

П.М. СУРОВЦЕВ, ФГУП ВНИКТИ (Россия)

Ю.Н. СОКОЛОВ, канд. техн. наук, ФГУП ВНИКТИ (Россия)

## ДИНАМИЧЕСКАЯ НАГРУЖЕННОСТЬ ПРИВОДОВ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ ЛОКОМОТИВОВ

Розглянуто питання підвищення надійності приводів допоміжних агрегатів експлуатованого парку магістральних і маневрових тепловозів і технічні рішення, реалізовані при їхній модернізації

Рассмотрены вопросы повышения надежности приводов вспомогательных агрегатов эксплуатируемого парка магистральных и маневровых тепловозов и технические решения, реализованные при их модернизации

Considered questions: increase of reliability of subsidiary drivers of main-line and shunting diesel and electric locomotives and engineering solutions implemented during their retrofit.

Анализ эксплуатации магистральных тепловозов и электровозов по сети железных дорог России свидетельствует о необходимости совершенствования динамики приводов вспомогательных агрегатов и повышения их надежности. По данным МПС за 2000-2003 г.г. повреждения и неплановые ремонты тепловозов по причине выхода из строя вспомогательных механизмов и их приводов составляют 4...8% от общего количества повреждений и неплановых ремонтов по тепловозам эксплуатируемого парка. По отдельным дорогам этот показатель доходит до 12...15%.

Исследованиями динамики механических, гидромеханических и электрических приводов вспомогательных агрегатов установлено, что динамическая нагруженность элементов приводов определяется, в основном, крутильными колебаниями.

Задача обеспечения надежности работы приводов вспомогательных агрегатов решается путем обеспечения допустимого уровня динамических нагрузок от крутильных колебаний за счет правильного выбора упруго-инерционных параметров соединений приводов и обеспечения прочности соединений приводов в условиях монтажных и эксплуатационных расцентровок от соединяемых агрегатов.

Анализ динамики приводов вспомогательных агрегатов локомотивов показал, что одним из направлений повышения их надежности является применение упругих безззорных соединений с высокой компенсирующей способностью, в которых отсутствуют изнашиваемые элементы, требующие периодической замены. Этим требованиям удовлетворяют муфты с резиновыми, резинокордными и резинотканевы-

ми элементами в виде торообразных оболочек и плоских дисков.

ВНИКТИ совместно с НПП «Прогресс» (Омск) и АО ВЭлНИИ (Новочеркасск) разработана конструкция высокоэластичной соединительной муфты с резинокордной оболочкой (РКО) типоразмера 400×105 (модель Н-343). Муфта предназначена для приводов компрессоров КТ-6 и ВУ 3,5/10-1450 мотор-компрессорных установок эксплуатирующихся и перспективных электровозов, и может быть применена в приводах вспомогательных агрегатов эксплуатирующихся электровозов ЧС2Т и тепловозов ЧМЭ, а также в приводах вспомогательных агрегатов перспективных и эксплуатирующихся тепловозов при модернизации их силовых установок и приводов.

Необходимость разработки новой конструкции упругой соединительной муфты для вспомогательных приводов возникла в связи с решением проблемы повышения надежности их работы, что обусловлено низкой надежностью применяемых в приводах соединений с полужесткими пластинчатыми муфтами (привод компрессора мотор-компрессорной установки электровозов ВЛ10) и втулочно-пальцевыми муфтами (привод компрессора мотор-компрессорной установки электровозов ВЛ60, ВЛ65, ВЛ80, ВЛ85), а также выработкой ресурса резинокордных оболочек типа «Periflex» приводов вспомогательных агрегатов электровозов ЧС2Т серии 53Е и тепловозов ЧМЭЗ, эксплуатирующихся на сети железных дорог страны.

Высокоэластичная соединительная муфта с РКО 400×105 (модель Н-343) (рис. 1, 2) представляет собой безззорное соединение с высо-

кой компенсирующей способностью, в котором отсутствуют изнашиваемые элементы, требующие периодической замены. Упругий элемент муфты (РКО) характеризуется высокой долговечностью. Муфта проста в обслуживании, не требует постоянного контроля затяжки болтовых соединений и состояния РКО. Высокая компенсирующая способность муфты позволяют уменьшить трудоемкость монтажа мотор-компрессора и других соединяемых агрегатов. Замковая часть узла крепления бортовых частей оболочки спрофилирована соответствующим образом для обеспечения несущей способности муфты. Внутренние нажимные кольца выполнены сплошными, что по сравне-

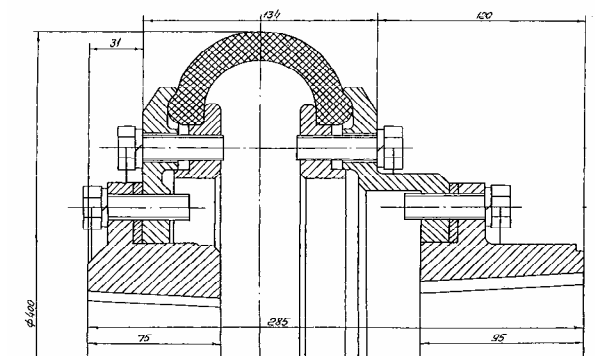


Рис. 1. Муфта с резинокордной оболочкой 400×105 мотор-компрессора электровоза ВЛ10

Характеристики высокоэластичной муфты с РКО 400×105, экспериментально определенные ВНИКТИ, проведены в табл. 1, 2 и на рис. 3. Конструктивно РКО 400×105 выполняются с радиальным расположением нитей корда и с диагональным (под углом 36°), что отражено в представленных данных. Упруго-демпфирующие характеристики муфт в режимах динамического нагружения определены при вынужденных крутильных колебаниях муфты в диапазонах частот 500...700 кол/мин (8,3...11,7 Гц) и 1100...1450 кол/мин (18,3...24,2 Гц) при амплитудах динамического крутящего момента 0,2...0,7 кН·м, соответствующих режимам динамического нагружения приводов компрессоров КТ-6Эл и ВУ3,5/10-1450.

В зоне высоких температур при температуре оболочки 50...55°С статическая крутильная жесткость муфты понижается в 1,4...1,6 раза для РКО с радиальным расположением нитей корда и в 1,6 раз для РКО с диагональным расположением нитей корда и составляет соответ-

ственно с другими отечественными аналогами, имеющими разрезные нажимные кольца, позволило повысить несущую способность и надежность муфты. РКО 400×105 по своим габаритным и присоединительным размерам полностью соответствует РКО муфты «Periflex», а по несущей способности и упруго-демпфирующим и компенсирующим свойствам близка к ней. Поэтому отечественная РКО 400×105 может быть применена в приводах вспомогательных агрегатов электровозов ЧС2Т серии 53Е и тепловозов ЧМЭЗ с сохранением штатных металлических деталей муфты.

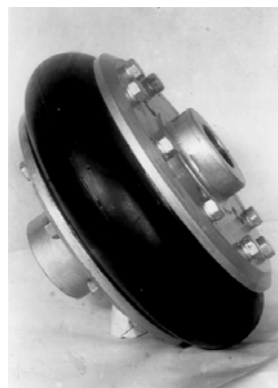


Рис. 2. Муфта с РКО 400×105 привода компрессора мотор-компрессорной установки электровоза ВЛ65

венно 35,5...43,9 кН·м/рад и 44,3 кН·м/рад. При этом, динамическая крутильная жесткость ( $C_M^*$ ) и внутреннее трение ( $\mu_M^*$ ) муфт понижаются соответственно в 1,35...1,6 и 1,87...2,3 раза и составляют ( $M_{ср}=0$ ,  $t_{окр}=11...16^{\circ}\text{C}$ ):

– РКО с радиальным расположением нитей корда:  $C_M^*=47,9...53,6$  кН·м/рад,  $\mu_M^*=0,075...0,23$  ( $N=480...720$  кол/мин,  $F_M=0,18...0,48$  кН·м);

– РКО с диагональным расположением нитей корда:  $C_M^*=48,7...70,6$  кН·м/рад,  $\mu_M^*=0,18...0,23$  ( $N=490...780$  кол/мин,  $F_M=0,2...0,58$  кН·м).

При отрицательных температурах увеличение крутильной жесткости муфт может быть отражено коэффициентом  $k_t$ :

$t_m, ^{\circ}\text{C}$	12	-0,7	-4,7	-12,3	-24,3
$k_t$	1,0	1,35	1,52	1,58	1,93
$t_m, ^{\circ}\text{C}$	-32,5	-41	-43	-47	
$k_t$	1,87	2,33	2,33	2,9	

При температуре оболочки -47°С внутреннее трение муфт повышается в 1,45 раз. Статические упруго-демпфирующие характеристики муфт с разработанными РКО после опытов при пониженных температурах изменились незначительно.

При вращении муфт с частотой 1500 мин<sup>-1</sup> ( $M_{cp}=0$ ) аксиальные силы при установочной ширине оболочки в пределах ±5 мм от номинального значения составляют для РКО обоих типов 1,2...1,4 кН.

Таблица 1

Статические характеристики муфт с РКО 400×105

Показатель	С радиальным расположением нитей корда	С диагональным расположением нитей корда
Номинальный крутящий момент, кН·м	2,0	2,0
Максимальный крутящий момент, кН·м	5,0	5,0
Максимальная частота вращения, с <sup>-1</sup> (мин <sup>-1</sup> )	26 (1560)	26 (1560)
Статическая крутильная жесткость при номинальном крутящем моменте, $t = 20^{\circ}\text{C}$ , кН·м/рад	55,6...62,5	72,7
Внутреннее трение $\psi$	0,9...1,03	0,94
Статическая радиальная жесткость при радиальном смещении 4 мм, Н/мм	620...820	880...900
Статическая угловая (карданная) жесткость при угловом смещении 1,5°, Н·м/град	84...90	84
Статическая осевая жесткость при осевом смещении 4,5 мм	270...300	250...270
Амплитуда динамического крутящего момента при частоте колебаний 1500 кол/мин (25 Гц), $t = 20^{\circ}\text{C}$ , кН·м, не более	0,75	0,75
Допустимая величина смещения осей соединяемых валов, не более		
– радиальное, мм	4	4
– осевое, мм	4,5	4,5
– угловое, рад (град)	0,262 (1,5)	0,262 (1,5)

Таблица 2

Динамические характеристики муфт с РКО400×105

Показатель	С радиальным расположением нитей корда	С диагональным расположением нитей корда
Динамическая крутильная жесткость, кН·м/рад ( $t = 12...16^{\circ}\text{C}$ )		
– $M_{cp} = 0$	65...84	118...121
– $M_{cp} = 0,2...0,3$ кН·м	71...87	118...128
– $M_{cp} = 0,54...0,78$ кН·м	79...96	118 – 130
Удельное трение $\mu_m^*$ ( $t = 12...16^{\circ}$ )		
– $M_{cp} = 0$	0,14...0,39	0,15...0,27
– $M_{cp} = 0,2...0,3$ кН·м	0,18...0,29	0,19...0,25
– $M_{cp} = 0,54...0,78$ кН·м	0,12...0,3	0,17...0,32

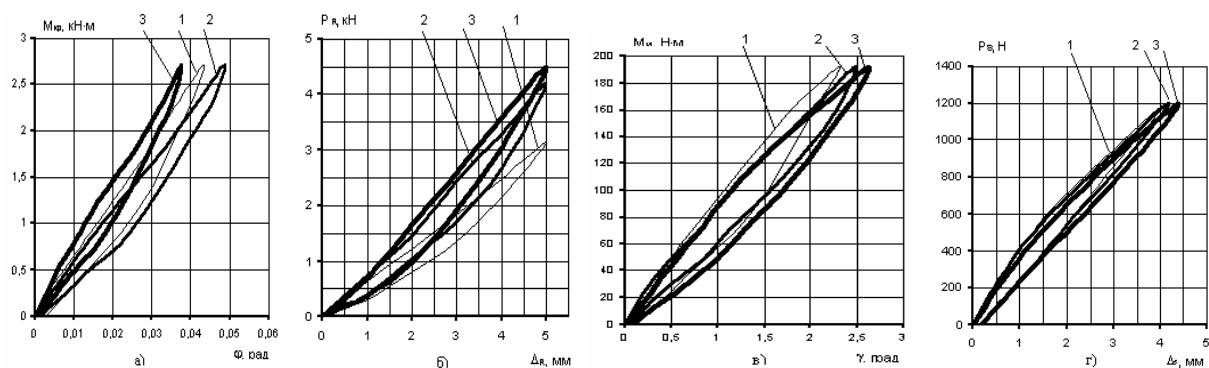


Рис. 3. Статические характеристики муфт с РКО 400×105: а – тангенциальная деформация муфты при нагружении крутящим моментом; б – радиальные усилия при радиальных смещениях осей валов; в – изгибающие моменты при угловых смещениях осей валов; г – осевые силы при осевых смещениях валов; 1, 2 – РКО с радиальным расположением нитей корда; 3 – РКО с диагональным расположением нитей корда

При частоте вращения до  $600 \text{ мин}^{-1}$  компенсирующие свойства муфт при радиальных и угловых смещениях валов близки к их характеристикам при статическом нагружении. При частоте вращения  $1500 \text{ мин}^{-1}$  радиальная и угловая жесткости муфт повышаются в 1,2...1,8 раза. При этом радиальные усилия при радиальном смещении осей валов 4 мм составляют 2,2...2,5 кН.

Несущая способность муфт с РКО определяется моментом трения в узлах крепления бортовых частей, зависящего от усилия затяжки бортовых частей и состояния контактирующих поверхностей полумуфт и бортовых частей, и крутящим моментом потери устойчивости оболочки.

Крутящий момент потери устойчивости муфт с разработанными РКО составляет 5,4...5,9 кН·м. При этом усилие сжатия бортовых частей составило 75 кН, а реализованный коэффициент трения составил 0,31...0,42.

Для обеспечения передачи муфтой с разработанными РКО крутящего момента 5 кН·м требуется затяжка бортовых частей усилием не менее 46 кН, что соответствует сжатию бортовых частей на величину не менее 3,6...3,7 мм

(18...19% от первоначальной толщины борта). Для гарантированной передачи муфтой крутящего момента 5 кН·м установлена регламентированная затяжка бортовых частей усилием сжатия 70...80 кН с контролем усилия затяжки по деформации сжатия бортовой части, которая должна составлять 4,3...4,6 мм (21,5...23% от первоначальной толщины борта).

Ресурсные испытания муфты с РКО с радиальным расположением нитей корда с блоком нагружения, приведенным в табл. 3, показали:

- максимальное превышение температуры оболочки при амплитудах динамического крутящего момента 0,5...1,0 кН·м ( $M_{cp}=0,5 \text{ кН·м}$ ,  $N=750...1450 \text{ кол/мин}$ ) составило  $\Delta t = 15,6...22,5^\circ\text{C}$ , что является допустимым для длительной работы;

- режим нагружения с амплитудой динамического крутящего момента 1,2 кН·м ( $M_{cp}=0,7 \text{ кН·м}$ ,  $N=860 \text{ кол/мин}$ ) является предельным по теплонпряженности оболочки (превышение температуры оболочки  $\Delta t=33...37^\circ\text{C}$ );

- при частоте колебаний  $N=1300...1450 \text{ кол/мин}$  допустимыми являются амплитуды динамического крутящего момента 0,75 кН·м ( $M_{cp}=0,5 \text{ кН·м}$ ).

Таблица 3

Блок нагружения муфты с РКО 400×105 и температура оболочки при ресурсных испытаниях

№ режима	$M_{cp}$ , кН·м	F, кН·м	N, кол/мин	Число циклов, млн	$\Delta t_m$ , °C	$t_{окр}$ , °C
1	0,5	0,5...0,55	1420...1450	7,0	8,8...15,6	7...12
2	0,5	0,7...0,75	1310	6,0	14...19	11...13
3	0,5	1,0	750	3,02	21...22,5	9...11
4	0,7	1,2	860	3,0	33...37	10...11,5

Всего 19,02

Допустимые амплитуды динамических крутящих моментов при других частотах колеба-

ний N могут быть получены из соотношения

$$F_{aN} = F_{a1450} \cdot \sqrt{\frac{1450}{N}},$$

где  $F_{a1450}$  – допустимая амплитуда динамического крутящего момента при частоте колебаний  $1450 \text{ мин}^{-1}$ .

Муфты с разработанными РКО прошли эксплуатационные испытания с положительными результатами в приводах мотор-компрессоров электровозов ВЛ10, ВЛ65, ЭП1 в климатических зонах Европейской части и Сибири, а также в приводах мотор-вентиляторов электровозов ЧС2Т серии 53Е и приводах вспомогательных агрегатов тепловозов ЧМЭЗ и рекомендованы для применения на тяговом подвижном составе.

Для приводов вспомогательных агрегатов ВНИКТИ разработана дисковая резинокордная муфта (рис. 4, 5). Конструктивно разработан типоразмерный ряд этих муфт (рис. 6). Муфты с одним или двумя дисковыми резинокордными элементами предназначены для использования в конструкциях упругих карданных валов. Эти муфты в одиночном исполнении могут быть использованы в скоростных приводах при частоте вращения  $2000 \dots 3000 \text{ мин}^{-1}$ . Высокая радиальная жесткость резинокордных муфт позволяет их использовать в карданных валах без подцентровки промежуточных элементов, что выгодно ее отличает от других конструкций упругих муфт, используемых в упругих карданных валах (брусковые муфты, муфты с РКО). Основные характеристики дисковых муфт типоразмерного, экспериментально определенного ВНИКТИ, ряда приведены в табл. 4.

Несущая способность дисковых резинокордных муфт обеспечивается соответствующим образом спрофилированной замковой частью, а необходимый момент трения в зонах контактирующих поверхностей диска и полу-муфт – деформацией сжатия бортовых частей на требуемую величину, определяемую дистанционными втулками, установленными в замковой части.

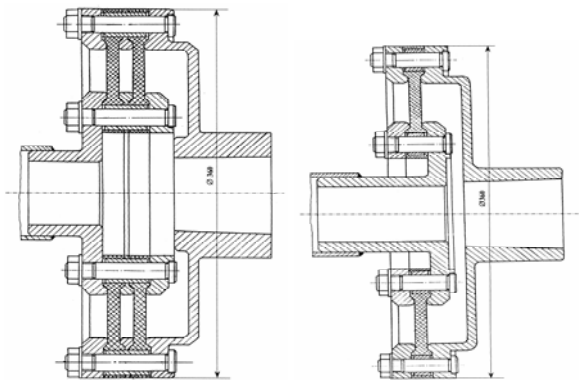


Рис. 4. Дисковые резинокордные муфты

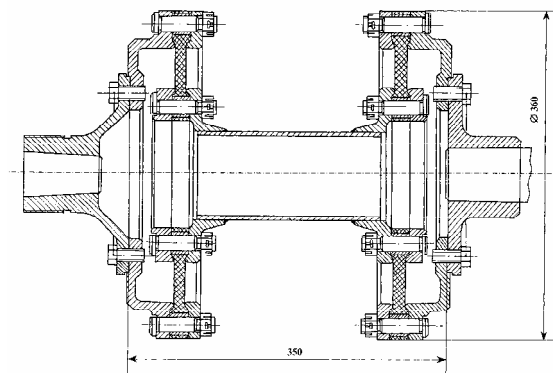


Рис. 5. Трансмиссионный вал с дисковыми резинокордными муфтами



Рис. 6. Трансмиссионный вал с дисковыми резинокордными муфтами и резинокордные диски типоразмерного ряда

В связи с выработкой ресурса дизелей типа 10Д100 и 14Д40 тепловозов ТЭ10 и М62 в отрасли осуществляется модернизация этих тепловозов с заменой двухтактных дизелей на более экономичные четырехтактные дизели типа Д49 производства ОАО «Коломенский завод», включающая и модернизацию приводов вспомогательных агрегатов. Модернизация приводов выполняется на основе применения соединений с упругими муфтами с резиновыми и резинокордными элементами взамен штатных соединений с полужесткими пластинчатыми муфтами и карданными валами автомобильного типа. При разработке проектов модернизации этих тепловозов были учтены опыт первой подобной модернизации тепловозов ТЭЗ с заменой двухтактного дизеля 2Д100 на четырехтактный дизель Д49 и результаты эксплуатации тепловозов 2ТЭ10У, 2М62У с упругими муфтами в приводах вспомогательных агрегатов.

Параметры и конструкции соединений с упругими муфтами приводов вспомогательных агрегатов выбирались на основе расчетов крутильных колебаний валопроводов силовых установок модернизируемых тепловозов с последующей экспериментальной проверкой динамической нагруженности приводов. При выборе упругих муфт были также учтены вопросы

повышения компенсирующих свойств соединений приводов, улучшения их технологичности и ремонтпригодности, унификации новых соединений.

Изменение динамической нагруженности валопроводов силовых установок тепловозов в связи с заменой дизелей в первую очередь необходимо было учитывать при организации приводов вспомогательных агрегатов, расположенных со стороны дополнительного отбора мощности дизелей типа Д49. В узле дополнительного отбора мощности этих дизелей применен торсионный вал, крутильная жесткость которого соизмерима с крутильной жесткостью упругих муфт. Вопросы обеспечения требуемого спектра собственных частот крутильных колебаний приводов вспомогательных агрегатов со стороны дополнительного отбора мощности дизелей типа Д49 и допустимого уровня динамических нагрузок в приводах от крутильных

колебаний решены путем оптимизации упруго-инерционных соединений приводов.

Для приводов вспомогательных агрегатов модернизированных тепловозов 2ТЭ10, 2М62 наиболее оптимальным решением явилось применение упругих трансмиссионных валов с муфтами с резиновыми вкладышами в виде трапецеидальных брусков (брускового муфты нескольких типоразмеров). Муфты подобного типа прошли эксплуатационную проверку в приводах вспомогательных агрегатов серийных тепловозов 2ТЭ10М, 2ТЭ10У, 2М62У, и это техническое решение позволило унифицировать ряд упругих соединений приводов вспомогательных агрегатов эксплуатационного парка грузовых тепловозов. Конструкция брускового муфт разработана АО «Лугансктепловоз» и усовершенствована и развита в типоразмерный ряд ВНИИЖТом.

Таблица 4

Технические характеристики дисковых резинокордных муфт

№ п/п	Показатель	Типоразмер муфты			
		250×80	310×100	360×120	430×185
1	Количество резинокордных дисков в муфте	2	1	1	1
2	Номинальный крутящий момент, кН·м	0,5	0,5	1,0	2,0
3	Максимальный крутящий момент, кН·м	1,5	1,5	3,0	6,0
4	Максимальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	3000	3000	3000	3500
5	Деформация сжатия бортовых частей, мм (%)	3 (30)	3 (30)	3 (30)	3 (21,4)
6	Статические жесткости				
	– крутильная, кН·м/рад	24,0	21,0	36,0	71,0
	– крутильная относительная, рад <sup>-1</sup>	48,0	42,0	36,0	35,5
	– радиальная, кН/мм	5,0	3,25	4,0	6,5
	– угловая (изгибная), кН·м/рад	59	60	80	120
	– осевая, Н/мм	500	400	550	700
7	Удельное трение	0,15...0,2			
8	Динамическая крутильная жесткость, кН·м/рад при амплитуде динамического крутящего момента, кН·м	31,2...45,6	34...54	43...56	106,5...128
	и частоте, Гц	0,15...0,65	0,15...1,4	0,2...1,5	0,25...1,5
		12...28	16,7	16,7	13,3...18,3
9	Допускаемые смещения осей соединяемых валов (n=1500 мин <sup>-1</sup> )				
	– радиальное, мм	1,0	1,0	1,0	1,0
	– угловое, рад (град)	0,0436 (2,5)	0,0436 (2,5)	0,0436 (2,5)	0,0436 (2,5)
	– осевое, мм	3	3,5	3,5	4
10	Допустимая амплитуда эластического момента при частоте 25 Гц, кН·м	0,5	0,3	0,5	0,36

В силовой установке модернизированных тепловозов 2ТЭ10МК применен дизель-

генератор 1А-9ДГ исп. 3 производства ОАО «Коломенский завод» с четырехтактным 16-ти цилиндровым дизелем 16ЧН 26/26 мощностью 2206 кВт (3000 л.с.), рабочий диапазон частот вращения 400...850 мин<sup>-1</sup>. Модернизация приводов вспомогательных агрегатов выполнена на основе соединений с брусковыми муфтами трех типоразмеров. Трансмиссионные валы с брусковыми муфтами применены в приводах передней части – двухмашинного агрегата (ДМА) и редуктора вентилятора охлаждения тягового генератора, и в задней части – гидромеханического редуктора (ГМР) вентилятора холодильной камеры. В соединении привода заднего распределительного редуктора (ЗРР) применен валопровод с брусковой муфтой со стороны редуктора и пластинчатой муфтой со стороны дополнительного отбора мощности дизеля. В соединении привода компрессора применена упругая муфта с РКО ЭМ 500×130. В соединении привода переднего распределительного редуктора (ПРР) применен штатный валопровод с полужесткими пластинчатыми муфтами. Применение полужестких пластинчатых муфт было обусловлено габаритными возможностями размещения соединения (привод ЗРР) и необходимостью обеспечения допустимого уровня динамических нагрузок от крутильных колебаний (привод ПРР). В приводах вентиляторов охлаждения ТЭД (механический привод без гидромуфты) применена штатная брусковая муфта, встроенная в ступицу вентиляторного колеса.

Система валопровода силовой установки тепловоза с электрической передачей мощности образует две независимые динамические системы, разделенные большой массой якоря тягового генератора с автономным развитием крутильных колебаний: система валопровода дизель-генератора и приводов вспомогательных агрегатов со стороны дополнительного отбора мощности (валопровод задней части) и система приводов вспомогательных агрегатов, приводимых от вала якоря тягового генератора (валопровод передней части).

Для системы валопровода передней части с механическим приводом поршневого компрессора от раздаточного редуктора (ПРР) допустимый уровень динамических нагрузок обеспечивается при применении в приводе ПРР соединения с высокой крутильной жесткостью (типа полужестких пластинчатых муфт), а в приводах вспомогательных агрегатов – эластичных соединений, обеспечивающих выведение низшей собственной частоты крутильных

колебаний ниже минимальной частоты вращения коленчатого вала дизеля (далее – частота вращения дизеля).

Для валопроводов силовых установок тепловозов с дизелями типа Д49 наибольшая динамическая нагруженность от крутильных колебаний получается, как правило, в приводах со стороны дополнительного отбора мощности дизеля (валопровод задней части), где имеют место наибольшие амплитуды крутильных колебаний масс дизеля. На развитие крутильных колебаний этой части валопровода силовой установки наиболее существенное влияние оказывают упруго-инерционные параметры торсионного вала дизеля и соединения «дизель – ЗРР». Решение задачи варьирования податливостью соединения в приводе ЗРР показало, что ее изменение в широких пределах незначительно влияет на изменение собственных частот крутильных колебаний валопровода задней части из-за наличия в узле дополнительного отбора мощности дизеля торсионного вала диаметром 42 мм.

Собственные частоты крутильных колебаний валопровода передней части  $N_1=278$  кол/мин, определяемые упруго-инерционными параметрами привода ДМА;  $N_2=6700...6980$  кол/мин, определяемые упруго-инерционными параметрами приводов вспомогательных агрегатов передней части, и  $N_3=6700...6980$  кол/мин, определяемые упруго-инерционными параметрами привода компрессора КТ-7, находятся за пределами рабочего диапазона частот вращения дизеля и компрессора. Расчетные уровни динамических нагрузок в валопроводах передней части 0,75...0,87 кН·м в приводах компрессора и ПРР и 0,01 кН·м в приводе ДМА от колебаний 1-го порядка по частоте вращения компрессора и 0,6...0,8 кН·м в приводах компрессора и ПРР и 0,02 кН·м в приводе ДМА от колебаний 3-го порядка по частоте вращения компрессора являются допустимыми для упругих муфт приводов для длительной работы.

Спектр собственных частот валопровода задней части:

–  $N_1 = 338$  кол/мин определяется массами вспомогательных агрегатов этой части тепловоза и насосов дизеля и податливостью торсионного вала;

–  $N_2 = 1865...1886$  кол/мин определяется массами вспомогательных агрегатов задней части и податливостью брусковой муфты привода ЗРР;

–  $N_3 = 2190...2267$  кол/мин и  $N_5=4765$  кол/мин определяются упруго-инерционными

параметрами привода ГМР;

–  $N_4 = 2450$  кол/мин («моторная» форма собственных крутильных колебаний) и  $N_8 = 6686$  кол/мин связаны с валопроводом коленчатого вала дизеля;

–  $N_6 = 5712$  кол/мин и  $N_7 = 6196$  кол/мин определяются упруго-инерционными параметрами приводов насосов дизеля.

Низшая собственная частота крутильных колебаний валопровода задней части находится ниже минимальной частоты вращения дизеля, что обуславливает невысокий уровень динамических нагрузок при нормальной работе цилиндров. Динамическая нагруженность торсионного вала и приводов вспомогательных агрегатов задней части связана с развитием колебаний по двух- и трехузловой формам.

Максимальные динамические нагрузки в приводе ЗРР (экспериментальные исследования) составили  $0,16$  кН·м ( $v=1,5$  – порядок колебаний по частоте вращения дизеля,  $N=260\dots290$  кол/мин) в режимах запуска и останова дизеля;  $0,2$  кН·м ( $v=2,5$ ,  $n_d=800\dots850$  мин<sup>-1</sup>) при работе дизеля на холостом ходу;  $0,29\dots0,31$  кН·м ( $v=2,5+1,5$ ;  $n_d=820\dots850$  мин<sup>-1</sup>) при работе дизеля под нагрузкой при нормальной работе всех цилиндров и  $0,41\dots0,44$  кН·м ( $v=3+1,5+0,5$ ;  $n_d=850$  мин<sup>-1</sup>) при отключении подачи топлива в первый левый цилиндр дизеля (имитация разрегулировки топливной аппаратуры).

Наибольшие расчетные амплитуды динамических напряжений в коленчатом валу дизеля составляют  $\tau_a = 27,5$  МПа ( $n_d = 850$  мин<sup>-1</sup>).

Максимальные амплитуды динамических крутящих моментов в торсионе дизеля составляют  $570\dots610$  Н·м ( $\tau_a = 39\dots42$  МПа) при нормальной работе цилиндров дизеля и  $800\dots860$  Н·м ( $\tau_a = 55\dots59$  МПа) при регулировке топливной аппаратуры дизеля и являются допустимыми для длительной работы ( $[\tau_a] = 100$  МПа).

Максимальный уровень динамических нагрузок в брусковых муфтах привода ГМР составляет  $0,18$  кН·м.

Максимальные уровни динамических нагрузок в брусковых муфтах валопровода задней части  $0,31\dots0,44$  кН·м является допустимым для длительной работы ( $[F_a] = 1,5\dots2,0$  кН·м).

Собственные частоты крутильных колебаний парциальной системы привода вентилятора охлаждения главного генератора составляют  $N_1 = 219$  кол/мин и  $N_2 = 33480$  кол/мин. Невысокий уровень динамических нагрузок в приводе вентилятора охлаждения тягового генератора

обусловлен тем, что резонансные частоты колебаний главных порядков вынуждающего момента дизеля находятся за пределами рабочего диапазона частот вращения дизеля, и местом его привода – привод 69-й группы дизеля выполнен от сечения коленчатого вала, расположенного рядом с большой массой тягового генератора и имеющего невысокие амплитуды крутильных колебаний.

В силовой установке модернизированного тепловоза 2М62К применен дизель-генератор 5-26ДГ производства ОАО «Коломенский завод» с 4-х тактным 12-ти цилиндровым дизелем 12ЧН 26/26 мощностью 1470 кВт (2000 л.с.), рабочий диапазон частот вращения  $400\dots750$  мин<sup>-1</sup>.

Модернизация приводов вспомогательных агрегатов выполнена на основе применения упругих муфт различного типа взамен штатных валопроводов с пластинчатыми муфтами и карданного вала автомобильного типа (привод ЗРР). В соединении привода ПРР применена упругая муфта с РКО ЭМ 360×100. В соединениях приводов ДМА и вентилятора охлаждения ТЭД задней тележки применены упругие муфты с цилиндрическими резиновыми вкладышами, работающими на срез-сжатие, разработанные ВНИКТИ. В соединении привода ЗРР применен валопровод с брусковой муфтой (по типу брусковой муфты привода ЗРР модернизированного тепловоза 2ТЭ10МК) со стороны ЗРР и пластинчатой муфтой со стороны дизеля. Применение пластинчатой муфты в этом соединении связано с габаритными ограничениями. В соединении привода ГМР применен трансмиссионный вал с двумя дисковыми резинокордными муфтами типоразмера 360×120 мм, разработанный ВНИКТИ. В приводах компрессора и вентиляторов охлаждения главного генератора применены штатные соединения: соответственно валопровод с пластинчатыми муфтами и карданные валы автомобильного типа (последние оставлены ввиду значительных конструктивных радиальных смещений осей соединяемых валов).

В системе валопровода силовой установки со стороны дизеля могут быть выделены две подсистемы вспомогательных приводов: приводы вспомогательных агрегатов со стороны ПРР и приводы вспомогательных агрегатов со стороны дополнительного отбора мощности дизеля (приводы со стороны ЗРР).

Спектр собственных частот крутильных колебаний приводов со стороны ЗРР:

–  $N_1 = 426$  кол/мин определяется массами вспомогательных агрегатов этой части вало-



провода и крутильной податливостью торсионного вала дизеля;

–  $N_4 = 1522$  кол/мин определяется упругоинерционными параметрами привода вентилятора охлаждения ТЭД задней тележки;

–  $N_6 = 2343$  кол/мин, определяется массами вспомогательных агрегатов этой части валопровода и податливостью брусковой муфты привода ЗРР;

–  $N_7 = 3023$  кол/мин определяется упругоинерционными параметрами привода ГМР вентилятора холодильника;

–  $N_8 = 3188$  кол/мин «моторная» форма с максимальными амплитудами колебаний масс валопровода дизеля.

Спектр собственных частот крутильных колебаний приводов со стороны ПРР:

–  $N_2 = 469$  кол/мин определяется упругоинерционными параметрами привода ДМА;

–  $N_3 = 1206$  кол/мин определяется массами вспомогательных агрегатов этой части валопровода и податливостью муфты с РКО ЭМ 360×100 привода ПРР;

–  $N_5 = 2034$  кол/мин определяется упругоинерционными параметрами приводов вентиляторов охлаждения тягового генератора и ТЭД передней тележки.

Динамическая нагруженность торсионного вала дизеля и привода ЗРР составила:

– в режимах запуска и остановки дизеля максимальный уровень динамических крутящих моментов составил 0,82...0,85 кН·м на торсионном валу ( $\tau_a=57...59$  МПа) и 0,82 кН·м в приводе ЗРР и определялся усилением колебаний 3-го порядка при  $n_d=40...100$  мин<sup>-1</sup>;

– при работе дизеля на холостом ходу максимальные амплитуды динамических крутящих моментов составили 0,3...0,4 кН·м на торсионном валу ( $\tau_a=21...28$  МПа) и 0,2...0,35 кН·м в приводе ЗРР и определялись колебаниями 3,5 и 0,5 порядков ( $n_d=550...650$  мин<sup>-1</sup>);

– при работе дизеля под нагрузкой максимальные амплитуды динамических крутящих моментов составили 0,95 кН·м на торсионном валу ( $\tau_a=65,5$  МПа) и 0,77 кН·м в приводе ЗРР и определялись колебаниями 3 и 0,5 порядков ( $n_d=750$  мин<sup>-1</sup>);

– при отключении подачи топлива в 4-й цилиндр дизеля максимальные амплитуды динамических крутящих моментов составили 1,0...1,08 кН·м на торсионном валу ( $\tau_a=69...74,5$  МПа) и 0,82...0,89 кН·м в приводе ЗРР и определялись усилением колебаний 0,5 порядка во всем рабочем диапазоне частот вращения дизеля.

Уровни динамических нагрузок в торсионном валу и в брусковой муфте привода ЗРР являются допустимыми для длительной работы (для торсионного вала  $[\tau_a]=100$  МПа, для брусковой муфты  $[F_a]=1,5...2,0$  кН·м.

Максимальный уровень амплитуд динамических напряжений в коленчатом валу дизеля  $\tau_a = 29$  МПа ( $n_d=750$  мин<sup>-1</sup>) является допустимым.

Максимальные амплитуды динамических крутящих моментов в приводе ГМР составили:

– в режимах запуска и остановки дизеля 0,12...0,4 кН·м;

– при работе дизеля на холостом ходу 0,11...1,13 кН·м;

– при работе дизеля под нагрузкой 0,35...0,41 кН·м;

– при отключении подачи топлива в 4-й цилиндр дизеля 0,43...0,48 кН·м.

Температура упругих элементов дисковых муфт привода ГМР составила 30...35°C ( $t_{окр}=25...30$ °C). Динамическая нагруженность дисковых резинокордных муфт находится на допустимом уровне ( $[F_a]=0,5$  кН·м,  $[t_{max}]=70$ °C,  $[\Delta t]=35...40$ °C).

Максимальные амплитуды динамических нагрузок в приводе вентилятора охлаждения ТЭД задней тележки 0,11...0,13 кН·м при работе дизеля под нагрузкой и 0,13...0,15 кН·м при отключении подачи топлива в 4-й цилиндр дизеля являются допустимыми. Максимальная установившаяся температура резиновых элементов муфты не превышала 30...35°C ( $t_{окр}=25...30$ °C).

Расчетный уровень динамических нагрузок в приводах вспомогательных агрегатов со стороны ПРР получен достаточно низким, что связано с применением в приводе ПРР муфты с РКО ЭМ 360×100, а также с тем, что привод осуществляется от сечения коленчатого вала дизеля, расположенного к большой маховой массе тягового генератора и имеющего низкие амплитуды крутильных колебаний. Максимальные суммарные амплитуды динамических крутящих моментов получены 50 кН·м в приводе ПРР и 20 кН·м в приводе ДМА. Максимальная установившаяся температура упругих элементов муфт приводов ПРР и ДМА составила соответственно 40...42°C и 30°C ( $t_{окр}=30$ °C) и в значительной степени определялась высокой температурой валов 69-й группы дизеля и ПРР ( $t=44...49$ °C). Динамическая нагруженность упругих муфт привода ПРР и ДМА является допустимой для длительной работы.

Выполненные исследования показали, что силовые установки модернизированных тепловозов 2ТЭ10МК с дизелем 16ЧН 26/26 и 2М62К с дизелем 12ЧН 26/26 и упругими муфтами в приводах вспомогательных агрегатов не имеют запретных зон в рабочем диапазоне частот вращения дизеля, а уровни динамических нагрузок от крутильных колебаний в валопроводах силовых установок являются допустимыми для длительной работы.

В связи с выработкой ресурса дизелей тепловоза ЧМЭЗ в отрасли осуществляется модернизация этих тепловозов с заменой штатного дизеля К6S31DR на отечественный 8ЧН 26/26 мощностью 993 кВт, рабочий диапазон частот вращения 350...750 мин<sup>-1</sup> производства ОАО «Коломенский завод». Отечественный дизель оказался почти на 1 м короче штатного, что потребовало изменения конструкции трансмиссионного вала привода ГМР, приводимого со стороны дополнительного отбора мощности дизеля. Штатный трансмиссионный вал представляет собой упругий карданный вал с расстоянием между шарнирами 1416 мм, в котором в шарнире со стороны ГМР применена упругая муфта типа «Perflex» с РКО и в другом – упругая муфта с наборными резиноканевыми дисками. Для обеспечения поперечной устойчивости трансмиссионного вала в муфте «Perflex» выполнена подцентровка промежуточного вала. При использовании штатной конструкции трансмиссионного вала его длина должна быть увеличена до 2,5 м и возникала проблема обеспечения его поперечной устойчивости. Поэтому соединение привода ГМР была организована с использованием штатного трансмиссионного вала со стороны ГМР, промежуточной опоры и трансмиссионного вала с двумя дисковыми муфтами по типу штатной со стороны дополнительного отбора мощности дизеля 8ЧН 26/26. Дисковые муфты отечественного производства по упругим свойствам близки к штатным. Статическая крутильная жесткость отечественной и штатной дисковых муфт составляет 85...95 кН·м/рад и 80...90 кН·м/рад. В штатном трансмиссионном валу при модернизации применяется муфта с отечественной РКО 400×105.

При исследовании крутильных колебаний валопровода силовой установки модернизированного тепловоза рассматривалась система приводов вспомогательных агрегатов, расположенных со стороны узла дополнительного отбора мощности дизеля.

Спектр собственных частот крутильных колебаний:

–  $N_1=406$  кол/мин, определяется упруго-инерционными параметрами ГМР и соединений его привода;

–  $N_2=1741$  кол/мин, определяется приводами насосов дизеля и крутильной податливостью торсионного вала дизеля;

–  $N_3=3328$  кол/мин,  $N_5=4584$  кол/мин, являются трансмиссионными формами крутильных колебаний валопровода, которые хорошо демпфируются при больших амплитудах крутильных колебаний масс вспомогательных агрегатов и, как правило, слабо проявляются;

–  $N_4=4008$  кол/мин,  $N_7=10785$  кол/мин, «моторные» формы крутильных колебаний валопровода с большими амплитудами крутильных колебаний валопровода дизеля.

Резонансные частоты вращения, связанные с усилением колебаний наиболее сильной гармоники вынуждающего момента дизеля 8ЧН 26/26  $v=2$  по первой и второй формам, расположены за пределами рабочего диапазона частот вращения дизеля. В рабочем диапазоне частот вращения дизеля расположены резонансные колебания «моторной» формы при  $n_d=501$  мин<sup>-1</sup> ( $v=8$ ) и  $n_d=668$  мин<sup>-1</sup> ( $v=6$ ).

Резонансные колебания 2-го порядка вынуждающего момента дизеля расположены значительно ниже минимальной частоты вращения при  $n_d=203$  мин<sup>-1</sup>. Амплитуды эластических моментов в соединениях привода ГМР 1,0...1,05 кН·м и в торсионном валу дизеля 0,4 кН·м, развивающиеся кратковременно при проходе резонанса, являются допустимыми. В рабочей зоне частот вращения дизеля имеет место усиление колебаний 1-го и 0,5-го порядков вынуждающего момента дизеля при  $n_d=400$  мин<sup>-1</sup> по одноузловой форме и 2,5-го порядка (торсионный вал дизеля) при  $n_d=700$  мин<sup>-1</sup> по двухузловой форме. Однако развитие этих колебаний слабое, амплитуды эластических моментов в приводе ГМР составляют 0,3 кН·м и на торсионном валу 0,12...0,14 кН·м. Расчетные максимальные амплитуды динамических напряжений в коленчатом валу дизеля  $\tau_a=22...25$  МПа ( $n_d=700...715$  мин<sup>-1</sup>) являются допустимыми.

Выполненные исследования показали, что силовая установка модернизированного тепловоза ЧМЭЗ с дизелем 8ЧН 26/26 не имеет запретных зон в рабочем диапазоне частот вращения дизеля.

Модернизация приводов вспомогательных агрегатов тепловозов 2ТЭ10М, 2М62, ЧМЭЗ, рассмотренная выше, выполнена в условиях сохранения существующей компоновочной схемы силовой установки и механических при-

водов вспомогательных агрегатов. Перспективным направлением решения проблемы повышения надежности и экономичности вспомогательных приводов является применение индивидуального электрического привода вспомогательных агрегатов с электроснабжением от вспомогательного генератора. Это направление реализовано в проекте модернизации тепловоза ЧМЭЗ, разработанного ВНИКТИ, с электрическим приводом вспомогательных агрегатов. Мотор-компрессорная установка с компрессором ПК-5,25 модернизированного тепловоза выполнена по типу тепловоза ТЭП70. В приводе вентиляторов охлаждения ТЭД мотор-вентиляторных установок применена брусковая муфта по типу брусковых муфт приводов ДМА и вентилятора охлаждения главного генератора модернизированного тепловоза 2ТЭ10МК. В приводе вентилятора холодильной камеры мотор-вентиляторной установки применен укороченный штатный карданный вал. В качестве дополнительного источника энергии применен синхронный генератор ГС534У2 мощностью 120 кВт с приводом от хвостовика вала тягового генератора. В соединении привода синхронного генератора применена упругая муфта с РКО ЭМ 520×150.

В связи с изменением силовой установки модернизированного тепловоза выполнены исследования крутильных колебаний ее валопровода.

Спектр собственных частот валопровода силовой установки с дизелем 8ЧН 2ЧН/26:

–  $N_1 = 580$  кол/мин, определяется упругоинерционными параметрами привода насосов дизеля;

–  $N_2 = 1572$  кол/мин, определяется упругоинерционными параметрами привода насосов дизеля;

–  $N_3 = 4009$  кол/мин,  $N_4 = 10785$  кол/мин, «моторные» формы с большими амплитудами колебаний масс валопровода дизеля.

Резонансные колебания 2-го (главного) порядка вынуждающего момента дизеля по одноузловой и двухузловой формам крутильных колебаний расположены за пределами рабочего диапазона частот вращения дизеля соответственно при  $n_d = 290 \text{ мин}^{-1}$  и  $n_d = 790 \text{ мин}^{-1}$ .

Резонансные колебания 6-го порядка вынуждающего момента дизеля по трехузловой «моторной» форме расположены в рабочем диапазоне числом вращения дизеля ( $n_d = 667 \text{ мин}^{-1}$ ), по этим колебаниям будут эффективно демпфироваться силиконовым демпфером дизеля.

Резонансные колебания главных порядков

вынуждающего момента дизеля по четырехузловой «моторной» форме расположены за пределами рабочего диапазона частот вращения дизеля.

Максимальные динамические нагрузки получены за пределами рабочего диапазона частот вращения дизеля при  $n_d = 290 \dots 300 \text{ мин}^{-1}$  (резонанс 2-го порядка по одноузловой форме колебаний валопровода) и составляют 4,4 кНм в приводе синхронного генератора и 0,2 кНм ( $\tau_a = 19 \text{ МПа}$ ) на торсионном валу дизеля. В зоне минимальной частоты вращения дизеля амплитуды динамических нагрузок составляют 0,9 Нм в приводе синхронного генератора и 0,17 кНм ( $\tau_a = 11,7 \text{ МПа}$ ) на торсионном валу, что является допустимым для длительной работы упругой муфты привода синхронного генератора и торсионного вала.

В рабочем диапазоне частот вращения дизеля динамические нагрузки в приводе синхронного генератора незначительные. В торсионном валу максимальные динамические нагрузки составляют 0,22...0,23 кНм ( $\tau_a = 15 \dots 16,8 \text{ МПа}$ ) при  $n_d = 650 \dots 750 \text{ мин}^{-1}$  и связаны с усилением колебаний «моторной» формы. В коленчатом валу дизеля при эффективной работе силиконового демпфера максимальный уровень динамических нагрузок составляет 23 МПа и связан с усилением колебаний 6-го и 5,5-го порядков вынуждающего дизеля при  $n_d = 650 \dots 750 \text{ мин}^{-1}$ .

При разрегулировке топливной аппаратуры (отключение подачи топлива в цилиндры 4-го отсека) динамическая нагруженность валопровода силовой установки изменяется несущественно.

В приводе синхронного генератора максимальный уровень динамических нагрузок понижается до 4,1 кНм ( $n_d = 290 \text{ мин}^{-1}$ ), в зоне минимальной частоты вращения – несколько повышается до 1,2 кН·м, и в рабочем диапазоне частот вращения отмечается усиление колебаний 1-го порядка с уровнем динамических нагрузок 1,86 кН·м. На торсионном валу дизеля максимальный уровень динамических нагрузок при  $n_d = 300 \text{ мин}^{-1}$  повышается до 0,39 кН·м ( $\tau_a = 27 \text{ МПа}$ ), а в рабочем диапазоне частот вращения дизеля – составляет 0,19 кН·м (13 МПа) при  $n_d = 650 \text{ мин}^{-1}$ . В зоне минимальной частоты вращения дизеля максимальный уровень динамических нагрузок на коленчатом валу дизеля повышается до 2,7 кН·м ( $\tau_a = 18,5 \text{ МПа}$ ), а в рабочем диапазоне частот вращения дизеля – несколько понижается до 20 МПа ( $n_d = 700 \text{ мин}^{-1}$ ).

Уровни динамических нагрузок от крутильных колебаний в валопроводе силовой установ-

ки тепловоза являются допустимым для длительной работы.

При запуске дизель-генератора максимальный кратковременный пусковой момент в приводе синхронного генератора составляет 0,55 кН·м, что является допустимым для муфты с РКО ЭМ 520×150.

Результаты выполненных исследований распространяются на силовую установку модернизированного тепловоза ЧМЭЗ со штатным дизелем К6С31DR. При этом резонансные колебания 3-го (главного) порядка штатного дизеля по одноузловой форме будут развиваться еще ниже от минимальной частоты вращения дизеля при  $n_d = 190 \text{ мин}^{-1}$ .

Выполненные исследования показали, что силовая установка модернизированного тепловоза ЧМЭЗ с дополнительным генератором ГС53442 не имеет запретных зон в рабочем диапазоне частот вращения.

Результаты эксплуатации модернизирован-

ных тепловозов 2ТЭ10МК, 2М62К, ЧМЭЗК показали надежную работу модернизированных приводов вспомогательных агрегатов с упругими муфтами.

Применение упругих муфт указанных конструкций в приводах вспомогательных агрегатов взамен полужестких пластинчатых муфт и карданных валов автомобильного типа привело к снижению уровня динамических нагрузок от крутильных колебаний в 1,5...1,8 раза при обеспечении допустимого уровня динамических нагрузок в коленчатом валу и торсионном валу привода 128-й группы дизеля типа Д49, что позволяет сделать вывод об обоснованности реализованных технических решений по модернизации приводов вспомогательных агрегатов и эффективности применения других муфт предложенных конструкций для решения задачи повышения надежности работы вспомогательных приводов.