

УДК 621.822.6

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В.А. Воронкин, М.Е. Коварский, А.П. Сарычев
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Рассмотрена реализация программы создания электромашинного оборудования с низкими уровнями виброактивности. Приведены результаты внедрения в судовое электромашиностроение малошумных подшипников качения и пластичных смазок.
Ключевые слова: судовые электромашинные, виброактивность, малошумные подшипники, пластичные смазки.

С конца 60-х годов 20 в. электромашиностроение решало задачу существенного снижения виброактивности и повышения ресурсных показателей судового электромашинного оборудования. Подшипниковые узлы (ПУ) во многом определяют качественные характеристики судовых электрических машин (СЭМ), прежде всего их работоспособность (ресурс, срок службы) и виброакустические характеристики (ВАХ). Для совершенствования ПУ потребовалось объединение усилий электропромышленности, производителей подшипников качения, а также разработчиков морских смазок [1]. С этой целью, начиная с 70-х годов 20 в., ВНИИЭМ методически поставил и реализовал целый ряд практических задач по межотраслевым разработкам ПУ СЭМ мощностью до 200 кВт, а также пластичных смазок (ПС) к ним. Работа проводилась совместно с ВНИПП и ВНИИ НП и включала в себя как лабораторные, так и стендовые исследования ПК и ПС, испытания новых ПК и ПС в макетах и реальных образцах СЭМ, опытно-промышленное освоение разработок и контроль их опытной эксплуатации. В ходе работ подшипниковой промышленностью был освоен выпуск малошумных подшипников, получивших индексы от Ш1 до Ш8. Эти подшипники были успешно применены в ЭМ, имевших специальные требования по виброакустике (рис. 1).

Параллельно совершенствовалась система контроля ВАХ ПК. Если вначале нормировался общий уровень вибраций ПК (Ш1), то в дальнейшем контроль общего уровня вибраций был заменен контролем третьоктавных составляющих вибрации в диапазоне частот от 50 до 10000 Гц (ПК Ш2 – Ш5). Во всех случаях измерения вибрации производилось по виброу-

скорению на наружном кольце ПК в радиальном направлении под радиальной нагрузкой на специальных стендах при частоте вращения внутреннего кольца ПК 1500 об/мин.

Дальнейшее повышение качества малошумных ПК (ПК Ш6 – Ш7) вызвало необходимость в изменении методики контроля вибраций шариковых ПК. Новая методика предусматривала проведение измерений при осевой нагрузке, что позволило получать более стабильные результаты измерений и проводить измерение более низких уровней вибраций. Оптимальные величины нагрузки устанавливались для разных типоразмеров ПК эмпирически. Измерения проводились в диапазоне 31,5 – 10000 Гц.

С появлением особых требований по виброакустике к СЭМ возникла необходимость в разработке особомалошумных ПК по существующей системе нормирования соответствовавшим индексам Ш10 – Ш12. Для этих ПК ВНИИЭМ выставил требования по снижению уровней вибрации лишь на частотах 125 – 1000 Гц и 2000 Гц. На остальных частотах

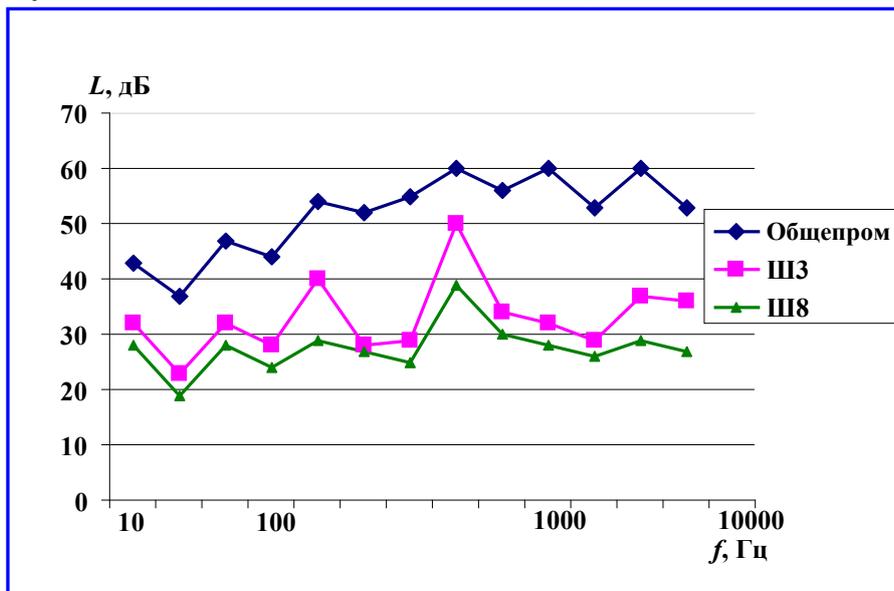


Рис. 1. Среднестатистические данные виброактивности ЭМ в ПК различных классов шумности (усреднение по партиям 15 – 20 ЭМ)

эти ПК должны были соответствовать ПК Ш8. Такие ПК были изготовлены подшипниковой промышленностью и получили индекс ШВ4.

При оценке эффективности применения разработанных малошумных ПК следует учитывать особенности принятой системы нормирования ВАХ ПК [2]. Малая средняя разница (3 дБ) между соседними классами малошумности ПК, а также ограничение лишь верхних уровней вибраций в классе приводит к тому, что фактически ПК, маркированный, например как Ш6, может быть на значительном числе контролируемых частот законно виброактивнее чем ПК, маркированный как Ш2. Отсутствует нормирование осевых составляющих вибраций ПК. В связи с этим в реальных ЭМ на отдельных частотах ПК более высоких индексов «Ш» могут давать более высокие уровни вибраций.

Параллельно с созданием малошумных ПК были проведены разработки ПС повышенной работоспособности для малошумных ПК, а также ПС со свойствами вибродемпфирования [3].

При анализе вибраций подшипникового происхождения основное внимание, как правило, уделялось причинам возникновения вибраций, зависящим от конструкции ПК, точности изготовления и геометрии его деталей (волнистость, шероховатость, огранка и т. д.).

Смазочный материал из рассмотрения обычно исключался. Между тем смазочный материал с точки зрения обеспечения заданных вибрационных характеристик ПК, не говоря уже о работоспособности ПУ, играет значительную роль. Общеизвестно, что разрушение смазки приводит к резкому усилению виброактивности ПУ и падению его работоспособности. Тем не менее в математических описаниях моделей неидеальных ПК такие факторы как реологические характеристики смазки, загрязнения и ряд других не учитываются. Сложность математического учета вышеупомянутых факторов представляется практически не преодолимой, поэтому оценка их влияния, в лучшем случае, проводится на основании экспериментальных работ.

Сравнительно недавно в СЭМ применялась широкая номенклатура высокоресурсных пластичных смазок, например ЦИАТИМ-221, ВНИИ НП-242, а еще ранее ВНИИ НП-207, 1-13, ЭШ-176 и др. В связи с процессом унификации смазочных материалов ВНИИЭМ организовал разработку новой высокоресурсной смазки, которая стала единой для всего судового электромашинного оборудования мощностью до 200 кВт. Новая ПС, получившая название СВЭМ, изготавливается по ТУ 38.101982-86, и при соблюдении условий применения обеспечивает работоспособность в открытых ПК ПУ

СЭМ до 60000 ч, а в ПК (серии 180) до 30000 ч, при сроках хранения в ПУ до 12 лет. Основные сравнительные характеристики ПС СВЭМ даны в табл. 1. В настоящее время это лучшая серийная ПС для малошумных ПК СЭМ.

Параллельно с разработкой смазки СВЭМ ВНИИЭМ совместно с ВНИИ НП завершил основной этап по созданию первой отечественной малошумной смазки. Актуальность создания такой смазки увеличилась в связи с тем, что подшипниковая промышленность достигла своего технологического предела в области совершенствования конструкции малошумных ПК и точности изготовления их элементов. Создание ПС со свойствами вибродемпфирования было естественным резервом снижения виброактивности ПК с высокими индексами «Ш». Методика исследования ВАХ ПС была создана ВНИИЭМ при участии ВНИИ НП и ВНИИП. Она включила в себя в качестве составных частей отдельные положения стандартизованных методик М37.006-70-83 и М37.006-149-85, действующих в подшипниковой промышленности.

В основу разработки композиции малошумной ПС был положен ряд синтетических углеводородных и сложноэфирных масел, мыльных загустителей, антифрикционных, антиокислительных и антикоррозионных присадок различных классов. Предварительно было исследовано более десяти марок товарных ПС отечественного и зарубежного производства. Среди них ЛКС-2 ТУ 38.1011015-86 как особо чистая смазка, смазка СВЭМ, специальные смазки ACL-619 и 620 фирмы АВ AXEL CHRISTIERNSSON (Швеция) и др. Сравнительная оценка влияния ПС на уровни вибраций «свободных» ПК проводилась в отечественных и иностранных ПК различного класса шумности как открытого, так и закрытого типа на стенде ВНИИП-551.

Известно, что толщина и несущая способность смазочной пленки во многом определяется вязкостью базового масла. Сегодня нет единого мнения о том, каким должно быть оптимальное значение вязкости, обеспечивающее демпфирующий эффект ПС. Нет исчерпывающих данных о влиянии на виброактивность ПК химического состава масел. При изучении влияния базовых масел на характеристики ПС приоритет отдавался обеспечению наибольшего демпфирующего эффекта. Причем анализировались дисперсионные среды лишь современных ПС, работающих в условиях эксплуатации ПУ СЭМ средней мощности. Исследования показали, что лучшими дисперсионными средами для малошумной смазки является смесь одного из исследованных углеводородных масел и дедецилового эфира, а также эфир норборнена и полиальфаолефиновое масло.

Таблица 1

Типовые физико-химические показатели	ВНИИ НП-242	СВЭМ	ЦИАТИМ-221
Основа смазки	Литий	Литий	Кальций
Пенетрация	225	270	280 – 360
Вязкость при минус 20° С, Па·с	≤1800	210	120 – 250 – 15° С
Рекомендуемые рабочие температуры min/max, °С	Минус 30/80	Минус 50/120	Минус 60/150
Испаряемость при 150° С за 1 ч, %	3 – 4	1 – 1,5	≤2
Предел прочности при 80° С, Па	≥100	240 – 350	60 – 150
Срок хранения изделия, лет	7	12	5
Скоростной фактор в радиальных шариковых ПК, мм (об/мин)	$2,7 \times 10^{-5}$	$5,5 \times 10^{-5}$	3×10^{-5}

Таблица 2

Параметры оценки	Параметры режима	Образец «А»	Образец «В»	Образец «С»	СВЭМ
Средняя работоспособность, ч	$F_p = 1500$ Н Температура установившаяся (без дополнительного нагрева)	2093	3250	4775	2411
Коэффициент рассеяния		2,5	1,4	1,1	1,8
Средняя работоспособность, ч	$F_p = 500$ Н $T = 120^\circ$ С	778	530	598	389
Коэффициент рассеяния		3,3	2,8	1,7	3,1

Таблица 3

Нагрузка	Приращение вибрации по общему уровню, дБ	
	СВЭМ	Образец «В»
Радиальная	25	16
Комбинированная	30	12

Аналогичным образом исследовалось влияние загустителя на ВАХ ПС. Определено, что наибольшим демпфирующим эффектом обладают композиции, дисперсионные среды которых загущались литиевыми мылами синтетических жирных кислот.

В связи с тем, что разрабатываемая смазка по своим характеристикам должна обладать высокой работоспособностью (не хуже смазки СВЭМ), то для ресурсных испытаний была подготовлена опытная серия образцов ПС (свыше 20) повышенной долговечности. По результатам исследования их реологических и виброакустических характеристик для стендовых ресурсных испытаний были отобраны три образца. Стендовые испытания проводились по типовой методике определения работоспособности ПК закрытого типа. В испытаниях определялось время работы ПС в ПК до потери ею смазочной способности, являющейся основным оценочным показателем. Дополнительно оценивалось состояние ПС и ПК после испытаний. Некоторые данные о

работоспособности испытуемых образцов в ПК180204, полученные при $n = 8000$ об/мин, представлены в табл. 2. Для сравнения в этой же таблице даны аналогичные данные по контрольному образцу смазки СВЭМ. Испытания проводились при различных значениях нагрузки F и температуры T . Значения работоспособности усреднялось по данным 3 – 5 ресурсных стендов.

Оценка стабильности ВАХ ПК проводилась на лучшем из отобранных образцов – образце «В» в сравнении с контрольным образцом смазки СВЭМ. Испытания проводились в ужесточенных условиях в ПК 75-180605ЕГУШ5 при 8000 об/мин и радиальной (200 Н) или комбинированной ($F_p = 200$ Н, $F_o = 1000$ Н) нагрузках. Характер изменения уровней вибрации во времени ПК с образцом ПС «В» был близок к характеру изменения вибрации ПК с ПС СВЭМ. Однако после 1000 ч наработки ПК с ПС «В» имел преимущество. Приращение вибрации по общему уровню для ПК с ПС СВЭМ и ПК с ПС «В» приведено в табл. 3.

Таблица 4

ПС	Размеры частиц, мкм						Общее количество частиц
	До 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	60 – 80	80 – 100	
ВНИИ НП-555	667	858	286	48	–	–	1859
СВЭМ	5863	500	143	72	72	–	6650
СВЭМ фильтрованный	4433	430	–	–	–	–	4863

В итоге на основе образца «В» была создана, малозумная смазка, получившая название ВНИИ НП-555 ТУ 38.401797-90. Результаты исследований ВАХ смазки ВНИИ НП-555 в сравнении со смазками СВЭМ, ЛКС-2, Эра фильтрованная, Daphne (Япония) даны в [3].

Испытания показали, что практически по всему контролируемому спектру смазка ВНИИ НП-555 имеет преимущество по ВАХ не только со сравнимыми ПС, но и с маслом И-20А. Табл. 4 дает представление о количестве и размере инородных частиц в исследованных образцах ПС.

Дополнительно по методике, принятой во ВНИИП, была проведена оценка защитных свойств смазки ВНИИ НП-555 и исследование ее совместности с мембранным полотном гр.1 ТУ 38.0056109-98, используемым в уплотнениях малозумных ПК, а также с материалами уплотнений. Результаты испытаний показали, что смазка ВНИИ НП-555 может быть применена в ПК закрытого типа с уплотнительными материалами из исследо-

ванных материалов.

На рис. 2 приведены результаты сравнительных испытаний смазки ВНИИ НП-555 и штатных смазок приводных электродвигателей мощностью до 200 кВт в ПК 2-306ЕШ9. Из рис. 3 видно, что ЭМ с ПС ВНИИ НП-555 имеет существенно лучшие ВАХ, чем ПС ВНИИ НП-242 и ЦИАТИМ-221. В настоящее время ПС СВЭМ выпускается ограниченно.

Огромный объем работ и значительная техническая эффективность, полученная от проведенных разработок, не означают, что удалось решить все проблемы, стоящие на пути совершенствования ресурсных и виброакустических показателей ПК и ПС [4].

Прежде всего требует решения проблема увеличения временной стабильности ВАХ малозумных ПК [5]. Проблема сохранения во времени стабильности ВАХ малозумных ПК состоит по существу из двух частей.

Первая – обеспечение сохранности размеров деталей ПК в эксплуатации, т. е. вопрос «размерной стабильности» ПК, который напрямую связан со стабильностью ВАХ ПК. В настоящее время он не стоит остро, так как подшипниковая промышленность освоила выпуск малозумных ПК с индексом «Т», отличающихся повышенной размерной стабильностью.

Вторая часть проблемы связана, в основном, с искусственным замедлением износных процессов в ПУ. Традиционные подходы к ней заключаются в поиске методов упрочнения деталей ПК, контактирующих в рабочей зоне, например, карбонитрирование. Однако оптимальная технология на сегодняшний день не разработана.

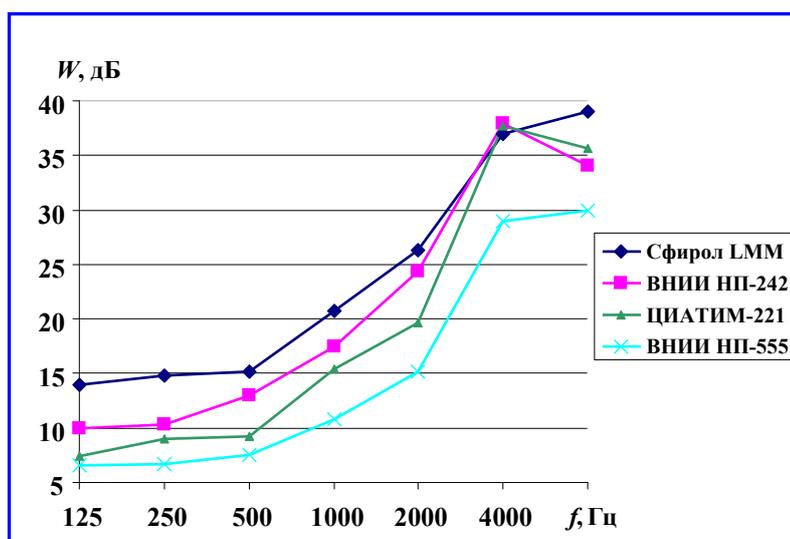


Рис. 2. Виброактивность ПК 2-306ЕШ9 и различными высокоресурсными ПС

Таблица 5

Тип ПК	Условный номер ПК	Частотные полосы, Гц								
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
302ЕШ6	2	Ш6	Ш3	Ш2	–	–	–	–	–	–
	4	Ш6	Ш5	Ш6	Ш2	Ш2	Ш5	–	Ш2	Ш2
305ЕШ3	1	Ш3	Ш3	–	–	–	–	–	–	–
	3	Ш3	Ш3	Ш2	Ш2	Ш2	Ш2	Ш2	–	–
308ЕШ3	5	Ш3	Ш3	Ш3	Ш3	–	–	–	–	–
	6	Ш3	Ш2	Ш3	Ш2	–	–	–	–	–
	7	Ш3	Ш2	Ш2	Ш2	Ш2	–	–	–	–
	8	Ш3	Ш2	Ш2	Ш2	–	–	–	–	–
310ЕШ5	9	Ш5	Ш5	Ш5	Ш3	Ш3	Ш2	–	–	–
	10	Ш5	Ш5	Ш5	Ш3	Ш3	Ш2	–	–	–

Примечание. Прочерк означает, что в этой полосе частот подшипник вышел из класса малошумных.

Для малошумных ПК прирост уровня вибраций есть многомерная функция, зависящая от типоразмера и класса ПК, применяемого смазочного материала, частотного диапазона измерений. Для ПК с индексами малошумности Ш3 – Ш5 характерен интенсивный рост виброактивности (на 5 – 20 дБ) в течение 15 – 25% времени наработки расчетного ресурса.

В дальнейшем рост уровня вибрации резко замедляется. У ПК более высоких классов малошумности рост уровней вибрации происходит медленнее и равномернее по мере наработки ресурса. Однако абсолютные значения прироста уровней вибрации колеблются в тех же пределах.

Как видно из табл. 5 фактически все испытываемые ПК за время наработки вышли из класса малошумных. Очевидно, что достижение предельно низких сдаточных уровней вибрации ПК при обеспечении возможностей их сохранения во времени имеет лишь ограниченную ценность. Требуются серьезные совместные усилия производителей подшипников качения и смазок, электромашиностроителей и межведомственных служб эксплуатации, чтобы успешно решить комплексную научно-технологическую проблему повышения временной стабильности ВАХ малошумных подшипников.

Кроме этого, необходимо формализовать достигнутые ресурсные показатели ПК, сроки их хранения, а также уточнить процедуру оформления

гарантии на ПК. Необходимо привести технические условия на подшипники для СЭМ в соответствии с требованиями, предъявляемыми к электрооборудованию. В настоящее время сохраняется противоестественная ситуация, когда электротехническая промышленность дает гарантии на производимые ею СЭМ в целом, в то время как последние содержат элементы (в частности ПК и ПС), не имеющие реальных гарантий. Имеет место положение, когда назначенные сроки службы ПК со смазкой в изделии существенно превышают сроки допустимого хранения этих же ПК с той же смазкой в ЗИПе или в состоянии поставки на складе. Потребитель каждый раз должен подтверждать основные показатели работоспособности применяемых им ПК трудоемкими и дорогостоящими испытаниями изделий, так как подшипниковая промышленность отказывается выставлять гарантии на свою продукцию, т. е. гарантировать ее ресурсы и сроки службы в соответствии с ведомостями согласования. Устранение этих несоответствий поможет электромашиностроителям эффективнее использовать огромный технический потенциал, полученный в результате выполнения описанной выше работы.

Литература

1. Научные проблемы создания малошумного и мало-виброактивного электрооборудования / В.А. Воронкин, В.Я. Геча, А.И. Каплин // Электротехника. – М., 1991. – № 9.

2. Малошумные подшипники качения и пластичные смазки для электромашин с требованиями по виброакустике / В.А. Воронкин, В.В. Евланов // Электротехника. – М., 1992. – № 8 – 9. – С. 17 – 20.
3. Пластичные смазки для подшипников малошумных судовых электромашин средней мощности / В.А. Воронкин, В.В. Евланов, Л.В. Демина [и др.] // Судостроение. – СПб., 1994. – № 4.
4. Проектирование малошумных высокоресурсных подшипниковых узлов электромашин средней мощности / В.А. Воронкин, В.В. Евланов, Л.А. Ямпольский // Электротехника. – М., 1992. – № 10 – 11. – С. 26 – 32.
5. О стабильности виброакустических характеристик электромашинного оборудования / В.А. Воронкин, У.А. Рожкова // Вестник машиностроения. – М., 1994. – № 2. – С. 3 – 6.

Поступила в редакцию 09.12.2009

Вячеслав Анатольевич Воронкин, канд. техн. наук, начальник лаборатории, т. 366-33-65.

Михаил Ефимович Коварский, канд. техн. наук, главный конструктор, т. 366-57-28.

Алексей Петрович Сарычев, канд. техн. наук, зам. генерального директора-генерального конструктора, т. 365-56-29.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.