

СТРАТЕГИЯ И ТАКТИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СНИЖЕНИЯ ШУМА ДВС В СОСТАВЕ АВТОМОБИЛЯ

Шатров М.Г.

*Московский автомобильно-дорожный институт
(государственный технический университет), г. Москва*

Качества транспортного средства (ТС) как сложной технической системы достаточно многообразны. **Потребительские качества автомобилей**, в большинстве из них, и, в частности, экономико-мощностные и массогабаритные показатели, регулируются *рыночной конъюнктурой* через соответствие спроса и предложения – отражающего интересы отдельных индивидуумов и/или коллективов общества. **Экологические качества**, в части токсичности, шума и вибрации, *регламентируются законодательно государством*, выразителем интересов общества в целом.

Существует два принципиально отличных технических **способа** решения задачи:

- снижение уровня шума непосредственно источника;
- и установление преграды или поглотителя шума между источником и получателем акустического излучения (отразить волну и направить ее в безопасном направлении, поглотить акустическую энергию).

Практика мирового автостроения выработала единый нормативный документ, регламентирующий предельные показатели транспортных средств - “Правила №51” ЕЭК ООН, положенные в основу государственных стандартов большинства промышленно развитых стран (в России – ГОСТ – 19358). Предписываемая “Правилами” методика определения акустических показателей, а также характерное для автомобиля соотношение между параметрами основных источников его шума предопределяют тот факт, что до 95% *нормативной излучаемой звуковой мощности приходится на его энергетическую установку*.

Опыт двигателестроения показал, что доводка по акустическим показателям источников структурного шума двигателей находящихся в производстве, как правило, экономически нецелесообразна, так как при этом требуется коренная реорганизация конструкции элементов их структуры и процессов, возбуждающих в них звуковую вибрацию.

Экспериментальная доводка ДВС по виброакустическим показателям малоэффективна в связи с тем, что она длительна и дорогостояща, так как требует изготовления натуральных образцов и соответствующей прецизионной аппаратуры и специальных акустически доработанных и приспособленных помещений.

Моделирование виброакустических качеств ДВС в настоящее время стало определяющим средством формирования его требуемых качеств.

В соответствии с вышеизложенным актуальными в разработке си-

системы моделирования виброакустики автотранспортного средства следующие направления работ.

1. **Разработка состава и структуры комплекса моделей** для подготовки информации по сегменту «Виброакустика ПДВС в составе транспортного средства» информационного пространства ПДВС.

2. **Поиск, отбор и адаптация** в комплексе **существующих моделей** по различным аспектам виброакустики ПДВС и транспортного средства.

3. **Разработка моделей** различного уровней абстракции, требуемых для решения задач виброакустики на разных этапах ЖЦ ТС.

4. Формирование состава структуры единого информационного пространства «Виброакустика ПДВС» с учетом специфики его использования на различных этапах ЖЦ ДВС и транспортного средства.

С позиций системного анализа ДВС в составе транспортного средства первоочередными являются разработки следующих моделей различных уровней абстракции, требуемых для решения задач виброакустики на разных этапах его ЖЦ.

1. Модели позволяющие определить предельно допустимые показатели шума автомобиля и ДВС в соответствии с принятыми и перспективными законодательными ограничениями по их шуму.

2. Модели, позволяющие описать рабочий процесс ПДВС.

3. Модели структурного шума ДВС от рабочего процесса и от переключений поршня.

4. Модели конструкции корпусных и ненагруженных деталей ДВС.

5. Модели для анализа кинематики и динамики механизмов ДВС.

6. Модели систем ДВС (охлаждения и смазывания).

7. Модели систем впуска и выпуска ДВС.

В связи с этим при выборе **тактики акустической доводки** двигателя особую актуальность приобретает проблема определения на стадии его разработки акустических характеристик основных источников структурного шума ДВС, таких как рабочий процесс и соударения между сопряжёнными подвижными элементами ДВС.

Практика и опыт создания транспортных средств показали, что улучшение экологических качеств (токсичности, шума и вибрации) ДВС без учета автомобиля, в котором **двигатель является его подсистемой**, обречены на неудачу. Ранее данный аспект был практически не актуализировался и в угоду к другим его качествам даже игнорировался так как рамки требований к шуму транспортного средства были достаточно широки. Сейчас по мере возрастания требований эффективности и качества транспортных средств, а также жестких ограничений на шумовое воздействие на человека делает такой подход единственным, обеспечивающим должный результат.

Базой для достижения потенциальных предельных возможностей по виброакустическим качествам автомобиля и в том числе ДВС является ба-

ланс звуковой мощности автомобиля, который основывается на предположении о независимости формирующих его источников.

Звуковая мощность, излучаемая автомобилем $P_{w \text{ авт } \Sigma}$, определяется звуковыми мощностями излучаемыми двигателем $P_{w \text{ ДВС}}$ и другими источниками автомобиля $P_{w \text{ авт}}$ (шум шин, трансмиссии, воздушных потоков, обтекающих автомобиль и т.п.)

$$P_{w \text{ авт } \Sigma} = P_{w \text{ ДВС}} + P_{w \text{ авт}}.$$

В свою очередь звуковая мощность генерируемая двигателем $P_{w \text{ ДВС}}$, формируется следующими источниками, принципиально отличающимися по природе возникновения:

- структурным шумом от колебаний наружных поверхностей ДВС $P_{w \text{ см}}$;
- аэродинамическим шумом от процесса впуска $P_{w \text{ вп}}$;
- аэродинамическим шумом от процесса выпуска $P_{w \text{ вып}}$.

Тогда это можно представить в следующем виде

$$P_{w \text{ ДВС}} = P_{w \text{ см}} + P_{w \text{ вп}} + P_{w \text{ вып}}.$$

Рассмотрим возможности определения показателей структурного шума двигателя, исходя из необходимости обеспечения выполнения заданного норматива на шум автомобиля. Сейчас приняты соответствующие нормативы по допустимому шуму автомобиля в рамках стандарта “Правила №51” ЕЭК ООН, которым руководствуется автомобильная промышленность всех развитых стран, а также на которые должна ориентироваться промышленность нашей страны.

Анализ проводится в предположении, что автомобиль представляет собой совокупность независимых источников шума, и в частности, источников структурного шума ДВС, шума наполнения и шума выпуска.

В связи с тем, что для современного автомобиля априори можно утверждать, что при доведенных системах впуска и выпуска основным источником его акустического излучения является структурный шум, выразим их вклад в суммарный шум автомобиля относительно структурного шума.

При это на основании методики измерения шума автомобиля представляется целесообразным рассмотреть вклад каждого из его указанных независимых источников в нормативной точке измерительной полусферы, что соответствует методике экспериментального определения звуковой мощности движущегося автомобиля на мерном участке в соответствии с ГОСТ – 19358. При этом нормативный показатель – уровень звука автомобиля L_A , на расстоянии $R=7,5$ м от оси мерного участка дороги может быть рассчитан в предположении ненаправленного излучения им звуковой энергии в пространство, ограниченное полусферой указанного радиуса.

Структурный шум ДВС полученный в стендовых условиях в предположении о ненаправленности источника акустического излучения, гене-

рирует звуковую мощность $P_{w\text{ см}}$ и создает в нормативной точке измерительной полусферы интенсивность $J_{\text{см}n} = \frac{P_{w\text{ см}}}{2\pi R^2}$,

где R – радиус измерительной полусферы вокруг автомобиля.

Учитывая, что на пути распространения звука двигателя, капотированного в моторном отсеке автомобиля, часть звуковой энергии рассеивается в подкапотного пространстве, то фактическая интенсивность структурного шума ДВС в точке нормирования составит

$$J_{\text{см}} = \frac{P_{w\text{ см}\phi}}{2\pi R^2} = \frac{k_{\text{кап}} \cdot P_{w\text{ см}}}{2\pi R^2}.$$

Здесь $k_{\text{кап}} = 10^{-0,1 \cdot \Delta L_{\text{кап}}}$ – коэффициент звукопоглощения моторного отсека, представляющий собой долю звуковой мощности источников шума, расположенных в моторном отсеке, выходящей за его пределы подкапотного пространства, $\Delta L_{\text{кап}}$ – величина снижения звуковой мощности структурного шума ДВС за счет его капотирования в моторном отсеке.

Величина звукопоглощения задается в техническом задании на разработку автомобиля и может варьироваться в пределах от 3 до 20 дБ, что перекрывает диапазон от акустически не обработанного моторного отсека до отсека в виде герметичной капсулы.

Она определяет в дальнейшем **стратегию виброакустической доводки автомобиля**, т.к. требуемая величина $J_{\text{см}\phi}$ в нормативной точке может быть обеспечена двумя способами:

- уменьшением $P_{w\text{ см}}$ путем реорганизации и доводки рабочего процесса и конструкции двигателя;
- увеличением звукопоглощения на ограждающих двигатель элементов в его подкапотном пространстве.

Газодинамический шум системы впуска двигателя, генерирует звуковую мощность $P_{w\text{ вн}}$ и имеет в точке нормирования интенсивность

$$J_{\text{вн}} = \frac{P_{w\text{ вн}}}{2\pi R^2}.$$

Учитывая тот факт, что система впуска ДВС обязательно оснащается элементами очистки воздуха поступающего в двигатель, которые одновременно являются эффективными шумозаглушающими устройствами, то для всех типов современных ДВС можно принять

$$P_{w\text{ вн}} < P_{w\text{ см}}.$$

Без применения специальных средств шумоглушения звуковая мощность системы впуска, не капотированной в моторном отсеке, т.е. полученная *в стендовых условиях*, составляет

$$P_{w\text{ вн}} = k_{\text{вн}} P_{w\text{ см}},$$

где $k_{en}=10^{-0,1\cdot\Delta L_{en}}$ – коэффициент представляющий долю звуковой мощности, излучаемой системой впуска, относительно звуковой мощности структурного шума двигателя.

Для систем впуска автомобильных ДВС значения ΔL_{en} обычно находятся в пределах 3...6 дБ в зависимости от номинальной частоты вращения двигателя, акустической эффективности воздухоочистителей и наличия специальных глушителей шума процесса наполнения.

С учетом этого интенсивность

$$J_{en} = \frac{k_{en} \cdot P_{wcm}}{2\pi R^2}.$$

Если воздух поступает в двигатель *из моторного отсека* (подкапотного пространства), что характерно в первую очередь для легковых автомобилей и легких грузовых автомобилей, то фактическая звуковая мощность системы впуска определяется как $P_{w\ en\ \phi} = k_{kan} P_{w\ en}$, а интенсивность

$$J_{en} = \frac{k_{en} \cdot k_{kan} \cdot P_{wcm}}{2\pi R^2},$$

Шум **системы выпуска** отработавших газов соответствует звуковой мощности $P_{w\ вын}$ и вносит в точку нормирования интенсивность

$$J_{вын} = \frac{P_{wвын}}{2\pi R^2}.$$

Учитывая, что системы выпуска отработавших газов в настоящее время оснащаются двухступенчатыми системами шумоглушения и нейтрализаторами отработавших газов, то $P_{w\ вын} \ll P_{w\ cm}$. Тогда звуковую мощность выпуска можно представить относительно мощности структурного шума двигателя как

$$P_{w\ вын} = k_{вын} P_{w\ cm},$$

где $k_{вын}=10^{-0,1\cdot\Delta L_{вын}}$ – коэффициент представляющий долю звуковой мощности, излучаемой системой выпуска, относительно звуковой мощности структурного шума двигателя.

Величина $\Delta L_{вын}$ задаётся при отработке технического задания на проектирование системы выпуска и варьируется от системы выпуска дизелей с одной ступенью шумоглушения до системы выпуска двигателей с искровым зажиганием, двумя ступенями шумоглушения и нейтрализатором ОГ, соответственно от 6 до 12 дБ.

С учетом этого:

$$J_{вын} = \frac{k_{вын} \cdot P_{wcm}}{2\pi R^2}.$$

Таким образом, все источники шума ДВС создадут в нормативной точке интенсивность:

$$J_{ДВС} = J_{см} + J_{вн} + J_{вып} = [k_{кан}(1 + k_{вн}) + k_{вып}] \cdot \frac{P_{wcm}}{2\pi R^2}.$$

Учитывая, что в нормативную точку поступает звуковая энергия от отличных от двигателя **источников шума автомобиля** $P_{w авт}$ (шум шин, трансмиссии, воздушные потоки, обтекающие автомобиль), то ее вклад в совокупную интенсивность в нормируемой точке составляет

$$J_{авт} = \frac{P_{wавт}}{2\pi R^2}.$$

Соотнеся $P_{wавт}$ с уровнем структурного шума ДВС $P_{wсм}$, получим

$$P_{wавт} = k_{авт} \cdot P_{wсм},$$

где $k_{авт} = 10^{-0,1 \cdot \Delta L_{авт}}$. Для автомобилей величина $\Delta L_{авт}$, как правило, ≥ 10 дБ. Большая величина $\Delta L_{авт}$ объясняется особенностями методики определения нормативных акустических показателей автомобиля предписываемой “Правилами №51”, согласно которой двигатель работает при максимальной подаче топлива с частотой вращения приблизительно равной $(0,85 \dots 1,0) n_{ном}$. При этом излучаемая структурой двигателя звуковая мощность близка к максимальной, а скорость движения автомобиля, влияющая на величину $P_{авт}$, относительно невелика и составляет $\sim 55 \dots 60$ км/ч достигает 10 дБ.

С учетом сказанного

$$J_{авт\Sigma} = J_{ДВС} + J_{авт} = [k_{кан}(1 + k_{вн}) + k_{вып} + k_{авт}] \cdot \frac{P_{wсм}}{2\pi R^2} = k_{авт\Sigma} \cdot \frac{P_{wсм}}{2\pi R^2},$$

и, соответственно, переходя от абсолютных значений интенсивностей к их уровням, окончательно получим **уровень интенсивности шумоизлучения автомобиля**

$$L_{авт\Sigma} = 10 \lg \frac{J_{авт\Sigma}}{J_0} = 10 \lg \frac{P_{wсм}}{P_{w0}} - 10 \lg 2\pi R^2 + 10 \lg k_{авт\Sigma} = L_{wсм} - 10 \lg 2\pi R^2 + 10 \lg k_{авт\Sigma},$$

где $J_0 = 10^{-12}$ Вт/м², $P_{w0} = 10^{-12}$ Вт.

Требуемый нормативный уровень шума автомобиля по стандарту “Правила №51” ЕЭК ООН в общем виде представим как $[L_{норм}]$. Следовательно шум автомобиля должен хотя бы не превышать заданный уровень, т.е. необходимо выполнять соотношение $L_{авт\Sigma} \leq [L_{норм}]$ а, в пределе, при минимально необходимых затратах на снижение шума автомобиля

$$L_{авт\Sigma} = [L_{норм}].$$

Тогда уровень прогнозируемого необходимого структурного шума двигателя автомобиля не должен превышать

$$L_{wсм} = [L_{норм}] + 10 \lg 2\pi R^2 - 10 \lg k_{авт\Sigma},$$

где $k_{\Sigma} = 10^{-0,1 \cdot \Delta L_{кан}} (1 + 10^{-0,1 \cdot \Delta L_{вн}}) + 10^{-0,1 \cdot \Delta L_{вып}} + 10^{-0,1 \cdot \Delta L_{авт}}$,

а звуковая мощность структурного шума двигателя автомобиля должно быть не более $P_{wсм} = J_0 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{wсм}}$.