

## О ПРИЧИНАХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАМЫ ТЕПЛОВОЗА НА ХОЛОСТОМ ХОДУ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

*В. В. ГРАЧЕВ, А. В. ГРИЩЕНКО, Ф. Ю. БАЗИЛЕВСКИЙ, М. Н. ПАНЧЕНКО*  
*Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,*  
*Российская Федерация*

*В. В. ФУРМАН*  
*ООО «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов, Российская Федерация*

Как известно, доля бюджета времени тепловоза, приходящаяся на холостой ход (ХХ) силовой установки, может достигать 80 %, в связи с чем обеспечение комфортных условий работы локомотивной бригады именно в этом режиме имеет особое значение.

Одним из результатов применения систем электронного управления впрыском (ЭСУВТ) на тепловозных дизелях, наряду с повышением их экономичности, является улучшение условий труда локомотивной бригады за счет уменьшения шума, которое достигается снижением частоты вращения холостого хода дизеля на 20 % (с 300 до 240 об/мин для дизелей типа ПД1М, ПД4Д тепловозов ТЭМ2, ТЭМ18 в/и). Однако опыт модернизации тепловозов серии ТЭМ2 в условиях промышленных предприятий показывает, что очень часто локомотивные бригады блокируют переход на пониженную частоту вращения по причине резкого увеличения амплитуды низкочастотных колебаний (вибрации) рамы тепловоза и кабины машиниста в этом режиме.

Перевод тепловозных дизелей на работу по газодизельному циклу рассматривается в настоящее время в качестве одного из наиболее перспективных направлений улучшения экономических и экологических характеристик автономного подвижного состава. Одной из проблем организации газодизельного цикла в цилиндрах большого объема при качественном регулировании топливоподдачи является жесткое ограничение верхнего предела коэффициента избытка воздуха по газовому топливу на уровне 1,6–1,7, что вынуждает в режимах ХХ либо ограничивать подачу воздуха в цилиндры дизеля дросселированием его на входе во впускной коллектор или каналы впускных клапанов, либо отключать цилиндры дизеля, причем в значительно большем количестве, чем при работе по дизельному циклу.

Как показывают результаты испытаний дизеля типа ПД1М тепловоза ТЭМ2, модернизированного для работы по газодизельному циклу, именно второй способ является наиболее эффективным, поскольку дросселирование приводит к кратному увеличению насосных потерь и ухудшению условий воспламенения смеси. Вместе с тем из этих же результатов следует, что отключение большого количества цилиндров (четырёх из шести) дизеля в режиме ХХ сопровождается резким увеличением амплитуды низкочастотных колебаний дизель-генераторной установки и рамы тепловоза, что вынуждает отказаться от использования газодизельного цикла в режиме ХХ и малых нагрузок.

Таким образом, увеличение амплитуды низкочастотных колебаний дизель-генераторной установки тепловоза в режиме ХХ при работе с пониженной частотой вращения и отключением части цилиндров является реальной проблемой, ограничивающей возможность использования современных технических решений для улучшения технических и экологических характеристик как новых тепловозов, так и тепловозов прежних лет выпуска.

Известно, что единственной возможной причиной динамического воздействия на опоры дизеля является его внутренняя неуравновешенность. Поскольку рядный четырехтактный шестицилиндровый дизель естественно уравновешен по силам и моментам сил инерции вращающихся и поступательно движущихся масс обоих порядков, единственным возможным источником неуравновешенности в данном случае является суммарный момент нормальных сил  $M_{N\Sigma}$ , действующий со стороны поршней на втулки цилиндров и далее через остов дизеля на поддизельную раму.

Величина его равна индикаторному моменту  $M_i$ , который, в свою очередь, численно равен сумме механических потерь в дизеле  $M_{\text{мех}}$ , эффективного момента на валу дизеля  $M_e$  и момента силы инерции, действующего на коленчатый вал при изменении угловой скорости  $\omega_d$ :

$$M_{N\Sigma} = M_i = J \frac{d\omega_d}{dt} + M_{\text{мех}} + M_e. \quad (1)$$

Оборудование, приводимое дизелем, может размещаться как на поддизельной раме, так и вне ее. При работе дизеля в каждый момент времени справедливо равенство

$$M_e = M_H = M'_H + M''_H, \quad (2)$$

где  $M_H$   $M'_H$  – суммарный момент нагрузки, действующий на коленчатый вал,  $M'_H$  – момент нагрузки от оборудования, размещенного на поддизельной раме,  $M''_H$  – момент нагрузки от оборудования, размещенного вне ее.

Со стороны силовых агрегатов, приводимых от дизеля, на их опоры действует реактивный момент, численно равный  $M_H$ . Суммарный момент  $M_{\text{ПДР}}$ , действующий на поддизельную раму

$$M_{\text{ПДР}} = M_{N\Sigma} - M_H = J \frac{d\omega_d}{dt} + M_{\text{мех}} + M''_H. \quad (3)$$

Таким образом, при работе дизеля на поддизельную раму и всё находящееся на ней оборудование непрерывно действует периодически изменяющийся возмущающий момент, амплитуда которого определяется как конструкцией дизеля, так и моментом нагрузки оборудования, расположенного вне остова дизеля и поддизельной рамы.

При равномерной работе всех цилиндров максимум спектральной плотности момента  $M_{\text{ПДР}}$  приходится на частоту срабатывания цилиндров, равную  $\frac{2\omega_d z}{\tau}$ , где  $z$  – количество цилиндров;  $\tau$  – тактность. Для шестицилиндрового четырехтактного дизеля при  $\omega_d = 5 \text{ с}^{-1}$  (300 об/мин) эта частота составит 15 Гц, при  $\omega_d = 4 \text{ с}^{-1}$  (240 об/мин) 12 Гц. При отключении цилиндров или нарушении равномерности их работы резко возрастает амплитуда гармоники, соответствующей цикловой частоте, равной  $\frac{2\omega_d z}{\tau}$  (соответственно, 2,5 и 2 Гц).

Дизель-генератор с жесткой поддизельной рамой на упругих опорах с учетом ряда допущений может рассматриваться как колебательная система с одной степенью свободы. Как показывают расчеты, резонансная частота этой системы составляет 2–2,15 Гц.

Таким образом, при равномерной работе цилиндров в режиме ХХ дизеля ПД1М максимум спектральной плотности энергии возмущающего момента  $M_{\text{ПДР}}$  приходится на частоту 12–15 Гц, в разы превосходящую резонансную частоту колебаний дизель-генераторной установки на упругих опорах. При отключении цилиндров или нарушении равномерности их работы возрастает амплитуда гармоники цикловой частоты 2–2,5 Гц, близкой к резонансной, что и приводит к резкому увеличению амплитуды колебаний дизель-генератора и рамы тепловоза.

На тепловозах серий ТЭМ2, ТЭМ18 в/и дополнительным фактором, способствующим увеличению амплитуды резонансных колебаний дизель-генераторной установки, является размещение всего механически приводимого вспомогательного оборудования (вентиляторы шахты холодильника и охлаждения тяговых электродвигателей, тормозной компрессор, двухмашинный агрегат) вне дизельной рамы. Следствием такой компоновки, как следует из выражения (3), является максимальное значение амплитуды изменения момента нагрузки  $M''_H$  и возмущающего момента  $M_{\text{ПДР}}$ .

С целью обеспечения работоспособности силовой установки тепловоза в режиме ХХ при отключении цилиндров и снижении частоты вращения коленчатого вала предлагаются следующие меры:

- для уменьшения амплитуды возмущающего момента  $M_{\text{ПДР}}$  на стадии проектирования тепловоза необходимо максимально использовать электрический привод вспомогательного оборудования;
- при отключении цилиндров дизеля необходимо выбирать оптимальное сочетание оставляемых в работе цилиндров, обеспечивающее смещение максимума спектральной плотности энергии в область гармоники оборотной частоты  $\omega_d$ ;
- ввести в техническую и ремонтную документацию тепловозных дизель-генераторов, дизели которых оборудованы системой ЭСУВТ любого типа, требование обязательного выравнивания мощностей цилиндров в режимах ХХ и малых нагрузок.