих окон h , мм

Увеличение расхода на любом исследуемом открытии первоначально (до возникновения перепада давления около 30 кГс/см²) приводит к резкому повышению уровней вибраций, а дальнейшее возрастание расхода в диапазоне перепадов давлений от 30 до 80 кГс/см² практически не сказывается на уровне вибраций. Кривые располагаются в порядке возрастания величины открытий, что указывает на связь виброактивности и срабатываемой на проходном окне мощностью, определяемой произведением расхода и перепада давления. Иначе говоря, с увеличением открытия (расхода) при постоянном перепаде давления происходит возрастание этой мощности, которое, начиная с некоторой критической величины $\Delta N_{кр}$, не сказывается на повышении уровня вибраций. Соответственно, если говорить о снижении уровней вибраций, уменьшение мощности в диапазоне $\Delta N > \Delta N_{кр}$ является неэффективным. Этот вывод указывает на основной принципиально важный метод улучшения

ВАХ гидравлических приборов за счёт снижения срабатываемой на рабочем окне мощности до величин $\Delta N \leq \Delta N_{кр}$. Характер зависимости уровней вибрации прибора от скорости при разных открытиях качественно одинаков (рисунок 3.)

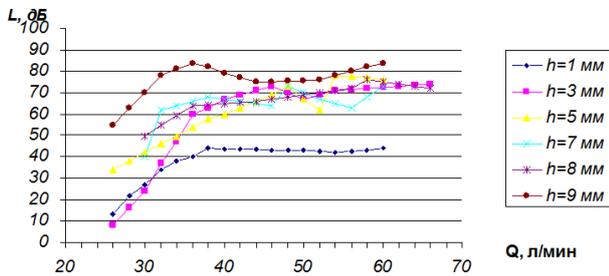


Рисунок 3. Зависимость уровней вибраций на частоте $f=10$ кГц от скорости течения жидкости от 0 до 140 л/мин. для различных открытий рабочих окон h , мм

Для каждого открытия имеются два участка (рис.2, 3):

- участок резкого возрастания уровней вибраций в диапазоне скоростей $25 \div 35$ м/с;
- участок незначительного роста, практически «насыщения» уровней вибраций, характеризующийся скоростями, большими 35 м/с. Скорость 25 м/с является критической.

Аналогичная зависимость приведена в работе [2], где особо акцентируется, что в полученном результате важно не столько количественное согласование произведённой приближённой оценки «насыщения» по уровням вибрации, сколько доказательство факта существования «насыщения», выше которого уровень не поднимается, как бы не увеличивалась скорость.

В количественном отношении кривые для исследования ряда открытий располагаются друг над другом по мере увеличения открытия, т.е. кривая, соответствующая наименьшему проходному сечению, имеет самые низкие уровни вибрации (~ 45 дБ), а кривая для наибольшего проходного сечения - самые высокие уровни (~ 80 дБ). Это позволяет предположить, что причиной различной виброактивности для различных открытий (сопротивлений) при постоянной скорости является гидравлический радиус проходного сечения.

Кривые, характеризующие влияние перепада давления на уровень вибраций прибора для каждого открытия (рисунок 4), имеют:

- участок резкого возрастания уровней

вибраций в диапазоне перепада давлений от 10 до 30 кГс/см²;

- участок незначительного возрастания уровней вибраций, характеризующийся значениями перепадов давлений, большими 30 кГс/см².

Перепад давлений, равный 35 кГс/см², является критическим значением – переходом к практически не изменяющимся уровням вибрации.

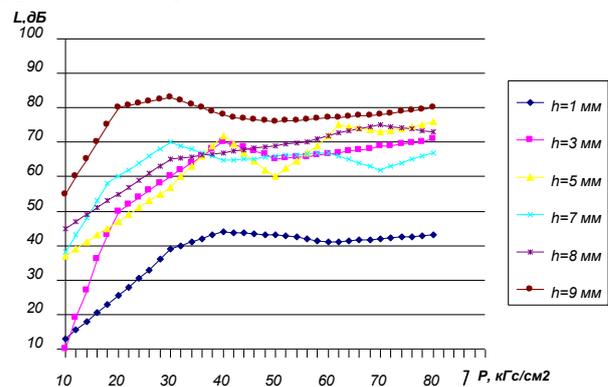


Рисунок 4. Зависимость уровней вибраций на частоте $f=10$ кГц от перепада давления для различных открытий рабочих окон h , мм

Таким образом, в правильном выборе параметров, в наибольшей степени обуславливающих шум и вибрацию ЭГУ, а именно, геометрии (эквивалентного диаметра) и скорости среды, заключается основной принцип снижения шумности этих устройств.

2. Влияние воздухомышенности жидкости на виброакустические характеристики

Учитывая определяющее влияние скорости на виброактивность, с целью создания малозумных клапанов рекомендуется [1] снижать скорость потока на выходе из клапана до числа Маха, равного 0.3, начиная с которого становится заметной сжимаемость среды. Так как число Маха определяется отношением скорости среды к скорости распространения звука в ней, значение $M=0.3$ может быть обеспечено за счёт изменения, как скорости потока, так и скорости звука в нём. Последняя, являясь характеристикой сжимаемости среды, определяется её упругостью и плотностью. Наличие воздуха за счёт большой сжимаемости изменяет скорость звука в жидкости и, таким образом,

оказывает влияние на виброактивность гидравлических устройств. Поэтому представляет интерес исследование влияния содержания воздуха в используемой в приборе рабочей жидкости на скорость распространения звука в ней.

Рабочая среда в реальной гидросистеме рассматривается как смесь жидкости и воздуха. Выделяющиеся из рабочей жидкости при снижении давления и растворяющиеся в ней воздушные пузырьки локально изменяют объёмный модуль упругости E_{CM} и плотность ρ_{CM} , определяемые по следующим формулам [4]:

$$E_{CM} = E_{ж} \frac{1 + \frac{V_{ж}}{V_B} \cdot \frac{P_0}{P}}{1 + \frac{V_B}{V_{ж}} \cdot \frac{P_0}{P^2} \cdot E_{ж}}, \quad (1)$$

$$\rho_{CM} = \rho_{ж} \frac{V_{ж}}{V_{ж} + V_B} \cdot \left(1 + \frac{\rho_B}{\rho_{ж}} \cdot \frac{V_B}{V_{ж}} \right),$$

где $E_{ж}$ – объёмный модуль упругости жидкости; P_0 – атмосферное давление; P – давление рабочей жидкости; $V_{ж}$ – объём, занимаемый жидкостью; V_B – объём, занимаемый воздухом; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости; ρ_B – плотность воздуха.

С учётом приведённых формул выражение для скорости распространения звука в двухфазной среде «жидкость+воздух» C_{CM} имеет следующий вид:

$$C_{CM} = \sqrt{\frac{E_{CM}}{\rho_{CM}}} = C_{ж} \sqrt{\frac{1 + \overline{V_B} \left(\frac{1}{P} + 1 \right)}{1 + \overline{V_B} \left(\frac{\rho_B}{\rho_{ж}} - 1 \right)} \cdot \frac{1}{1 + \overline{V_B} \left(\frac{E_{ж}}{P^2} - 1 \right)}}, \quad (2)$$

где $C_{ж}$ – скорость распространения звука в жидкости; $\overline{V_B}$ – относительный объём воздуха; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости; ρ_B – плотность воздуха.

При атмосферном давлении $P=1$; $\overline{V_B}=0$; $C_{CM}=C_{ж}$, а при $\overline{V_B}=1$; $C_{CM}=C_B$, где C_B – скорость звука в воздухе. Расчёт по полученному выражению для жидкости ПГВ при $C_{ж} = 1400$ м/с; $\rho_{ж} = 1170$ кг/м³; $E_{ж} = 230$ МПа; $\rho_B = 1,2$ кг/м³ позволяет построить зависимость скорости распространения звука в

смеси от воздухосодержания (рисунок 5).

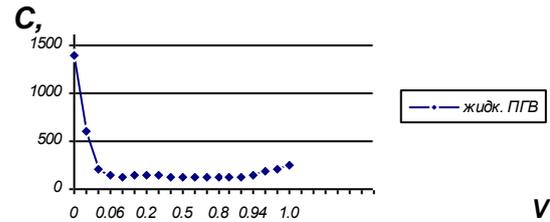


Рисунок 5. Зависимость скорости звука от относительного содержания воздуха в жидкости ПГВ

Данная зависимость показывает, что даже незначительное содержание воздуха (0.01 %) резко, почти вдвое (с 1400 до 771 м/с), снижает скорость распространения звука в ПГВ. Содержание воздуха порядка десятых долей процента, т.е. от 0.1 до 0.9 %, снижает скорость звука с 286 до 98 м/с. Снижению её на порядок (с 1400 до 145 м/с) соответствует содержание воздуха всего 0.4%.

Также очевидно, что скорость звука в жидкости ПГВ при $V_{кр} = 35$ м/с и числе Маха, равном 0,3, будет соответствовать значению $C_{ж} = V/M = 35/0.3 = 116,7$ м/с. Как видно из рисунка 5, такую скорость жидкость ПГВ имеет при воздухосодержании около 0,6 %. Содержание воздуха в жидкости ПГВ больше 0,6 % приводит к снижению скорости звука и к увеличению числа Маха, т.е. к образованию околосвуковых течений рабочей жидкости, характеризующихся повышенной виброактивностью.

Существование звуковых и сверхзвуковых течений при переходе потоком места максимального сужения показана Эпштейном [5] в основополагающей работе по исследованию возникновения и развития кавитации.

Данные об объёмном содержании нерастворённого воздуха в рабочих жидкостях гидросистем неоднозначны. Считается [4, 5], что в масле действующей гидросистемы находится от 0.5 % до 5 %, а в отдельных случаях до 10-15 % нерастворённого воздуха. В зависимости от конструкции и условий эксплуатации гидросистемы его количество может быть повышено до 15-18 %. Экспериментальные исследования [4], проведенные с целью внесения ясности в вопрос о количестве нерастворённого воздуха, показали, что в находящихся под давлением магистралях

нормально работающих гидросистем содержание свободного (нерастворенного) воздуха исчисляется десятками долями процента.

Заключение

Таким образом, анализ проведённых исследований, позволяет сделать следующие выводы:

1. Влияние расхода жидкости на уровень вибраций в условиях постоянного открытия определяется величиной скорости её течения в рабочих окнах ЭГУ. В случае скорости, большей критической, её влияние на уровень вибраций незначительно.

2. Влияние перепада давления на изменение уровня вибраций существенно до 30 кгс/см^2 , при дальнейшем его возрастании уровень вибрации изменяется незначительно.

3. Высокое содержание воздуха в жидкости приводит к образованию околосвуковых течений рабочей жидкости, характеризующихся повышенной виброактивностью гидравлических устройств. Наличие данных по воздухосодержанию в рабочей жидкости позволит уточнить рекомендации по выбору скорости течения как основного параметра, определяющего виброактивность гидравли-

ческих устройств.

Полученные результаты по исследованию связи гидравлических и виброакустических характеристик показывают возможности прогнозирования ВАХ ЭГУ на стадии проектирования и могут быть положены в основу расчётных методик для выбора ЭГУ для рулевых машин СУД.

Список использованных источников

- [1] Берестовицкий Э. Г., Гладиллин Ю. А., Ким Я. И., Лебедев С. В., Ромашов Н. Н. Исследование влияния различных факторов на возникновение автоколебаний в золотниковой паре // Системы управления и обработки информации. 2005. № 8. С. 113 – 121.
- [2] Гончаров В. К., Гончаров О. Н., Горшков А. С. Масштабные эффекты визуального и акустического проявлений кавитации. Симпозиум по физике акустико-гидродинамических явлений. М.: Наука, 1975.
- [3] Башта Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. М.: Машиностроение, 1972.
- [4] Башкиров В. С., Дудков Ю. М., Федин В.И. Методика экспериментального исследования газообразования при неустановившемся движении жидкости в линиях объёмных трубопроводов // Межвуз. сб. Гидропривод и системы управления. Новосибирск, 1977. С. 54 – 58.
- [5] Кольцова И.С., Лещенко В.А. и др. О содержание газа в минеральном масле гидросистем // Вестник машиностроения, 1980. № 7. С. 92 –99.

RESEARCH COMMUNICATION OF HYDRAULIC AND VIBROACOUSTIC CHARACTERISTICS OF HYDRODEVICES TRAFFIC CONTROL SYSTEMS

E.G. Berestovitsky
Y.A. Gladilin
N.V. Pyalov
A.E. Fedorov

JSC "Concern" NPO "Aurora"
Str. Karbysheva, 15,
St. Petersburg, Russia,
194021
mail@avrorasystems.com

The influence of fluid flow and pressure drop in the level of vibrations in continuous operation windows opening electrohydraulic amplifier (EHP). It is shown that the vibration level is determined by the speed of its flow in the windows of the EHP. At speeds greater than the critical value, its impact on the level of vibrations is negligible. Changes in the level of vibration significantly to the differential pressure of 2,94 MPa, with a further increase in its level of vibration is changed slightly. It is also shown that a high air content in the liquid leads to the formation of transonic flow of the working fluid with increased vibroaktivnosti hydraulic devices.

Ключевые слова: Electrohydraulic power, vibration, flow rate, pressure drop study Mach number.

References

- [1] Berestovickij Je. G., Gladilin Ju. A., Kim Ja. I., Lebedev S. V., Romashov N. N. Issledovanie vlijaniya razlichnyh faktorov na vozniknovenie avtokolebanij v zolotnikovoj pare // Sistemy upravlenija i obra-botki informacii. 2005. # 8. P. 113 – 121.
- [2] Goncharov V. K., Goncharov O. N., Gorshkov A. S. Masshtabnye jeffekty vizual'nogo i akusticheskogo pojavlenij kavitacii. Simpozium po fizike akustiko-gidrodinamicheskikh javlenij. M.: Nauka, 1975.
- [3] Bashta T.M. Gidroprivod i gidropnevmo-avtomatika. M.: Mashinostroenie, 1972.
- [4] Bashkirov B. C., Dudkov Ju. M., Fedin V.I. Metodika jeksperimental'nogo issledovanija gazoob-razovanija pri neustanovivshemsja dvizhenii zhidkosti v linijah ob"jomnyh truboprovodov // Mezhvuz. sb. Gidroprivod i sistemy upravlenija. Novosibirsk, 1977. P. 54 – 58.
- [5] Kol'cova I.S., Leshhenko V.A. i dr. O sodержanie gaza v mineral'nom masle gidrosistem // Vestnik mashinostroenija, 1980. # 7. P. 92 –99.