

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ С ПОЛУЧЕНИЕМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗВУКОВОЙ МОЩНОСТИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SIMHYDRAULICS MATLAB

Э.Г. Берестовицкий,
М.В. Соловьев

АО «Концерн «НПО «Аврора»,

ул. Карбышева, 15,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация, 196024

berest40@mail.ru

К современным гидравлическим системам предъявляются жесткие требования по шуму и вибрации. В имеющемся объеме работ много внимания уделяется большому количеству факторов, зачастую без учета их взаимовлияния. В общем случае их можно разделить на схемно-конструктивные, системные и принципиальные решения. В настоящее время развитие науки и техники находится на том уровне, когда дальнейшее улучшение акустического качества отдельных элементов и систем в целом возможно при исследовании возникающих процессов на стыке наук. В связи с этим в работе рассматриваются возможности моделирования волновых процессов в гидравлических системах управления с последующим получением акустических характеристик, что представляет собой совместное использование математического аппарата теории управления и методов акустики. В качестве одного из наиболее подходящих средств решения поставленных задач в работе рассматривается программный комплекс Simhydraulics Matlab. Наряду с математическими моделями элементов системы управления в работе предложены акустические модели элементов, которые учитываются при моделировании переходных процессов в системе. На основе полученных результатов предлагаются дополнительные критерии оценки качества систем управления.

Ключевые слова: регулирующие органы, системы управления, ВШХ, ГДШ, математическое моделирование, малошумность, Simhydraulics Matlab.

1 Введение

В настоящее время развитие науки и техники находится на том уровне, когда дальнейшее улучшение акустического качества отдельных элементов и систем в целом возможно при исследовании возникающих процессов на стыке наук. В связи с этим в работе рассматриваются возможности моделирования волновых процессов в системах управления расходом питательной воды с последующим получением акустических характеристик, что представляет собой совместное использование математического аппарата теории управления и методов акустики.

В качестве одного из наиболее подходящих средств решения поставленных

задач в работе рассматривается подход сквозного проектирования с использованием программных комплексов Simhydraulics Matlab, Ansys Fluent и Solidworks. Такой подход позволяет получать комплексную математическую модель и на основе полученных результатов моделирования выработать дополнительные критерии оценки качества систем управления.

2 Комплексная математическая модель

Комплексной будем называть математическую модель, которая помимо основных дифференциальных уравнений, описывающих работу системы, будет включать в себя описание элементов моделями теории акустики.

Например, математическое описание системы управления помимо уравнений элементов системы [1, 2], может включать в себя модели распространения волн по трубопроводным трактам. При дальнейшей необходимости возможно значительно расширить состав математического описания добавляя модели акустики насосов, регуляторов и других элементов системы, учитывая процессы распространения звуковых волн.

Важно отметить, что в случае сквозного проектирования происходит совместное использование математического аппарата вычислительной гидродинамики (ВГД) и реализованной математической моделью

системы в Matlab, - т.е. в комплексную математическую модель включаются модели турбулентности, пристеночные функции, уравнения динамики и статики деформируемого тела. Модель системы управления в Matlab принято называть 1D-моделью.

Также, возможность более полного математического описания всех элементов системы дает возможность встраивать в 1D-модель параметры из 3D-модели. На рисунке 1 показана 3D-модель регулирующего органа, полностью импортированная в виде набора связей и параметров, переданная из SolidWorks в Matlab средствами Simscape Matlab.

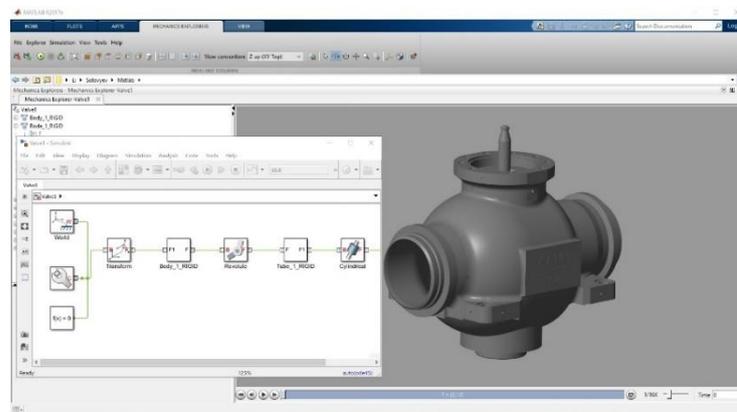


Рисунок 1. 3D-модель регулирующего органа в Simscape Matlab

Таким образом, закон движения элементов регулирующего органа при переходном процессе в системе управления реализуется в Matlab и параллельно с этим происходят вычисления методами ВГД [3] (ЛОГОС, Ansys Fluent, FlowVision). Выбранные параметры поступают из

аппарата ВГД в качестве входных сигналов для учета при вычислениях в 1D-модели.

На рисунке 2 показана объектно-ориентированная модель системы управления расходом питательной воды энергетической установки с учетом моделей акустики.

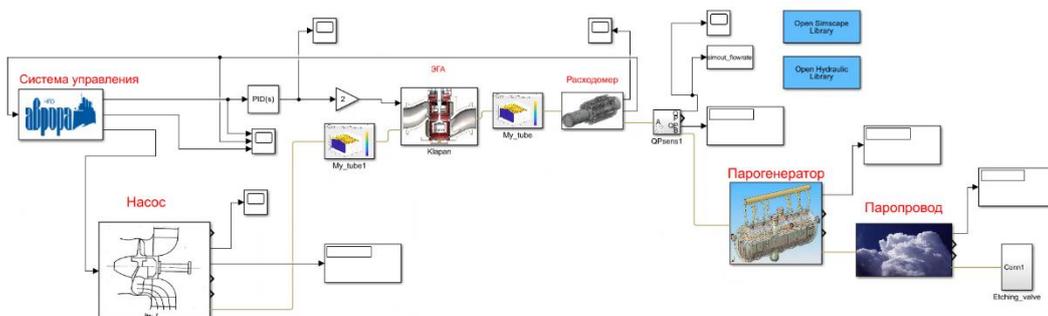


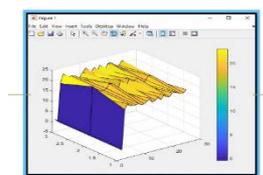
Рисунок 2. Объектно-ориентированная математическая модель

3 Подход к реализации распространения волн в Matlab

Наряду с математическими моделями элементов системы управления в работе предложены акустические модели элементов, которые учитываются при моделировании переходных процессов в системе. В качестве примера на рисунке 3

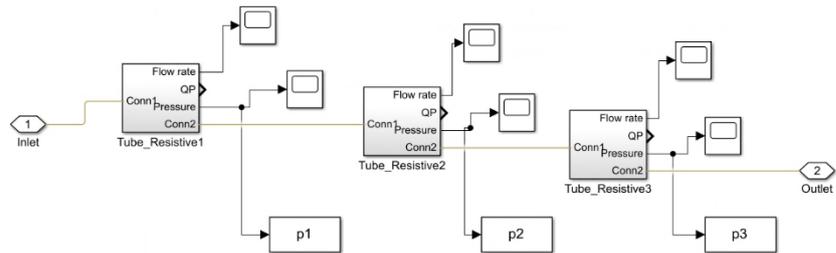
представлена акустическая модель участка трубопровода.

На рисунке 3 а, б показаны иконка блока из состава математической модели Matlab и сама модель измерительного участка перед малошумным регулирующим органом. Аналогичная модель располагается также и за ним, что полностью повторяет измерительный тракт при натурных испытаниях.



My_tube1

а)



б)

Рисунок 3. Акустическая модель участка трубопровода

а) Иконка Блока, б) Измерительный участок

За основу реализации распространения акустических волн в трубопроводных трактах взяты рекомендации по использованию нестационарных гидродинамических моделей, описывающих переходные процессы в магистральном трубопроводе с распределенными параметрами с заданным шагом по координате длины трубопровода из работы [4].

С помощью стандартных блоков Simhydraulics Matlab в модели описываются волновое уравнение Лайтхилла, акустическое влияние упругого

трубопровода, сжимаемость жидкости Hydraulic_Resistive_Tube, Fluid_Inertia и Constant_Volume_Hydraulic_Chamber. В зависимости от необходимой степени точности учета волновых процессов возможно дополнение и уточнение используемых блоков и их математических моделей, описанных при помощи встроенных языков программирования Matlab и Simscape Language.

Результаты математического моделирования переходного процесса распространения волн показаны на рисунке 4 в виде изменения значений давления по длине трубопровода.

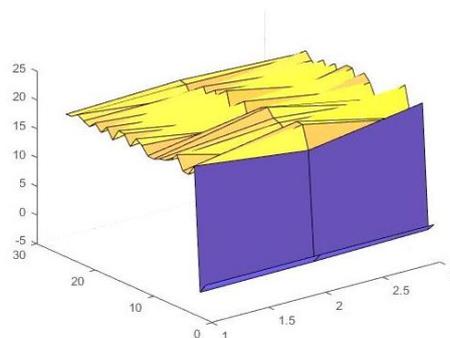


Рисунок 4. Нестационарные процессы распространения волн при различных параметрах системы

Информация представленная на рисунке 4 передается в виде массива данных пульсаций давлений в определенных точках для дальнейшего анализа. На основе последующего анализа вырабатываются дополнительные критерии оценки качества системы управления.

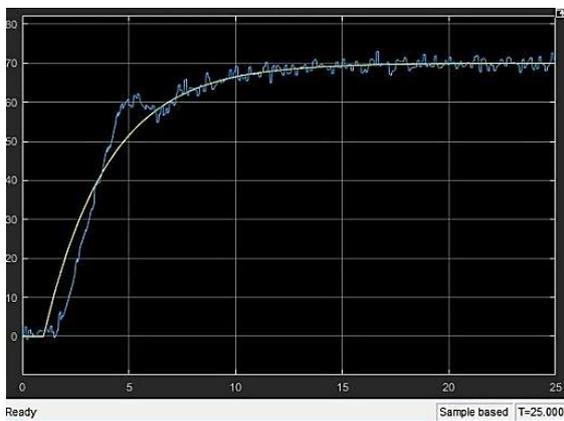
4 Дополнительные критерии оценки качества

В классической теории управления существует ряд общепринятых критериев оценки качества динамики системы по параметрам переходных процессов. Для оценки с точки зрения акустического

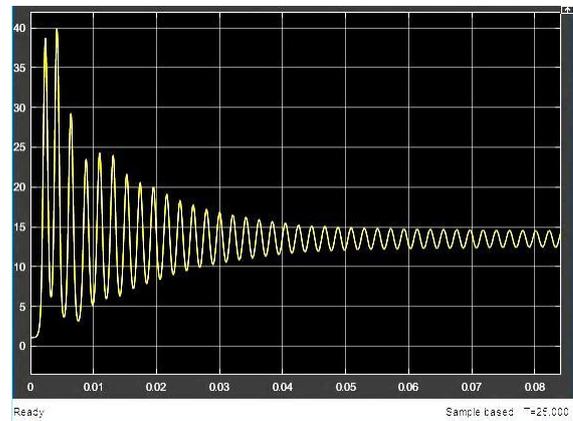
совершенства те или иные переходные процессы предлагается оценивать с помощью дополнительных критериев, основанных на методах теории акустики.

Оценка качества – это численный показатель качества системы, который выбирается так, чтобы подчеркнуть наиболее важное требование, предъявляемое к системе.

На рисунке 5 а показаны линии переходных процессов с учетом акустических явлений и без. Учет акустики позволит далее ввести дополнительные критерии оценки качества динамики системы. Также на рисунке 5 б показаны колебания давления.



а)



б)

Рисунок 5. Дополнительные критерии оценки

Дополнительные оценки качества предлагаются в виде классических для акустики спектральных характеристик звуковой мощности в частотном диапазоне и интегральных характеристик, например пульсаций давления.

В первом случае, для получения спектральной характеристики удобно использовать быстрое преобразование Фурье имеющихся массивов данных пульсаций давлений. Спектральная плотность мощности вычисляется следующим образом.

$$PSD_k = \begin{cases} |F_0|^2, & k=0 \\ 2 \frac{|F_k|^2}{\Delta f}, & k=1, \dots, \frac{N}{2}-1 \end{cases}$$

где $\Delta f = \frac{1}{\Delta t}$,

$k\Delta f$ – частота k-ого сигнала;

$$F_k = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n, & k=0 \\ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} \left(X_n \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right) \right), & k=1, \dots, \frac{N}{2}-1 \end{cases}$$

X_n – отклонение параметра от среднего значения при n-ом измерении;

N – количество измерений за рассматриваемый интервал времени Δt ;

Δt – рассматриваемый интервал времени.

Так как результаты натуральных измерений представлены в виде 1/3-октавной спектрограммы, АЧХ, полученные при вычислительном моделировании были так

же пересчитаны в 1/3-октавный спектр. На рисунке 6 представлено сравнение расчета и

эксперимента для шума, излучаемого регулирующим органом.

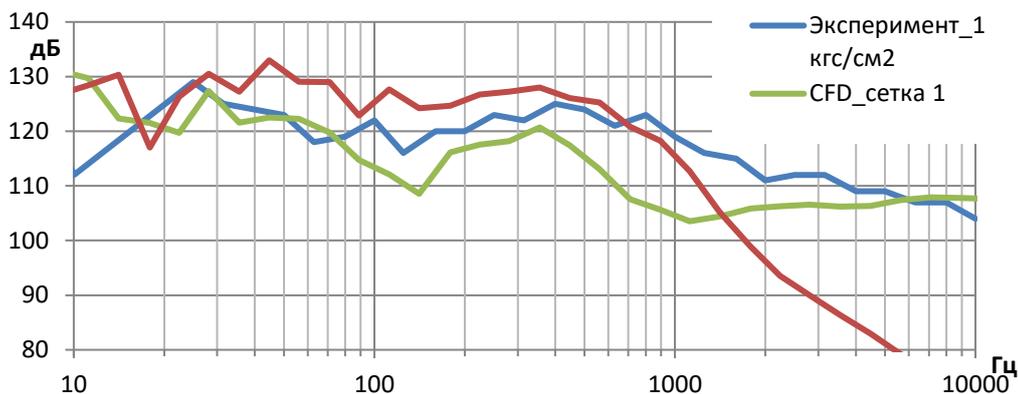


Рисунок 6. Спектральные характеристики ГДШ

Во втором случае могут быть использованы элементы оптимального управления техническими средствами [5]. Система считается оптимальной системой управления, если ее параметры выбраны таким образом, что оценка качества принимает экстремальное (обычно минимальное) значение. Чтобы оценка качества имела реальный смысл, она должна представлять собой число, которое всегда положительно или равно нулю. Тогда наилучшей системой будет та, в которой эта оценка имеет минимальное значение.

В этом свете, одним из видов оценки качества может служить интеграл от квадрата ошибки. Возможно использование интеграл от модуля ошибки, интеграл от взвешенного модуля ошибки или интеграл от взвешенного квадрата ошибки.

Оценка качества с помощью интеграла взвешенного модуля ошибки является наилучшей из рассмотренных, т. к. с ее помощью проще всего находить минимальное значение интеграла при изменении параметров системы.

4 Заключение

Таким образом, основными этапами реализации предложенного метода сквозного моделирование распространения акустических волн в гидравлических системах управления с получением

спектральных характеристик распределения звуковой мощности являются:

- построение комплексной математической модели на стыке теории управления и акустики;
- исследование методами вычислительной гидродинамики течения рабочей среды в регулирующем органе в трехмерной полноразмерной геометрической постановке задачи с проведением анализа их акустического качества;
- исследование и оценка динамических характеристик системы управления с малошумными регулирующими органами на базе комплексной математической модели;
- математическая обработка полученных массивов данных в форме дополнительных критериев оценки качества системы управления.

Полезным свойством предложенного методами является возможность контроля и обеспечения малошумности регулирующих органов во всех диапазонах регулирования в статическом и динамическом режимах. Данное качество должно быть присуще всем современным и перспективным системам управления с малошумными регулирующими органами.

Список использованных источников

- [1] Берестовицкий Э.Г., Крючков А.Н., Кизилев П.И., Пялов Н.В. Математическое моделирование проточных частей органов регулирования САУ ТС с

целью определения конструкции оптимальной по уровню возбуждаемого гидродинамического шума // Системы управления и обработки информации: научн.-техн. сб. /ОАО «Концерн «НПО «Аврора». СПб., 2015. Вып. 30. С. 76-81.

[2] Берестовицкий Э.Г., Мелешин И.С., Пялов Н.В., Соловьев М.В. Применение инструментов MathWorks для разработки и оптимизации законов управления гидравлической системой на базе модельно-ориентированного подхода // Системы управления и обработки информации: научн.-техн. сб. /АО «Концерн «НПО «Аврора». СПб., 2016. Вып. 4(35). С. 66-78.

[3] Берестовицкий Э.Г., Кизилев Д.И., Соловьев М.В. Сравнительная оценка программных пакетов математического моделирования с верификацией данных на основе экспериментальных исследований на стенде // Системы управления и обработки информации: научн.-техн. сб. /АО «Концерн «НПО «Аврора». СПб., 2018. Вып. 3(42). С. 77-93.

[4] Агафонов Е.Д., Миронов А.Г., Безбородов Ю.Н. Об учете скорости распространения волн давления при моделировании неустановившихся процессов с помощью MATLAB/SIMHYDRAULICS. // Вестник ИрГТУ №8 (103) 2015. С. 12-19.

[5] Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.: ил.

SIMULATION OF ACOUSTIC WAVE PROPAGATION IN HYDRAULIC CONTROL SYSTEMS WITH OBTAINING SPECTRAL CHARACTERISTICS OF SOUND POWER DISTRIBUTION IN THE SOFTWARE PACKAGE SIMHYDRAULICS MATLAB

**E. G. Berestovitsky,
M. V. Solovyev**

Concern Avrora Scientific and
Production Association JSC

15, street Karbysheva, S.-Peterburg,
196024, Russian Federation

berest40@mail.ru

Modern hydraulic systems are subject to stringent noise and vibration requirements. In the existing scope of work a lot of attention is paid to a variety of factors, often without taking into account their mutual influence. In General, they can be divided into schematic design, system and principle. Currently, the development of science and technology is at a level where further improvement of the acoustic quality of individual elements and systems as a whole is possible in the study of emerging processes at the intersection of Sciences. In this regard, the paper considers the possibility of modeling wave processes in hydraulic control systems with the subsequent obtaining of acoustic characteristics, which is a joint use of the mathematical apparatus of the control theory and methods of acoustics. The simhydraulics Matlab software package is considered as one of the most suitable means of solving the tasks. Along with mathematical models of control system elements, the paper proposes acoustic models of elements that are taken into account when modeling transients in the system. Based on the results obtained, additional criteria for assessing the quality of management systems are proposed.

Keywords: control system; mathematical simulation; vibration; valves; hydrodynamic noise; feed water regulators; throttle; low-noise equipment; low noise; Simhydraulics Matlab

References

- [1] Berestovitskiy E.G., Kryuchkov A.N., Kizilov P.I., Pyalov N.V. Matematicheskoye modelirovaniye protochnyh chastey organov regulirovaniya SAU TS s tselyu opredeleniya konstruksii optimalnoy po urovnyu vozvuzhdayemogo gidrodinamicheskogo shuma [Mathematical modeling of control valves in order to determine the optimal design for the level of excited hydrodynamic noise] Control and Data Processing Systems: Scient. & Techn. Collect. / Concern Avrora Scientific and Production Association JSC. SPb. 2015. Vyp. 30. S. 76-81.
- [2] Berestovitskiy E.G., Meleshin I.S., Pyalov N.V., Solovyev M.V. Primeneniye instrumentov MathWorks dlya razrabotki i optimizatsii zakonov upravleniya gidravlicheskey sistemoy na baze modelno-oriyentirovannogo podkhoda [Using MathWorks tools to develop and optimize hydraulic system control laws based on a model-oriented approach] // Control and Data Processing Systems: Scient. & Techn. Collect. / Concern Avrora Scientific and Production Association JSC . SPb.. 2016. Issue 4(35). P. 66-78.
- [3] Berestovitskiy E.G., Kizilov D.I., Solovyev M.V. Sravnitel'naya otsenka programnykh paketov matematicheskogo modelirovaniya s verifikatsiyey dannykh na osnove eksperimentalnykh issledovaniy na stende [Comparative evaluation of mathematical modeling software packages with data verification based on experimental studies on the stand]// Control and Data Processing Systems: Scient. & Techn. Collect. / Concern Avrora Scientific and Production Association JSC. SPb.. 2018. Issue. 3(42). P. 77-93.
- [4] Agafonov E.D., Mironov A.G., Bezborodov Yu.N. Ob uchete skorosti rasprostraneniya voln davleniya pri modelirovanii neustanovivshikhsya protsessov s pomoshchyu MATLAB/SIMHYDRAULICS [On taking into account the velocity of propagation of pressure waves when modeling unsteady processes using MATLAB/SIMHYDRAULICS] // Vestnik IrGTU №8 (103) 2015. P. 12-19.
- [5] Dorf R., Bishop R. Sovremennyye sistemy upravleniya [Modern control systems]– M.: Laboratoriya Bazovykh Znaniy. 2002. – 832 p.: il.