УДК 629.113

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРУБОПРОВОДОВ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОУСИЛИТЕЛЯ РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Н. Н. ГОРБАТЕНКО
Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

Динамические свойства гидравлического усилителя рулевого управления (ГУР) оказывают непосредственное влияние на быстродействие, точность и устойчивость передачи управляющего воздействия от рулевого колеса к управляемым колесам автомобиля. В отличие от сосредоточенных механических систем, гидроусилитель с протяженными напорными и сливными линиями представляет собой связную гидромеханическую систему с распределенными параметрами. Поэтому изменение геометрии трубопроводов способно приводить к изменению не только гидравлических потерь, но и собственных динамических свойств всей системы.

Особенно актуальной эта задача становится для грузовых автомобилей, в которых гидроусилитель может быть удален от насоса, распределителя или исполнительного гидроцилиндра на значительное расстояние. При этом длина трубопроводов определяется компоновкой автомобиля и может изменяться в широких пределах. Диаметр трубопровода, в свою очередь, определяется требованиями к расходу, допустимым потерям давления, габаритам и технологическим ограничениям.

Цель работы – установление причинно-следственной связи между геометрией стальных трубопроводов, модальным спектром и частотными характеристиками гидроусилителя рулевого управления.

В работе представлены результаты численного исследования влияния диаметра (6, 8, 10 и 12 мм) и длины (1 000, 1 500, 2 000 и 3 000 мм) стальных напорного и сливного трубопроводов на динамические характеристики ГУР грузового автомобиля с роторным золотниковым распределителем. Исследование выполнено методом линеаризации математической модели ГУР в среде имитационного моделирования Simcenter Amesim для 20 сочетаний диаметра и длины трубопроводов с последующим модальным анализом (спектр собственных чисел, модальные формы) и анализом частотных характеристик (диаграммы Боде) канала «скорость поворота рулевого колеса – скорость поворота управляемых колёс».

На основании анализа результатов исследования установлено следующее.

1. Спектр собственных чисел линеаризованной модели гидроусилителя рулевого управления во всём исследованном диапазоне диаметров и длин стального трубопровода разделяется на четыре группы мод: низшую связанную гидромеханическую моду (группа I), акустические (волновые) моды трубопроводов (группа II), инвариантную механическую моду ≈844 Гц (группа III) и локальную гидравлическую моду ≈8 800 Гц (группа IV).

2. Частота низшей связанной моды при фиксированной длине трубопровода систематически возрастает с ростом диаметра (в 1,5–2 раза при переходе от Ø 6 мм к Ø 12 мм), тогда как её демпфирование, напротив, систематически снижается при L = 3 000 мм с 54,0 % (Ø 6 мм) до 14,1 % (Ø 12 мм).

3. Закон снижения частоты акустических мод трубопровода с увеличением длины зависит от диаметра: для труб диаметром 8 и 10 мм справедлив классический волновой закон $f \cdot L \approx \text{const}$ (отклонение меньше 2 % при скорости звука в жидкости 1 300...1 500 м/с); для трубы диаметром 6 мм закон является промежуточным $f \propto L^{(-0{,}7\ldots-0{,}75)}$ вследствие сопоставимости ёмкости трубы с сосредоточенными объёмами на её концах.

4. Моды групп III и IV, локализованные в механической части распределителя и в малом объёме жидкости у клапана, инвариантны к диаметру и длине трубопровода (отклонение параметров не превышает 1 %) и могут быть исключены из рассмотрения при оптимизации геометрии трубопроводов ГУР.

5. Во всех исследованных диаметрах обнаружен эффект модального сближения-расталкивания между акустическими и механическими модами, положение которого по длине трубопровода зависит от диаметра, что обусловливает немонотонный характер зависимости демпфирования отдельных мод от геометрии трубопровода в переходных зонах длин.

6. С практической точки зрения при проектировании трассировки гидролиний ГУР рекомендуется рассматривать диаметр трубопровода как самостоятельный параметр настройки динамических характеристик системы (наряду с длиной), позволяющий целенаправленно смещать частоту низшей моды рулевого управления и частоты акустических резонансов линий относительно диапазона частот эксплуатационного возбуждения, с обязательной проверкой полного спектра собственных чисел для выбранного сочетания параметров вблизи переходных зон.

7. При длинных трассах (L > 2 000 мм) необходимы демпферы пульсаций давления (резонансные гасители, аккумуляторы) либо увеличение числа дросселирующих элементов, а также контроль совпадения гармоник пульсаций насоса с акустическими частотами линий.

8. Анализ диаграмм Боде независимо подтверждает результаты модального анализа: полоса пропускания канала сужается с ростом длины трубопровода в 1,38–1,45 раза (практически одинаково для всех диаметров) при увеличении длины с 1 000 до 3 000 мм, а расчётное время реакции лежит в пределах 8,6...14,1 мс. Диаметр трубопровода на быстродействие канала влияет незначительно (различие времени реакции между диаметрами не превышает $\approx$ 1,1...2,2 мс при любой длине); вместо этого диаметр определяет колебательность переходного процесса – более выраженный резонансный пик АЧХ и меньшее демпфирование низшей моды при больших диаметрах. Для длинных трубопроводов единственным эффективным способом повышения быстродействия остаётся уменьшение длины трубопровода.