*Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г В. Плеханова, т. LIII, вып. 1, 1966 г.*

УДК 622.233

# ПУТИ СНИЖЕНИЯ АВАРИЙНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН

*А. Е. Максимов*

Анализ материалов по аварийности [Каймаков, 1963; Штединг, 1964] показывает, что причиной выхода из строя электродвигателей горных машин является в основном повреждение изоляции обмоток статора (80%), значительно реже — роторных клеток (11%), еще реже механические повреждения (9%). Это позволяет наметить основные пути сокращения аварийности электродвигателей горных машин. Повышение их эксплуатационной надежности и увеличения срока службы может быть достигнуто за счет: 1) улучшения теплового режима электродвигателей путем интенсификации их охлаждения; 2) повышения тепло- и влагостойкости изоляции; 3) усовершенствования защиты; 4) создания систем привода «постоянной мощности».

**Влияние способа охлаждения на номинальную мощность электрических машин.** Пользуясь одноступенчатой теорией нагрева, т. е. полагая, что электрическая машина представляет собой однородное тело с одинаковой температурой и теплоемкостью во всех точках и что отдача тепла в окружающую среду пропорциональна разности температур между машиной и окружающей средой, условие теплового равновесия можно выразить зависимостью

$$Q\,dt = C\,d\tau + A\tau\,dt, \tag{1}$$

где $Q$ — количество тепла, сообщаемое машине в единицу времени, *кал/сек*; $C$ — теплоемкость машины, *кал/град*; $A$ — теплоотдача машины, *кал/сек·град*; $\tau$ — превышение температуры машины над температурой окружающей среды.

Решение уравнения теплового равновесия дает кривую перегрева машины

$$\tau = \frac{Q}{A}\left(1 - e^{-\frac{t}{\Theta}}\right) + \tau_{\text{нач.}}\, e^{-\frac{t}{\Theta}} \tag{2}$$

где $\Theta$ — постоянная времени нагрева машины, выражаемая отношением теплоемкости машины к ее теплоотдаче,

$$\Theta = \frac{C}{A}; \tag{3}$$

$\tau_{\text{нач.}}$ — превышение температуры машины над температурой окружающей среды в начальный момент времени.

Установившаяся температура перегрева машины при $t \to \infty$

$$\tau_у = \frac{Q}{A}. \tag{4}$$

Анализ выражений (3) и (4) показывает, что, во-первых, постоянная времени зависит от величины теплоотдачи, т. е. способа охлаждения машины — при интенсификации охлаждения она уменьшается, во-вторых, установившаяся температура машины определяется количеством тепла, которое выделяется в ней вследствие наличия потерь, и ее теплоотдачей и не зависит от теплоемкости машины.

При номинальной нагрузке

$$\tau_{у.н} = \frac{Q_н}{A}. \tag{5}$$

Подставляя в уравнение (5) потери при номинальном режиме, выраженные через номинальную мощность и к. п. д., и решая все относительно номинальной мощности, получим

$$P_н = \frac{\eta_н}{1-\eta_н} A\tau_{у.н}. \tag{6}$$

При $\eta_н = \text{const}$ и $\tau_{у.н} = \text{const}$

$$P_н = k_1 A, \tag{7}$$

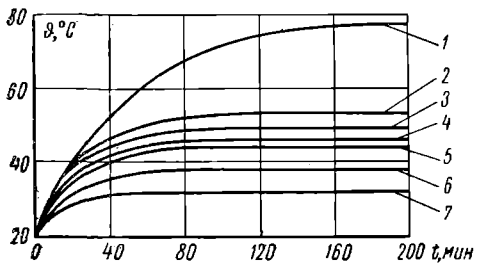



Рис. 1. Кривые нагрева двигателя АО32-4 при различных способах воздушного охлаждения (см. табл. 1).

*Таблица 1*

**Результаты исследования нагрева электродвигателей серии АО32-4 мощностью 1 *квт*, 1410 *об/мин* при номинальной нагрузке и различных способах охлаждения**

| Способ охлаждения | Кривая по рис. 1 | $\tau_у$, °С | $t_у$, *мин* |
|---|---|---|---|
| Естественное охлаждение | 1 | 57 | 170 |
| Самовентиляция | 2 | 33 | 106 |
| Независимая вентиляция: | | | |
| с коротким направляющим кожухом при $v$, *м/сек* | | | |
| 5 | 3 | 29 | 86 |
| 7,5 | 4 | 26 | 82 |
| 10 | 5 | 24 | 80 |
| с удлиненным направляющим кожухом при $v$, *м/сек* | | | |
| 5 | 6 | 18 | 72 |
| 10 | 7 | 12 | 54 |

Примечание: $v$ — скорость охлаждающей воздушной струи; $t_у$ — время достижения установившейся температуры.

где

$$k_1 = \frac{\eta_н}{1 - \eta_н} \tau_{у.н}.$$

Как следует из уравнения (7), для увеличения номинальной мощности машины при заданном ее габарите необходимо стремиться к повышению теплоотдачи $A$, т. е. к интенсификации охлаждения. Из табл. 1 видно, что интенсивность охлаждения двигателя резко возрастает при переходе от естественного охлаждения к самовентиляции и еще в большей степени — при независимой вентиляции, особенно при удлиненном кожухе. Кривые охлаждения двигателя АО32-4, приведенные на рис. 2, где $T'_{охл}$ и $T''_{охл}$ — постоянные времени охлаждения, показывают, что

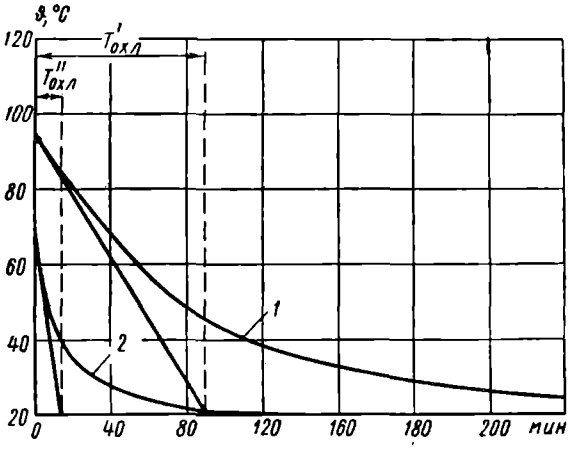



Рис. 2. Кривые охлаждения двигателя АО32-4:
*1 — естественное охлаждение; 2 — независимая вентиляция при $v$ = 10 м/сек.*

за счет интенсификации охлаждения время понижения температуры нагретого двигателя до температуры окружающей среды можно сократить в 5—6 раз. Еще больший эффект получается при водяном охлаждении.

Таким образом, при интенсификации охлаждения за счет независимой вентиляции и водяного охлаждения, номинальную мощность электрических машин можно значительно повысить, т. е. при том же весе и габаритах машины нагрузку можно увеличить, а при той же нагрузке снизить температуру нагрева машины и повысить надежность работы.

Как видно из табл. 2, переход от естественного охлаждения двигателей комбайнов к охлаждению обдувом позволяет увеличить относительную

*Таблица 2*

**Номинальная мощность электродвигателей комбайнов при различных способах охлаждения**

| Электродвигатель | Способ охлаждения | $P_{дл.н}$, *квт* | $p$, *кг* | $\frac{P_{дл.н}}{p}$, *квт/кг* |
|---|---|---|---|---|
| ЭДК4-1 | Естественное охлаждение | 38 | 1100 | 0,0345 |
| ЭДКО4-2Л | Наружный обдув | 70 | 1300 | 0,0537 |
| ЭКВ-400-120 | Водяное охлаждение | 120 | 1300 | 0,0925 |

Примечание: $P_{дл.н}$ — длительная номинальная мощность; $p$ — вес электродвигателя.

номинальную мощность в $\frac{0{,}0537}{0{,}0345} \approx 1{,}6$ раза, а при водяном охлаждении — в $\frac{0{,}0925}{0{,}0345} \approx 2{,}7$ раза.

Для повышения эффективности действия необходимо непрерывное воздушное и водяное охлаждение во время работы машины и во время пауз (рис. 3).

**Влияние вида изоляции на номинальную мощность и срок службы электрических машин.** Согласно выражению (6), при $\eta_н = \text{const}$ и $A = \text{const}$

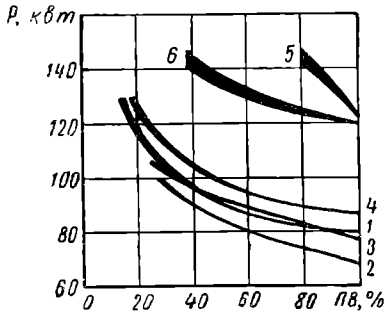



Рис. 3. Расчетные характеристики обдуваемых электродвигателей и электродвигателей с водяным охлаждением:

*1* — ЭДКО4-4С (при перегреве 95° С); *2* — ЭДКО4-6С; *3* — ЭКО-400; *4* — ЭДКО-4С (при перегреве 100° С); *5* — ЭКВ-400Л с непрерывным водяным охлаждением; *6* — ЭКВ-400Л с охлаждением только во время работы комбайна [Киклевич, 1965].

$$P_н = k_2 \tau_{у.н}, \qquad (8)$$

где

$$k_2 = \frac{\eta_н}{1 - \eta_н} A,$$

т. е. номинальная мощность машины зависит от допускаемой температуры перегрева, которая, в свою очередь, определяется теплостойкостью изоляции машины.

Допустимая температура нагрева изоляции

$$\vartheta_{из} = \vartheta_0 + \tau_{из}, \qquad (9)$$

где $\vartheta_0$ — температура окружающей среды; $\tau_{из}$ — максимально допустимый перегрев изоляции.

Для изоляции классов *A* и *B* допустимая температура нагрева соответственно 105 и 130° С (ГОСТ 8865-58), для изоляции класса *F* она составляет 155° С и для классов *H* и *C* — до 180° С и выше.

Нагревостойкость изоляционных материалов классов *A* и *B* относительно невысокая, что ограничивает номинальную мощность электрических машин. Применение теплостойких и электрически высококачественных изоляционных материалов при использовании органических связующих не решает задачи. При повышении температуры органические компоненты изоляции быстро стареют и теряют электроизолирующие свойства, влагостойкость и механическую прочность.

Опыт показывает, что даже незначительное повышение температуры над допустимой резко сокращает срок службы изоляции классов *A* и *B*. Например, длительное повышение температуры сверх допустимой на 10° С сокращает срок службы изоляции в 2 раза, а на 20° С — в 8 раз.

Как видно из рис. 4, применяемые в шахтных электродвигателях изоляционные материалы быстро стареют и не удовлетворяют условиям эксплуатации. Для повышения сопротивления изоляции, увеличения срока службы электродвигателей и повышения надежности их работы необходимо шире внедрять синтетические изоляционные материалы, предназначенные для работы в условиях повышенного нагрева и высокой влажности воздуха. Новые электроизолирующие материалы на полиорганосилоксановых (кремний-органических) смолах в сочетании со стекловолокном, асбестом, слюдой и другими неорганическими материалами позволяют изготовлять обмотки электрических машин, рассчитанные на рабочую температуру 180° С и выше и обладающие большой влагостойкостью.

В двигателях взрывобезопасной конструкции полиорганосилоксановая изоляция позволяет повысить мощность при тех же габаритах и весе на 30—40%.

Согласно испытаниям ГИПРОНИСэлектрошахта двигатели врубовых машин с изоляцией класса *B* при 120° С выдерживали до пробоя 30—60 тыс. реверсов, а двигатели с полиорганосилоксановой изоляцией при 140—200° С и воздействии на обмотки водо-масляной смеси — до 300 тыс. реверсов и больше.

К числу новых изоляционных материалов относятся также пропиточные лаки и компаунды на основе эпоксидных смол. Достоинствами эмали на эпоксидных смолах являются: способность образовывать толстые пленки; теплостойкость и высокая электрическая прочность; влагостойкость; устойчивость в отношении кислот и растворителей.

Использование эпоксидных смол в ряде случаев позволяет принципиально по новому решить проблему изоляции, что, в свою очередь, обеспечивает экономию цветных и черных металлов, повышает надежность электрических машин и увеличивает срок их службы. Капсулирование (компаундирование), например, лобовых частей обмоток двигателей заливкой теплостойкими эпоксидными компаундами, позволяет создать монолитные конструкции обмоток, устойчивые относительно тепловых и механических ударов и влаги. Сокращая внутреннее пространство в двигателях, капсулирование способствует также ограничению их «дыхания», т. е. обмену внутреннего воздуха при чередовании нагрева и охлаждения двигателей. Ограничение «дыхания» снижает выпадение конденсата внутри электродвигателя, засасывание масла из подшипников, давление при взрыве газа внутри двигателя и улучшает теплоотдачу от лобовых частей обмотки к корпусу статора.

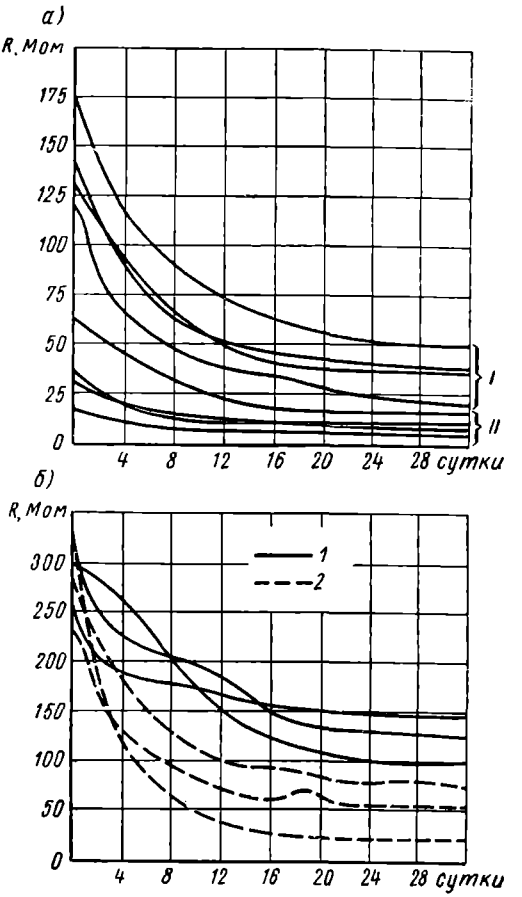



Рис. 4. Изменение активного сопротивления изоляции электродвигателей в процессе эксплуатации.
*а* — МА-94ф:
*I* — новых, *II* — бывших в эксплуатации;
*б* — комбайновых при относительной влажности:
*1* — 85—90%, *2* — 90—97% [Чеботаев, 1965].

Капсулирование двигателей применяется рядом иностранных фирм. Двигатели, защищенные таким образом, успешно работают, подвергаясь воздействию воды, кислот, щелочей при значительном изменении температуры. По данным канадской фирмы (Ontario Paper Co.) капсулирование двигателей, работающих на бумажной фабрике в весьма тяжелых условиях, позволило увеличить срок их службы с 5—6 месяцев до 5 лет [Молотков, 1964].

**Защита электродвигателей.** Работа двигателей горных комбайнов и транспортных машин сопровождается значительными перегрузками

и частыми пусками под нагрузкой. Защита двигателей с помощью плавких предохранителей и максимально-тепловых реле, встраиваемых в магнитные пускатели, недостаточно совершенна. Плавкие предохранители, выбираемые с учетом пусковых токов двигателей, перегорают только при коротких замыканиях и не защищают двигатель от опасных технологических перегрузок.

Комбинированные максимально-тепловые реле РМТ, встроенные в магнитные пускатели, успешно защищая двигатели от токов короткого замыкания, неудовлетворительно работают при продолжительных и относительно небольших технологических перегрузках, вызывающих опасный перегрев. Тепловые реле, встроенные в пускатель, не могут реагировать на изменения условий охлаждения двигателя, вызываемые, например, прекращением подачи охлаждающего воздуха или воды, засорением каналов и т. п., так как ток нагрузки, на который настроена защита, может при этом остаться неизменным. Не может реагировать встроенное в пускатель тепловое реле и на начальные условия работы двигателя, так как оно срабатывает при определенной величине тока нагрузки, независимо от температуры двигателя. Температура предварительно нагретого двигателя, естественно, может достигнуть опасной для изоляции величины быстрее, чем у холодного. Защита же, встроенная в пускатель, отключит двигатель в том и другом случае (при одинаковой нагрузке) за один и тот же промежуток времени.

Надежно контролировать температуру обмоток двигателя может только тепловая защита, встроенная в двигатель. Такими являются встроенные в двигатели тепловые реле типа Т-1 Кемеровского электромеханического завода и дифференциальное термореле типа ДТР-3 ГИПРОНИСэлектрошахта. Термореле, установленное на лобовых частях обмотки статора, наиболее верно отражает тепловой режим обмотки. Однако при теплостойкой изоляции из кремний-органических и эпоксидных материалов опасности перегрева обмотки статора нет, так как допустимая для этих видов изоляции температура достигает 180—200° С и выше. В этом случае предельно допустимая температура ограничивается температурой нагрева наружной поверхности пакета статора и подшипников.

По данным института горного дела им. А. А. Скочинского, перегрев активной стали статора при больших перегрузках с небольшим отклонением (около 4% при симметричной нагрузке и около 7% при несимметричной) следует за перегревом обмотки статора.

Таким образом, у двигателей с кремний-органической и эпоксидной изоляцией термореле можно устанавливать в среднем пакете стали статора. При этом потребуется только одно реле, которое можно не снимать во время ремонта обмоток статора. Реле будет одновременно контролировать и температуру подшипников двигателя. И, наконец, встроенное в сталь статора тепловое реле, вследствие тепловой инерционности стали, будет допускать в течение известного времени работу двигателя в режиме расштыбовки.

Тепловая защита, встроенная в двигатель, должна быть дополнена максимальной токовой защитой, отстроенной от пусковых токов. Максимальные токовые реле следует устанавливать в магнитных пускателях.

**Пути создания систем привода «постоянной мощности».** Асинхронные короткозамкнутые двигатели, применяемые обычно в качестве привода для горных машин, в частности горных комбайнов, обладают жесткой характеристикой, и пуск их связан с относительно большими токами, достигающими для отдельных типов электродвигателей 9—11-кратной величины по отношению к номинальному длительному току.

Переменные сопротивления резанию, обусловленные разнообразным характером залегания пластов, прослойками, твердыми включениями и т. п., относительно частые включения и выключения машин приводят к весьма тяжелому режиму работы двигателей.

В настоящее время еще не установилась определенная точка зрения относительно оптимальной формы характеристики электродвигателей горных машин, особенно режущей части. Однако бесспорно то, что при существующем асинхронном приводе, обладающем жесткой характеристикой, для улучшения режима работы двигателя полезно ввести между двигателем и механизмом резания эластичное звено. Оно, во-первых, позволит производить пуск двигателя вхолостую и даст возможность за счет уменьшения пускового момента увеличить величину критического (опрокидывающего) момента, во-вторых, будет способствовать выравниванию нагрузки и тем улучшит режим работы приводного двигателя и механической части горных машин.

В этом отношении полезную роль могли бы сыграть центробежные гидропередачи: турбомуфты и турботрансформаторы. Опыт применения турбомуфт на конвейерных установках дал положительные результаты, но для горных машин типа комбайнов большего эффекта в выравнивании нагрузки и защите приводных двигателей от опасных перегрузок можно ожидать от турботрансформаторов, представляющих собой гидравлический редуктор с переменным передаточным числом: при повышении нагрузки передаточное число турботрансформатора увеличивается, при понижении — уменьшается. Характеристика $n_2 = f(M_2)$ на вторичном валу турботрансформатора имеет мягкую форму, т. е. при увеличении нагрузки число оборотов вторичного вала автоматически понижается. Мощность на первичном валу турботрансформатора при этом остается приблизительно постоянной, и двигатель не чувствует перегрузок, возникающих на рабочем валу машины.

В мировой практике и в Советском Союзе успешно применяют турботрансформаторы на тяжелых грузовиках, тракторах, подъемных кранах и других установках, где по технологическим условиям неизбежны большие перегрузки и где необходимо защитить от них двигатели.

Естественные свойства турботрансформаторов позволяют относительно просто создать для горных машин системы привода «постоянной мощности». Как показывают расчеты, габариты турботрансформатора соизмеримы с габаритами электродвигателей горных машин. В качестве рабочей жидкости для трансформатора может быть использована вода, служащая для охлаждения двигателя и орошения забоя.

## Выводы

Как следует из статистических материалов по аварийности электродвигателей горных машин и оценки мероприятий, способствующих сокращению их аварийности и повышению надежности эксплуатации, для радикального решения этой проблемы необходимы следующие взаимно связанные и дополняющие друг друга мероприятия.

1. Интенсификация охлаждения электродвигателей путем применения независимого воздушного и водяного охлаждения.

2. Повышение тепло-влагостойкости изоляции за счет использования изоляции классов $F$ и $H$ с пропиткой кремний-органическими и эпоксидными лаками, а также путем капсулирования обмоток двигателей.

3. Усовершенствование защиты электродвигателей с использованием встроенных в двигатель тепловых реле.

4. Создание систем гидроэлектрических приводов «постоянной мощности».

Как показывает опыт [Тищенко, 1961; Дискуссия , 1964], затраты на создание электродвигателей высокой эксплуатационной надежности при комплексном решении вопроса быстро окупаются. Удорожание электродвигателей дает экономию при эксплуатации, которая в несколько раз превышает дополнительные затраты при изготовлении машины.

При конструировании электродвигателей горных машин необходимо учитывать реальные условия их эксплуатации, отработать наиболее совершенные образцы машин с учетом тяжелых эксплуатационных требований горной промышленности и прекратить выпуск несовершенных типов электродвигателей.

## ЛИТЕРАТУРА


Дискуссия о проблеме надежности электрооборудования. Электричество, № 11, 1964.

Каймаков А. А. Характерные повреждения электрооборудования на шахтах Кузбасса. Тр. ВостНИИ, т. III, 1963.

Киклевич Н. А., Киклевич Ю. Н. Режимы работы исполнительных органов и привода угольных комбайнов. Недра, 1965.

Молотков Р. В. Эпоксидные смолы и их применение в электропромышленности. ВНИИЭМ, 1964.

Тищенко Н. А. Проблема надежности электродвигателей. Электричество, № 11—12, 1961.

Чеботаев Н. И. Изменение активного сопротивления изоляции шахтного электрооборудования в процессе эксплуатации. Электробезопасность на предприятиях горной промышленности. Недра, 1965.

Штединг С. А. Причины аварийности электрооборудования угольных комбайнов на шахтах комбината Воркутуголь. Горные машины и автоматика, № 45, 1964.