

ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК ДЛЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН

В.А. Воронкин
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Изложены основы практики применения высокоресурсных пластических смазок в судовом электрооборудовании. Приведены примеры расчета практического срока службы смазок.

Ключевые слова: пластичные смазки, судовое электромашиностроение, долговечность, ресурс.

Основным смазочным материалом подшипниковых узлов (ПУ) судовых электромашин (СЭМ) является пластичная смазка (ПС). Главное функциональное назначение любого смазочного материала в опорах качения состоит в обеспечении разделения движущихся относительно друг друга поверхностей с малым сопротивлением и без каких-либо повреждений, что в итоге и определяет ресурс и срок службы СЭМ. Дело в том, что для СЭМ характерны отказы не вследствие усталости рабочих поверхностей опорных узлов, а вследствие износных процессов, за которые отвечает, прежде всего, ПС [1]. Работоспособность ПС в подшипниках качения (ПК) зависит не только от их физико-химических свойств, но и от режимов и условий эксплуатации ПУ, поэтому количественная оценка работоспособности ПС для конкретных условий применения является весьма сложной задачей и, как правило, решается практически по результатам натурных испытаний. ПС при работе стареет, т. е. ее первоначальные свойства изменяются в результате физических и химических процессов по ходу её эксплуатации. При эксплуатации ПС из ПУ испаряется, растекается, окисляется, полимеризуется, в ней происходят процессы механической и термической деструкции, конденсации и распада, образуются смолистые вещества, она загрязняется продуктами химического распада, продуктами износа материалов ПК и т. д.

В настоящее время нет однозначно принятого представления о критериях, определяющих утрату работоспособности ПС в ПК. В зависимости от условий применения для различных ПС можно назвать лишь некоторые ориентиры [2]. Однако и они не всегда однозначно связаны с функциональным отказом ПС, могут варьироваться, и каждый раз требуют уточнений для конкретных групп СЭМ. К примеру, не все стандартные показатели качества ПС (вязкость, предел прочности, коррозионное воздействие, содержание свободных кислот и щелочей, присутствие воды, содержание механических при-

месей, коллоидная стабильность, испаряемость) можно использовать для оценки эксплуатационных характеристик ПУ. Это также затрудняет прогнозирование работоспособности ПС. Вместе с тем функциональные отказы ПУ по причине плохого обеспечения ПК смазкой чрезвычайно распространены. При их анализе следует знать и учитывать особенности взаимодействия ПС и ПК, рассматривая ПС как полноправный самостоятельный элемент ПУ.

При работе внутри ПК возникает автономная циркуляционная смазочная система, включающая три характерные зоны: зону резерва, зону трения (рабочую зону) и зону подпитки (обмена), которая осуществляет взаимосвязь первых двух зон. При благоприятных условиях в этом процессе участвует и часть ПС, находящаяся в подшипниковых крышках. Сама возможность существования такой системы определяется спецификой конструкции подшипника и способностью ПС к переходу в различные реологические состояния. Количество ПС и условия ее работы в каждой зоне существенно различны. Зону резерва образует часть смазки, которая сначала находится во внутренней полости подшипника вне рабочей зоны. Благодаря объемной прочности, она располагается сравнительно большими количествами на неподвижном кольце подшипника, на беговых дорожках вблизи рабочей зоны и на различных участках сепаратора. При установленном режиме она находится в равновесном состоянии и относительно покое. К рабочей зоне относится та часть беговой дорожки колец подшипника, которая соответствует участку контактирования. Попадая периодически в зону контакта между телами качения и кольцами подшипника, ПС испытывает воздействие больших контактных нагрузок, высоких скоростей сдвига и контактных температур. Количество смазки в рабочей зоне крайне мало. В рабочей зоне происходит интенсивное срабатывание ПС под воздействием контактных динамических факторов.

Для длительной работы ПК необходимо обеспечить максимальное количество смазки в зоне резерва и стабильный режим подпитки. Важное значение имеет скорость расхода смазочного материала в рабочей зоне – свойство, которое определяется как стабильность в зоне трения качения.

Механизм распределения ПС в ПУ состоит в следующем: к концу приработки заканчивается перераспределение ПС внутри полости подшипника и наступает состояние динамического равновесия, циркуляция при этом не прекращается, но происходит со значительно меньшей скоростью. Внутри полости подшипника большая часть смазки (50 – 80%) располагается на сепараторе (внутри и снаружи). Вместе со смазкой на наружном неподвижном кольце подшипника (до 20 – 30%) она и образует зону резерва, откуда происходит подпитка рабочей зоны. Количество смазки, удерживаемой на сепараторе, является линейной функцией ее предела прочности. Отметим, что неправильное примененные высокопрочные смазки нередко оказываются неработоспособными именно потому, что не обеспечивают режим подпитки.

Основой техники применения ПС для долговечных опорных узлов с ПК является достижение положения равновесия при циркуляции ПС в ПУ. В самом общем случае на первом этапе следует обеспечить закладку возможно большего количества смазки в ПК и на 2/3 заполнить подшипниковые крышки. При вращении ПК некоторое количество смазки быстро переместится в незаполненное пространство, создавая значительный момент сопротивлению вращения. При дальнейшей работе ПК его температура достигает максимальной величины и затем падает, постепенно устанавливаясь на постоянном уровне, несколько выше окружающей температуры, и оставаясь на нем вплоть до разрушения ПК. В период после того, как смазка в основном заполнила подшипниковые крышки, и до того момента, когда температура ПК начинает снижаться с максимально достигнутого уровня, смазка продолжает циркулировать. Она выдавливается через отверстия сепаратора, выходит наружу, образуя кольцо между внешним кольцом сепаратора и отверстием наружного кольца ПК. Затем ПС снова попадает на дорожку качения наружного кольца, где она истирается шариками. При развитии этого процесса некоторое количество смазки выдавливается в смазочные подушки между шариками и отверстиями сепаратора. Потребуется несколько часов пока этот процесс завершится и будет достигнуто равновесие смазки. Именно тогда

температура ПУ достигнет минимального (рабочего) уровня.

В формулах расчета модифицированной долговечности ПК СЭМ L_{na} влияние ПС оценивается коэффициентом a_{23} [1]

$$L_{na} = a_{23}L,$$

где L – номинальная долговечность.

Сравнение действующих методик расчета ресурса подшипников инопфирм и ГПЗ показывает, что их аналогичные коэффициенты в расчетных формулах (например a_{SKF}) отличаются при прочих равных условиях до 10 раз, что позволяет применять подшипники инопфирм в габаритах примерно в полтора раза меньше отечественных или, при одинаковых габаритах, ресурс подшипников инопфирм до 10 раз выше. Используемые в настоящее время в отечественной подшипниковой промышленности методы расчетной оценки ресурса ПК основаны на теории Лундберга-Пальмгрена. Харрисом и Иоаннидесом предложена новая модель разрушения подшипника, существенно дополняющая теорию Лундберга и Пальмгрена. В соответствии с данной методикой ресурс подшипников может быть существенно увеличен путем создания благоприятных условий смазывания и ее достаточной чистоты. На основе современного отечественного анализа ВНИПП предполагает ввести в расчёты поправочный коэффициент a_{RUS} (принятое обозначение предусматривает внедрение единой методики расчета и единых методов и средств испытаний для всех ГПЗ):

$$L = a_{RUS} \left(\frac{C}{P} \right)^p,$$

где C – номинальная динамическая грузоподъемность, Н; P – эквивалентная динамическая нагрузка на ПК, Н.

Новая методика основана на данных инопфирм и будет предназначена для подшипников, изготовленных из вакуумированных сталей. Для оценки долговечности подшипников из обычных (отечественных) сталей, полученных при открытой выплавке, в качестве первого приближения чистоту металла предполагается учитывать по доле кислорода. Влияние загрязнения смазки учитывается через размер частиц, диаметр подшипника и параметр смазки.

На основании опыта НПП ВНИИЭМ [3] ниже представлены общие принципы выбора и применения ПС для СЭМ мощностью до 100 кВт с радиальными однорядными шариковыми подшипниками.

С учётом действующей номенклатуры смазок для СЭМ с требованиями по ВШХ в качестве основной рекомендуется высоко-ресурсная ПС СВЭМ по ТУ 38.101.982-86. Рабочий диапазон температур смазки от -40°C до $+110^{\circ}\text{C}$. В качестве дублирующих смазок могут быть рекомендованы смазки ВНИИ НП-242 и смазка ЦИАТИМ-221 (для ПУ с температурой $> 100^{\circ}\text{C}$). Перспективным является применение малозумной смазки ВНИИ НП-555 ТУ 38.401797-90В, испытания которой показали, что практически по всему контролируемому спектру она имеет преимущество по ВАХ над ПС стандартного ряда [4]. В случае, если по рабочим условиям требуется смазка с особыми свойствами, ее выбирают из ограничительных перечней ГОСТ РВ 50920-96, ГОСТ 26191-84.

Практический срок службы смазок t_f типа СВЭМ, применяемых в ПУ СЭМ, с частотой вращения до 3000 об/мин – 19 лет. Срок хранения смазок типа СВЭМ в таре поставщика 5 лет. Срок хранения смазок типа СВЭМ в ПК – 12 лет.

Срок службы других литевых ПС (по DIN51825) можно оценить по графику рис. 1, где d_m – средний диаметр подшипника. Коэффициент k_f для радиальных шариковых подшипников равен 0,9 – 1,1. Большие по значению величины применяются для более тяжелых рядов ПК.

Для синтетических смазок с температурным диапазоном от -40 до $+130^{\circ}\text{C}$ и однорядных шариковых ПК при $0,25 \leq n/n_{\text{пр}} \leq 1$ и $70^{\circ}\text{C} \leq t \leq 130^{\circ}\text{C}$ среднюю долговечность можно оценить с помощью формулы

$$\log t = 6,12 - 1,4n/n_{\text{пр}} (0,018 - 0,006n/n_{\text{пр}})T,$$

где t – средняя долговечность ПС, ч; n – частота вращения ротора, об/мин; $n_{\text{пр}}$ – предельная частота вращения ПК с ПС, об/мин; T – рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$.

Рекомендуемая периодичность пополнения ПУ СЭМ в зависимости от внутреннего диаметра подшипника $d_{\text{вн}}$ с частотами вращения до 3000 об/мин и

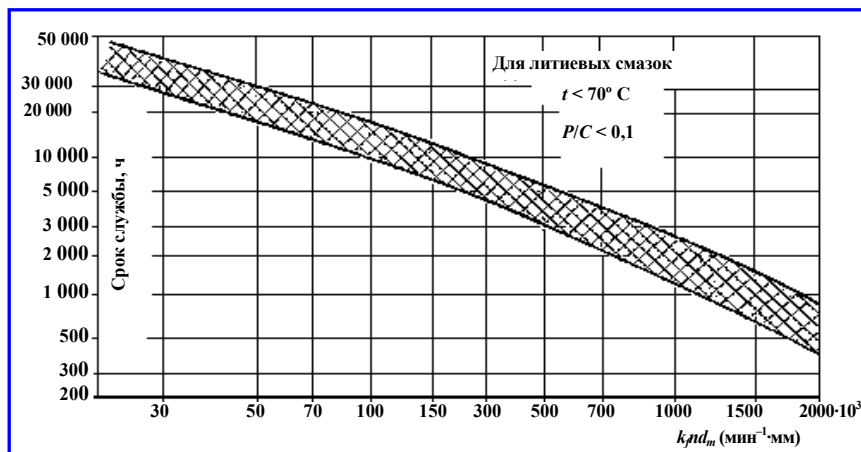


Рис. 1. Срок службы литевых ПС

температурой ПУ до 90°C : $d_{\text{вн}} \leq 100$ мм – 12000 ч; $d_{\text{вн}} > 100$ мм – 10000 ч.

При температурах ПУ более 90°C сроки пополнения ПУ сокращаются в ~ 2 раза на каждые 15°C перегрева. Рекомендуемая периодичность пополнения СЭМ с частотами вращения свыше 3000 об/мин устанавливается: с горизонтальной осью вращения – 8000 ч; с вертикальной осью вращения – 6000 ч.

Периодичность пополнения ПС может быть уменьшена, против указанной выше, в зависимости от принятых при разработке условий.

Следует учитывать, что системы пополнения ПС не обеспечивают полной замены ПС в ПУ, тем самым не снимают проблем совместимости различных ПС в эксплуатации [5]. Совместимыми являются:

- ПС с одинаковым загустителем;
- литевые ПС и кальциевые ПС;
- бентонитовые ПС и кальциевые ПС.

Несовместимыми являются:

- натриевые ПС и литевые, кальциевые, алюминиевые, бентонитовые ПС;
- алюминиевые ПС и бентонитовые ПС.

Эти данные должны учитываться при разработке химмотологических карт (ГОСТ 25549-82).

Учитывая сильное влияние температуры ПК на срок службы смазки, при конструировании СЭМ должны приниматься меры к тому, чтобы установившаяся температура ПК (температура наружного кольца) при номинальном режиме СЭМ не превышала 70°C (требования 3, 4 по ВШХ), а перепад температур между кольцами ПК не должен превышать $\pm 10^{\circ}\text{C}$. Должны также приниматься меры для ограничения перегрева ПК сверхуставившегося значения и времени его действия, например, при пополнении смазки. Максимальная кратковременная температура ПК не должна превышать 120°C .

Таблица 1

d, мм	n, об/мин	Назначенный ресурс, ч	
		Температура, °C	
		≥ 90	≥ 70
30 < d ≤ 40	3000	15000	20000
	1500	20000	25000
40 < d ≤ 60	3000	10000	15000
	1500	15000	20000

Таблица 2

Наличие пыли и влаги на функциональных поверхностях подшипника качения f_1	0,7 – 0,9
Наличие ударных и вибрационных нагрузок f_2	0,7 – 0,9
Повышение температуры f_3 : – умеренное (до 75°C); – сильное (75 – 85°C); – очень сильное (85 – 120°C)	0,7 – 0,9 0,4 – 0,7 0,1 – 0,4
Наличие высоких нагрузок f_4 P/C = 0,1 – 0,15; PC = 0,15 – 0,25; P/C = 0,25 – 0,35	0,7 – 1,0 0,4 – 0,7 0,1 – 0,4
Наличие воздуха, проходящего через подшипник качения f_5 : – небольшой поток; – сильный поток	0,5 – 0,7 0,1 – 0,5
Электрические машины с вертикальным валом f_6	0,5 – 0,9

Для закрытых ПК (серии 180000 и ей аналогичных) назначенный ресурс ПК определяется сроком службы (ресурсом) собственно смазки. Для ПК со смазкой СВЭМ в этих случаях назначенный ресурс рекомендуется в табл. 1. Расчетная долговечность ПК должна быть в 1,1 – 1,2

раза больше указанного в табл. 1 назначенного ресурса. Сроки хранения ПК, заправленных смазками в состоянии поставки, в СЭМ и в ЗИП определяются ТУ 4477-Э 82.

Срок службы ПС, находящейся под воздействием радиоактивного излучения, рассчитывается

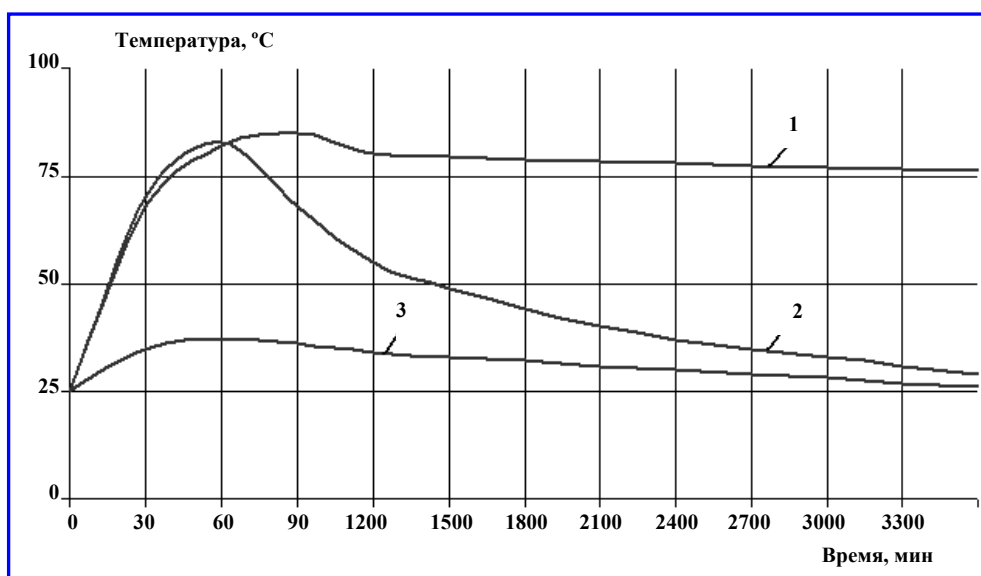


Рис. 2. Характер изменения температуры ПК при обкатке:
1 – избыток смазки; 2 – недостаток смазки; 3 – норма смазки

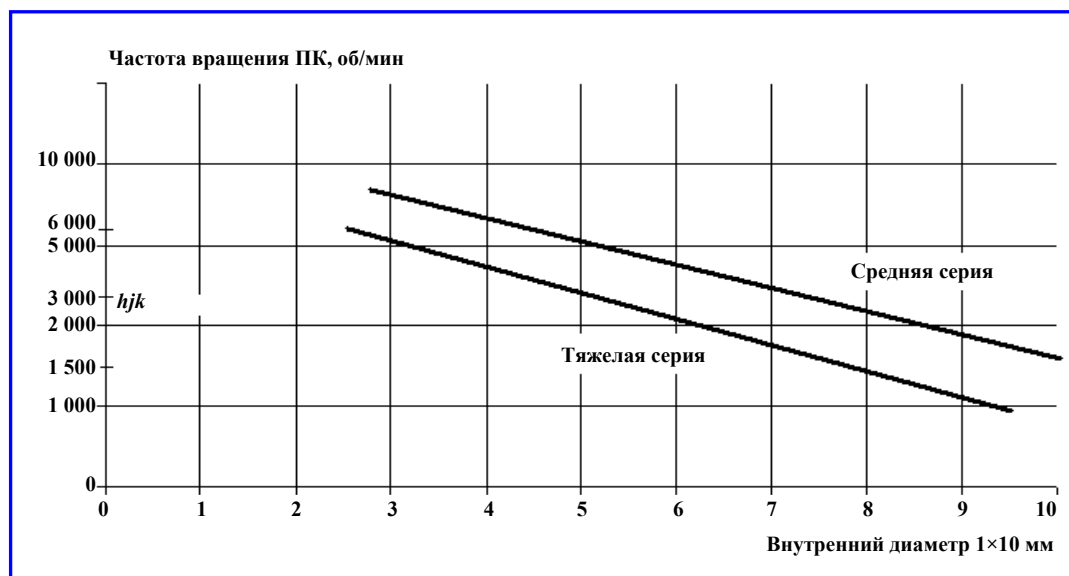


Рис. 3. Предельные частоты вращения ПК на литевых смазках

из уравнения

$$t = S/R,$$

где t – срок службы, ч; S – допустимая для ПС доза облучения, Дж/кг; R – интенсивность облучения, Дж/кг·ч.

Стандартные ПС допускают дозы облучения до $2 \cdot 10^4$ Дж/кг; особо радиационностойкие ПС – до $1 \cdot 10^7$ Дж/кг (γ – излучение).

Корректировку срока службы ПС (t_k) при условиях эксплуатации, отличающихся от нормальных, можно провести в соответствии с выражением

$$t_k = f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 f_6 t_f.$$

Корректирующие коэффициенты f приведены в табл. 2.

Для ориентировочного расчета объема закладки ПС в свободный объем ПУ в зависимости от частоты вращения ротора СЭМ можно использовать следующие соотношения: $n/n_{пр} < 0,2$ – свободный объем ПУ полностью заполняется ПС; $0,2 < n/n_{пр} < 0,8$ – свободный объем ПУ заполняется ПС соответственно от 50 до 20%; $n/n_{пр} > 0,8$ – ПС в свободный объем ПУ не заполняется; n – частота вращения; $n_{пр}$ – предельная частота вращения ПК.

В каждом из этих случаев ПК полностью заполняется ПС. Правильность заполнения ПС в ПУ можно проверить по характеру изменения температуры ПК в течение первых 5 – 6 часов работы (рис. 2).

Рис. 2 следует рассматривать как ориентировочный (для средних условий работы СЭМ и ПК средней серии).

В случае необходимости заполнения в ПК ограниченного количества ПС требуемое весовое количество ПС рассчитывается по формуле

$$G = DB/200,$$

где G – весовое количество ПС, г; D – наружный диаметр, мм; B – ширина ПК, мм.

Для вертикальных СЭМ верхняя подшипниковая камера должна заполняться наполовину, а нижняя на 3/4. Необходимо обеспечить условия, препятствующие сползанию ПС из верхней камеры в ПК.

Максимально допустимые частоты вращения ПК с ПС, при которых обеспечиваются нормальные условия смазывания, даются в каталогах подшипников. В некоторых случаях ориентировочно их можно оценить по рис. 3 (для ПС на литевой основе).

При сопряжении двух и более ПК при горизонтальной оси вращения или когда ПК устанавливается на вертикальном валу, максимально допустимая частота вращения ПК с ПС снижается на 25%. При вращающемся наружном кольце ПК максимально допустимую частоту вращения следует снижать на 50%.

При контактных нагрузках, превышающих средние допустимые значения для ПС, частота вращения ПК не должна превышать 75% от максимально допустимой.

Таблица 3

Сепаратор	Скоростной фактор ($d_{cp}n$)10 ⁵ , мм (об/мин)	
	Практическая величина	Предельная величина
Стальной штампованный	4,5	6,0
Текстолитовый с защитной шайбой или уплотнением	4,0	4,5

Ориентировочные величины скоростного фактора для однорядного шарикового радиального ПК, смазываемого ПС при учете влияния конструкции сепаратора, могут быть взяты из табл. 3.

Приведенные данные позволяют оценить возможность использования штатных пластичных смазок при разработке судового электрооборудования.

Литература

1. О механизме отказа подшипниковых узлов электромашин вследствие износа / В.А. Воронкин, В.В. Евланов, А.Г. Горбунов // Трение и износ. – Гомель, 1994. – № 2. – С. 254–263.
2. Вопросы прогнозирования эксплуатационного состояния подшипниковых узлов судовых электромашин с

дефектом типа износа / В.А. Воронкин, В.В. Евланов // Электротехника. – М., 1994. – №4. – С. 22 – 27.

3. Малошумные подшипники качения и пластичные смазки для электромашин с требованиями по виброакустике / В.А. Воронкин, В.В. Евланов // Электротехника. – 1992. – № 8 – 9. – С. 17 – 21.

4. Малошумные пластичные смазки для электрических машин / В.А. Воронкин, В.В. Евланов, Л.В. Легезо // Машиностроитель. – М., 1992. – №1.

5. О совместимости некоторых пластичных смазок для электромашин / В.А. Воронкин, Л.В. Легезо, Н.Н. Гришин [и др.] // Качество и надёжность электрических машин и электрооборудования. Труды ВНИИЭМ. – М.: ВНИИЭМ, 1986. – Т. 81. – С. 77 – 80.

Поступила в редакцию 23.12.2009

Вячеслав Анатольевич Воронкин, канд. техн. наук, начальник лаборатории,
т. 366-33-65, e-mail: vniiem@vniiem.ru.