

**Е.В. Шахматов,
Т.А. Чубенко**

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва

Московское шоссе, 34,
г. Самара, Российская Федерация
443086

shakhmatovev@mail.ru

О ФОРМИРОВАНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ И ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье представлен краткий анализ результатов работы научной школы академика РАН В. П. Шорина по созданию методов и средств устранения колебаний в трубопроводных цепях пневматических и гидравлических систем. Изложены принципы построения и возможные структуры гасителей вынужденных колебаний рабочей среды, а также критерии и методы оценки эффективности действия гасителей. Показана возможность использования гасителей колебаний в качестве корректирующих устройств для обеспечения устойчивости гидромеханических систем управления и выравнивания частотных характеристик измерительных трубопроводных цепей.

Ключевые слова: гаситель колебаний; трубопроводная цепь; устойчивость

1 Введение

Гидравлические и газовые системы весьма разнообразны по конфигурации, размерам и входящим в их состав элементам. Однако во всех случаях при расширении функциональных задач, увеличении мощности и одновременном усложнении структур систем, увеличении числа агрегатов и протяжённости трубопроводов растут удельные параметры и интенсифицируются процессы в устройствах автоматики и трубопроводных связях. При этом на работоспособность каждой из выделенных систем существенное влияние оказывают пульсации давления и расхода рабочих тел.

Снижение интенсивности колебаний рабочей среды не только обеспечивает надёжность работы ответственных узлов систем, но в ряде случаев является необходимым условием и функционирования.

2 Методы устранения колебаний рабочей среды

Установлено, что основным видом разрушения трубопроводов и элементов систем являются вибрационные разрушения, а одним из главных источников возбуждения

механических колебаний является пульсирующий поток рабочей среды. Уменьшение амплитуд колебаний давления допускает снижение запасов прочности и, следовательно, снижение массы систем.

Пульсации потока рабочей среды представляют одну из причин разгерметизации соединений.

Функциональная и параметрическая надёжность систем в значительной мере снижается вследствие воздействия пульсаций на чувствительные элементы агрегатов систем. Переменное давление вызывает незатухающие колебания клапанов, золотников и сервопоршней, что, в свою очередь, приводит к их чрезмерному износу, появлению наклёпа и задиоров на рабочих поверхностях.

Взаимодействие периодических процессов в трубопроводах с рабочими органами механизмов - один из факторов, влияющих на устойчивость их работы. Переменное давление в трубопроводах служит источником погрешностей гидроусилителей следящих систем и является причиной нарушения их первоначальной настройки. Колебательные процессы оказывают значительное влияние на характеристики, КПД и надёжность насосов. В настоящее время имеется несколько направлений в решении проблемы

предупреждения и устранения колебаний рабочей среды в гидравлических и газовых системах. В статье представлен краткий обзор методов и средств устранения колебаний рабочей среды, изложенных монографии "Формирование динамических свойств трубопроводных цепей" [1], выпущенной по результатам работы научной школы академика РАН В. П. Шорина.

Возникновение колебаний рабочей среды в трубопроводных цепях связано с несовершенством рабочего процесса нагнетательных устройств, вихреобразованием в потоках жидкости, автоколебательными процессами в агрегатах автоматики и распределительных элементах, неравномерностью процессов горения. Периодические режимы в цепях могут быть обусловлены передачей механических колебаний через податливые стенки арматуры, периодическим характером действия массовых сил и т. п.

Качественное и количественное исследования физической картины образования колебаний, выяснение основных причин происхождения отдельных составляющих спектра и определение зависимости величины амплитуд и состава спектра частот от характеристик узлов цепи являются основными этапами в решении задачи устранения колебаний. В настоящее время распространены три способа устранения колебаний в трубопроводных системах (рисунок 1).

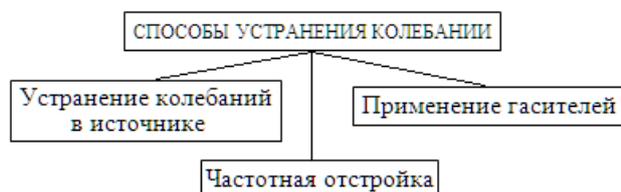


Рисунок 1. Способы устранения колебаний в трубопроводных цепях

Борьба с колебаниями в самом источнике - наиболее естественный и радикальный путь к устранению колебаний. В его основе лежит глубокое изучение тех сторон рабочего процесса, которые связаны с первопричинами возникновения колебаний,

и нахождение способов совершенствования системы. Любые успехи в направлении подавления колебаний в источнике приводят к созданию систем, обладающих, как правило, большим ресурсом и большой надёжностью. Однако часто приходится считаться с тем, что устранение колебаний в источнике оказывается связанным с необходимостью значительных конструктивных переделок отдельных агрегатов или системы в целом. Методы воздействия на механизм возникновения колебаний не являются универсальными. В каждом конкретном случае требуется проведение специальных исследований. В ряде случаев сам принцип организации рабочего процесса в элементах систем предопределяет генерирование колебаний рабочей среды значительной амплитуды.

Распространены методы снижения уровня колебаний, относящиеся к частотной отстройке цепи. Переносом агрегатов, изменением длин и конфигураций трубопроводов можно добиться наилучшей компоновки, при которой частоты собственных колебаний максимально удалены от частот колебаний, генерируемых источником. Частотная отстройка наиболее эффективна в случаях фиксированных частот и узкого спектра генерируемых колебаний; может также использоваться при подавлении автоколебаний. При этом необходимо контролировать возможности появления резонансов на кратных, а для нелинейных систем - на дробных частотах. Поиск оптимальной компоновки цепи наиболее целесообразен на стадии проектирования системы. Для широкополосных спектров возбуждаемых колебаний, изменяющихся в зависимости от режима работы системы, частотная отстройка становится неэффективной, так как подавление колебаний на одних резонансных частотах угрожает возбуждением на других.

Когда рациональным выбором параметров гидравлической цепи невозможно добиться снижения уровня колебаний до приемлемого уровня,

прибегают к введению в цепь гасителей колебаний.

Подавление колебаний рабочей среды с помощью специальных гасителей получает всё более широкое распространение в различных системах благодаря следующим обстоятельствам. Гасители в большинстве своём отличаются конструктивной простотой и надёжностью. Установка их в систему не связана с крупными изменениями в компоновке. Существенно снижается время на доработку трубопроводных систем. Гасители стабилизируют граничные условия на агрегатах вне зависимости от характеристик присоединяемых систем, что особенно важно для многоцелевых агрегатов (насосов, регуляторов). Тем самым упрощается отработка таких агрегатов в стендовых условиях. Разработка некоторых схем гасителей оказывается возможной в условиях ограниченной информации о системе (расчёт гасителя по «собственным» характеристикам). Определённые схемы гасителей обеспечивают эффективный разрыв обратных связей в автоколебательных системах или максимальный вынос энергии из автоколебательных систем. Поскольку применение гасителей практически не ограничивает варианты компоновки системы (прежде всего, за счёт отсутствия ограничений по пульсациям), конструкторы-проектировщики получают большие возможности для оптимизации системы по другим техническим требованиям, без учёта пульсаций.

Известный опыт в создании устройств подавления колебаний рабочей среды накоплен применительно к газовым системам. Сюда, прежде всего, следует отнести работы в области шумоглушения и компрессоростроения.

Во многих случаях пути создания гасителей колебаний для трубопроводных цепей, в которых как рабочее тело используется капельная жидкость, остаются те же, что и для газовых магистралей, если не считать отдельных специфических

особенностей. Нельзя механически применять конструкции гасителей, разработанные для газовых сред, при подавлении колебаний капельной жидкости не только из-за иных относительных размеров длин звуковых волн, но и из-за во много раз большей массовой плотности и вязкости среды, много большего «удельного акустического» сопротивления, больших средних давлений в системе и большей энергии колебаний.

В общем случае гаситель, как специальное включение в трубопроводную цепь, должен препятствовать распространению колебаний среды либо за счёт механического воздействия на поток, вызывающего необратимые потери колебательной энергии, либо за счёт упругоинерционного воздействия, вызывающего перераспределение энергии в спектре колебаний. Поэтому все известные конструкции гасителей колебаний базируются на двух принципах.

1. На принципе локализации энергии источника колебаний на определённом участке системы.

2. На принципе поглощения энергии источника колебаний.

Гасители первого типа называют реактивными, второго – диссипативными. Реактивные гасители работают как акустические фильтры, препятствующие прохождению колебаний определённых частот от источника в трубопроводную цепь. Эти частоты зависят от массы и упругости рабочей среды в элементах гасителя. В диссипативных гасителях энергия колебаний рассеивается за счёт вязкого или внутреннего трения.

Разделение гасителей на указанные типы в известной мере условно, так как характер работы гасителя, прежде всего, зависит от его взаимодействия с трубопроводной системой в целом, а не от вида входящих в его состав элементов. Действительно, при введении в систему простейшего гасителя в виде дроссельного пакета или шайбы реализуется в общем случае не только поглощение, но и отражение колебаний.

Классификация структур гасителей и их электрических аналогов представлена на рисунке 2. Здесь структуры разделены на пять блоков. В блоке А приведены схемы простейших гасителей.

Динамические модели этих устройств представляются в виде двухполюсников, однако для общности последующего анализа на рисунках приведены их схемы и в виде четырёхполюсников [2]. По аналогии с электрическими цепями, простейшими элементами, преобразующими сигналы в гидромагистралях, являются: гидродроссель (аналог активного сопротивления), расширительная полость или упругая перегородка (аналоги электрической емкости), проточный канал зауженного по отношению к основной магистрали сечения (аналог индуктивности). Эффект от их действия реализуется за счет диссипации (гидродроссель) или перераспределения (расширительная полость, проточный канал) энергии колебательного потока.

Для достижения большей эффективности гашения колебаний применяют двухэлементные гасители в виде:

- последовательного резонансного контура, размещаемого в ответвлении по отношению к основной магистрали (рисунок 2.А2);
- параллельного резонансного контура, устанавливаем непосредственно на пути распространения колебаний в основной магистрали (рисунок 2 А4);
- RL-фильтра, размещаемого также в основной магистрали (рисунок 2.А3).

Введением в структуры А2... А4 дополнительных активных и реактивных элементов достигается изменение вида их частотных характеристик.

Выбор структуры гасителей (от простейших схем А до более сложных многосвязных и комбинированных Б, В, Г, Д), расчёт и проектирование их подробно изложены в монографии [1].

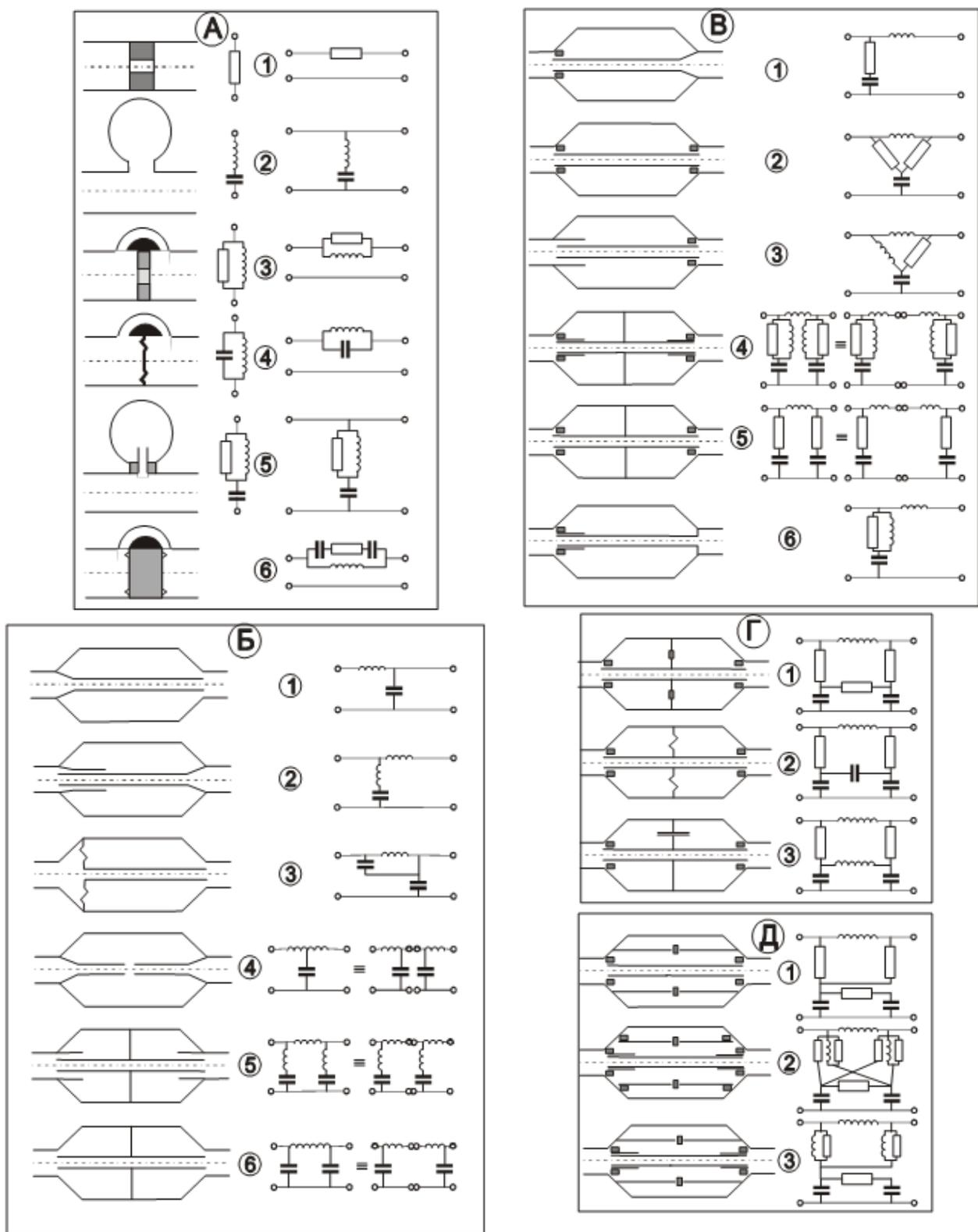


Рисунок 2. Классификация структур гасителей

Для оценки эффективности действия гасителя используется коэффициент вносимого затухания $K_{вн}$, который в случае

использования простейшего гасителя (дрессельной шайбы, жиклера) определяется по формуле [1]:

$$K_{\text{вн}} = \left| 1 + \frac{z_r}{z_n + z_n} \right|, \quad (1)$$

где z_r – импеданс гасителя, z_n – импеданс источника колебаний, z_n – импеданс нагрузки (системы, расположенной за гасителем).

В монографии представлены методы расчёта эффективности гасителей не только для случая сосредоточенных параметров, но и для условий распределённости параметров в трубопроводной цепи с учётом отражения и затухания на входе и выходе гасителя колебаний.

Гасители акустического типа являются одним из эффективных средств подавления вынужденных колебаний рабочей среды в гидравлических системах. Выбор параметров гасителей по описанным в предыдущих разделах методикам проводится из условия:

$$K_{\text{вн}} \geq K_{\text{вн.тр}} \text{ при } \omega \in [\omega_1; \omega_2], \quad (2)$$

где $K_{\text{вн}}$, $K_{\text{вн.тр}}$ – фактическое и требуемое значения коэффициента вносимого затухания; ω – круговая частота колебаний; ω_1 и ω_2 – нижний и верхний пределы диапазона частот подавляемых колебаний. В качестве дополнительного используется условие обеспечения гидравлического сопротивления устройства не выше заданного, $K_g \leq K_{g \text{ доп}}$ – фактическое и допустимое значения гидравлического сопротивления гасителя. Однако такой выбор параметров гасителей для гидравлических цепей систем управления может привести к невыполнению требований по качеству регулирования, в частности к отклонению выходного параметра цепи в переходном процессе выше допустимой нормы. Для нормального функционирования системы управления с гасителем колебаний необходимо, чтобы одновременно выполнялись требования по подавлению повышенных колебаний

рабочей среды (2) и по динамической точности системы:

$$\Delta \bar{x}_p(t) \leq \Delta \bar{x}_{p \text{ доп}}(t),$$

где $\Delta \bar{x}_p(t)$, $\Delta \bar{x}_{p \text{ доп}}(t)$ – фактическое и допустимое относительные отклонения выходного (регулируемого) параметра системы, обусловленные установкой гасителя колебаний. Решение этой задачи представлено в монографии [1].

3 Заключение

Таким образом, в статье показаны основные подходы к выбору методов и средств устранения колебаний в трубопроводных системах, изложенные в монографии [1]. Кроме этого в монографии рассмотрены вопросы обеспечения устойчивости систем управления за счёт использования гасителей колебаний в качестве корректирующих устройств. Даны методики выбора параметров гасителей для коррекции динамических характеристик систем управления с целью повышения запасов устойчивости работы регуляторов и систем управления в целом.

И, наконец, представлены материалы по использованию корректирующих устройств для выравнивания частотных характеристик измерительных трубопроводных цепей, что очень важно для обеспечения точности контроля параметров в труднодоступных элементах пневмогидросистем.

Список литературы

[1] Формирование динамических свойств трубопроводных цепей: монография / Н. Д. Быстров, А. Г. Гимадиев, А. Н. Головин [и др.]; под редакцией В. П. Шорина. – Самара: Издательство Самарского университета, 2020.-328 с. :ил.

[2] Устранение колебаний в авиационных трубопроводах: монография/В.П. Шорин. – Москва: Машиностроение, 1980.-156с.:ил.

Shakhmatov E. V.
Chubenko T. A.
**ON THE FORMATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF
PNEUMATIC AND HYDROMECHANICAL SYSTEMS**

Samara University,
Moskovskoe shosse 34, Samara, 443086
shakhmatovev@mail.ru

The article presents a brief analysis of the results of the work of the scientific school of the Academician of the Russian Academy of Sciences V.P. Shorin on the creation of methods and means for eliminating oscillations in pipeline chains of pneumatic and hydraulic systems. The principles of construction and possible structures of dampers for forced vibrations of the working medium, as well as criteria and methods for assessing the effectiveness of the dampers are stated. The possibility of using vibration dampers as correcting devices to ensure the stability of hydromechanical control systems and equalize the frequency characteristics of measuring pipeline circuits is shown.

Key words: *vibration damper; pipeline chain; stability*

Reference

- [1] Bystrov N.D., Gimadiev A.G., Golovin A.N. [and others]; edited by V.P. Shorin. Formation of dynamic properties of pipeline chains: monograph. Samara: Samara University Publishing House, 2020. 328 p.
- [2] Shorin V.P. Elimination of vibrations in aviation pipelines. Moscow: Mechanical Engineering, 1980. 156 p.