

В.Л. Дебелый, В.А. Севостьянов

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ РУДНИЧНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

*Интенсификация охлаждения тягового электродвигателя рудничного аккумуляторного электровоза в кратковременном и продолжительном режимах работы за счет применения легкоплавкого вещества.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: тяговый электродвигатель, аккумуляторный электровоз, скорость нарастания температуры обмотки, продолжительность рабочего цикла, кратковременный и продолжительный режимы работы, легкоплавкое вещество, надежность изоляции, энергоэкономичность.*

*Інтенсифікація охолодження тягового електродвигуна рудничного акумуляторного електровоза в короткочасному і тривалому режимах роботи за рахунок застосування легкоплавкої речовини.*

*К л ю ч о в і с л о в а: рудничний тяговий електродвигун, акумуляторний електровоз, швидкість наростання температури обмотки, тривалість робочого циклу, короткочасний і тривалий режими роботи, легкоплавка речовина, надійність ізоляції, енергоекономічність.*

**Постановка проблемы.** Тяговые двигатели (ТД) постоянного тока серии ДРТ рудничных аккумуляторных электровозов (РАЭ), разработанные более 50 лет назад, сохранились в своей основе и в настоящее время. По принципу действия они являются двигателями с последовательным возбуждением, т.е. имеют существенные преимущества в случае тяжелых условий пуска и изменения момента нагрузки в широких пределах. На РАЭ устанавливается горизонтально по два ТД.

Локомотивный парк шахт Украины в 2002 г. состоял из 1390 электровозов, из которых 80 % – аккумуляторные с ТД постоянного тока типа ДРТ [1]. Они выпускаются пяти типоразмеров (ДРТ-10А1, ДРТ-10А2, ДРТ-13М, ДРТ-14 и ДРТ-23,5), охватывают диапазон мощности от 6,0 до 23,5 кВт в кратковременном режиме работы S2 и от 2,4 до 7,2 кВт в продолжительном режиме S1 и изготавливаются во взрывозащищенном исполнении вида РВ-ЗВ. Наибольшее применение находит ТД типа ДРТ-13М мощностью 13/6,4 кВт, который используется на РАЭ типов АМ8Д1, АМ8Д2, 2АМ8Д2, АРП10Г, АРП8Т, 2АРП8Т, ЭРА900, и 2ЭРА900.

Одним из основных технических требований, предъявляемых к РАЭ, является обеспечение бесперебойной работы очистных и подготовитель-

ных участков с наименьшими капитальными и эксплуатационными расходами. Для обслуживания тупиковых и вентиляционных выработок с содержанием метана до 1,0 % взрывозащищенным РАЭ нет альтернативы, за исключением гировозов.

Проходящее в последние 10...15 лет техническое перевооружение угольной отрасли Украины, в соответствии с мировыми тенденциями, привело к увеличению среднесуточной нагрузки на комплексно-механизированные очистные лавы и проходческие забои более чем в 2,9 раза. При этом значительно возросла скорость проходки подготовительных выработок, т.е. объем извлеченной породы. Все это привело к необходимости увеличения пропускной способности шахтного транспорта. Однако отечественные РАЭ оказались не в состоянии обеспечить необходимую и достаточную его пропускную способность. Возросшие и, в ряде случаев, неконтролируемые нагрузки на них приводят к недопустимому нагреву обмоток ТД, заметному снижению их надежности и, как следствие, к частым и дорогим капитальным ремонтам. В свою очередь, недостаточное финансирование НИР по совершенствованию ТД привело к существенному отставанию их эксплуатационных характеристик от потребностей, вызванных возросшим техническим уровнем забойных машин и оборудования.

Поэтому шахты вынуждены применять дорогие зарубежные локомотивы с дизельным ТД, а также подвесные монорельсовые дороги, финансируя таким образом зарубежного производителя. Однако приобрести даже этот современный дорогой импортный внутришахтный транспорт могут только крупные, состоятельные шахты, которых в Украине насчитывается единицы.

В последние годы в ОАО «Дружковский машиностроительный завод» проведена модернизация выпускаемых им РАЭ, в ООО НПП «Энергия» (Донецк) освоено производство новых РАЭ типа «ЭРА» с ТД типов ДРТ-13М и ДРТ-14, в СКБ и на заводе «Электромашина» (Харьков) проведена модернизация ТД типа ДРТ-13М и освоен выпуск более мощных типа ДРТ-14, в ОАО «Механик» (Донецк) освоено производство ТД типа ДРТ-13.

ЧАО ПКФ «Амплитуда» (Донецк) внедряет безреостатную энергоэкономичную систему транзисторного регулирования скорости движения РАЭ, заменяет щелочные аккумуляторы на более энергоемкие свинцово-кислотные и т.д. Однако проведенная модернизация ДРТ-13М основана на старой концепции и в ближайшей перспективе они уже не будут удовлетворять возросшим требованиям шахт, т.е. проблема улучшения эксплуатационных характеристик отечественных РАЭ и их ТД остается актуальной.

В ЧАО ПКФ «Амплитуда» разработаны основные направления развития и совершенствования шахтного транспорта [1], в которых для повышения технического уровня РАЭ до уровня лучших мировых образцов предусмотрено:

- а) увеличение мощности ТД в 1,5–2 раза;

б) повышение надежности ТД в 4–5 раз.

Одним из путей решения этих проблем является создание эффективной и экономичной системы охлаждения рудничных ТД для номинального кратковременного и длительного режимов работы.

**Анализ исследований и публикаций.** За номинальный режим работы ТД нами принят кратковременный режим S2 с продолжительностью номинальной нагрузки 60 мин, поскольку при длине транспортирования груза в одну сторону 0,5...9 км и скорости движения (РАЭ) 9...10 км/ч время движения состава не более одного часа, а время выхода ТД в установившееся тепловое состояние в продолжительном режиме S1 равно десяти и более часам, т.е. ТД за один рейс не успевает нагреться до этого состояния.

В отличие от стандартных режимов работы ТД периодически работают в режиме стохастической нагрузки (частые пуски и торможения, реверсы, повторно-кратковременные режимы). Эти режимы характеризуются вероятностными характеристиками, которые определяются согласно ГОСТ 11.004-84 и ГОСТ 11.006-74.

Одним из существенных недостатков ТД является неодинаковый нагрев их обмоток. Согласно техническим условиям обмотки возбуждения главных и добавочных полюсов выполнены с изоляцией класса нагревостойкости Н, допускающей предельную температуру 180 °С, обмотка якоря – с изоляцией класса нагревостойкости F при предельно-допустимой температуре 150 °С, а коллектор допускает температуру 120 °С. Высокая температура обмоток возбуждения является дополнительным источником нагревания обмоток якоря и коллектора.

Срок службы ТД типа ДРТ до капитального ремонта составляет 6 лет. Вероятность безотказной работы в течение 720 часов равна 0,96 при среднесуточной наработке 14 часов [1]. Однако, как показывает практика, эти расчетные значения показателей надежности значительно отличаются от эксплуатационных показателей из-за отказов вследствие перегрузки ТД, неправильного или неосторожного обращения с ним.

Реальная физическая картина теплового состояния ТД характеризуется явно выраженным неравномерным температурным полем и неравномерным распределением тепловых потерь от обмоток полюсов к корпусу. Это обусловлено, в первую очередь, отсутствием специальных средств внутреннего и наружного охлаждения, которые могли бы одинаково эффективно охлаждать обмотки при кратковременном и продолжительном режимах работы. Передача и отвод тепла в этих ТД как внутри, так и снаружи крайне неинтенсивны.

Корпус ТД охлаждается естественным путем за счет встречного потока воздуха при движении РАЭ, при этом коэффициент теплоотдачи наружной поверхности станины и щитов равен 20 Вт/м<sup>2</sup>К. Столь низкие условия теплопередачи приводят к большим габаритным размерам ТД, высокой

удельной материалоемкости и, в конечном итоге, снижают их конкурентоспособность.

В силу конструктивных особенностей ТД катушки полюсов не имеют непосредственного контакта с их корпусом. Основной тепловой поток от обмоток главных и добавочных полюсов передается корпусу двумя путями: через стальные полюса и через внутренний воздух. Только четвертая часть корпуса контактирует с полюсами, около 60 % поверхности обмоток главных и добавочных полюсов обращены в аксиальные неventилируемые межполюсные каналы, в которых теплоотдача происходит естественной конвекцией и лучеиспусканием и составляет около 16...20 Вт/м<sup>2</sup>К.

Задачами создания эффективной системы охлаждения ТД с целью повышения их мощности в режимах работы S2 и S1 занимались практически с момента создания ТД серии ДРТ. Периодически публиковались результаты теоретических и экспериментальных исследований, защищались докторские и кандидатские диссертации, посвященные этой проблеме [2,3]. Однако на начальном этапе развития отечественных РАЭ эта проблема не стояла так остро, как сейчас. Электровозная откатка в то время соответствовала низкой производительности забойных механизмов угольных шахт. Проблема повышения мощности и надежности ТД возникла в последние годы в связи с научно-техническим перевооружением угольной отрасли.

Широкомасштабные исследования эксплуатационной работоспособности и надежности РАЭ типов 2АМ8Д, АРП10 и АРП14 были проведены специалистами лаборатории рельсового транспорта ДонУГИ на 20 шахтах России и Украины [4]. Период наблюдения за их работой составлял в отдельных случаях 17 лет (1975-1992 гг.), количество исследованных ТД – 63 единицы.

Установлено, что определяющее влияние на эксплуатационную надежность РАЭ оказывает надежность комплектующих элементов и узлов их электропривода, в том числе ТД типа ДРТ-13М в электровозах 2АМ8Д и типа ДРТ-23,5 в электровозах АРП10. Нарботка на отказ двигателей ДРТ-13М составила от 0,2 до 2,2 года, причем половина из них имела наработку на отказ до одного года. Главной причиной, лимитирующей срок службы и безотказность ТД, является несоответствие их расчетных параметров реальным эксплуатационным нагрузкам. К этим нагрузкам относятся установка с помощью электровоза сошедшей с рельсов вагонетки, сильное засорение подъездных рельсовых путей, превышение массовой нормы состава, случайное перераспределение нагрузки между ТД, неточное определение параметров их режимов работы.

Решение этих проблем для ДРТ-13М специалисты ДонУГИ видят в повышении мощности в кратковременном режиме работы, а для ДРТ-23,5 – в переходе к длительному режиму работы.

В [3] установлено, что из десяти наиболее характерных отказов ТД 50,98 % происходит по причине тепловых перегрузок обмоток и прежде-

временного разрушения их электроизоляции. В частности, замыкание катушек обмоток возбуждения на корпус составляет 23,9 %, витковое замыкание этих катушек – 3,28 %, разрушение изоляции обмотки якоря – 3,8 %, перемыкание пластин коллектора – 15,92 %. Это приводит к значительным экономическим затратам потребителя на частые капитальные ремонты ТД, стоимость которых составляет более 50 % нового изделия. Из-за плохого финансового состояния большинству шахтам приходится ремонтировать один и тот же ТД 5-6 раз, причем после каждого капитального ремонта их надежность снижается всё в большей мере.

Из истории развития интенсификации охлаждения электрических машин известно, что радикальным способом увеличения их мощности является замена традиционного внутреннего теплоносителя – воздуха – на теплоноситель с более высокими теплофизическими характеристиками: в турбоэлектродвигателях используют водород, в асинхронных комбайновых двигателях типа ЭКВЖ – диэлектрическую жидкость, положительный эффект в малых асинхронных двигателях дает капсулирование лобовых частей обмоток статора высокотеплопроводными наполнителями, например, на основе эпоксидно-кремнийорганических смол с коэффициентом теплопроводности 1,86...6,97 Вт/м<sup>2</sup>К или легкоплавким веществом – парафином [5]. В некоторых типах электрических машин используют смешанное охлаждение. Промежуточный жидкий диэлектрический теплоноситель может частично заполнять полость двигателя и подаваться на охлаждаемые поверхности в виде струй, создавая аэрозольное охлаждение.

Проведенный анализ показал, что возможности интенсификации охлаждения ТД при сохранении традиционной конструкции и технологии или невелики и энергозатратны, или неприемлемы в силу существенных конструктивных особенностей РАЭ. Поэтому дальнейшее развитие ТД возможно за счет новых прогрессивных технических решений в области охлаждения.

**Цель статьи.** Обоснование концепции отдельной интенсификации охлаждения обмоток ТД в номинальном кратковременном режиме работы РАЭ и способов ее реализации.

**Результаты исследований.** Исследовался серийный ТД серии ДРТ-13М. Температурное поле ТД постоянного тока имеет несколько распределенных внутренних источников тепла.

С целью упрощения выкладок обмотки главных и дополнительных полюсов рассматриваются как единый внутренний источник.

Решение нашей задачи основано на анализе известного дифференциального уравнения теплового состояния для элемента объема активной части (обмоток полюсов):

$$Q \cdot dt = G \cdot c \cdot d\theta + S \cdot \theta \cdot \lambda \cdot dt,$$

где  $Q \cdot dt$  – количество тепла, выделенного за бесконечно малый промежуток времени при прохождении тока в обмотках полюсов;

$G \cdot c \cdot d\theta$  – количество тепла, идущего на увеличение теплосодержания объема обмоток с градиентом температуры  $d\theta$  за то же время;

$S \cdot \theta \cdot \lambda \cdot dt$  – количество тепла, уходящего из элемента обмоток за счет теплопроводности;

$G$  – масса двигателя;

$c$  – удельная теплоемкость двигателя;

$\theta$  – превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды;

$S$  – поверхность теплоотдачи обмоток;

$\lambda$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности обмоток.

Нагревание двигателя при кратковременном режиме работы происходит в адиабатическом тепловом режиме, при котором теплообмен ТД с окружающим воздухом отсутствует. Тогда уравнение нагревания имеет вид

$$Q \cdot dt = G \cdot c \cdot d\theta \quad \text{или} \quad d\theta/dt = Q/G/c.$$

Очевидно, что скорость нарастания температуры  $d\theta/dt$  обмоток полюсов в кратковременном режиме работы тем меньше, с одной стороны, чем больше теплоемкость  $G \cdot c$  и меньше выделяется тепла, а с другой – чем интенсивнее передача тепла в самом ТД и от него в окружающий воздух

$$d\theta/dt = S \cdot \theta \cdot \lambda / G/c.$$

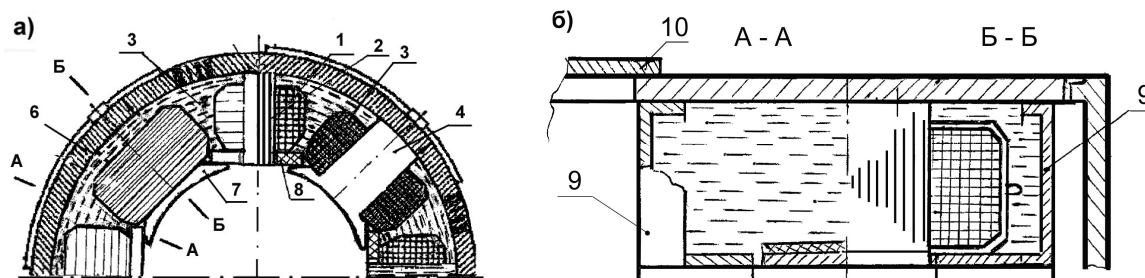
Особенность теплового состояния обмоток ТД в кратковременном режиме работы заключается в том, что нагревание происходит от начального превышения температуры  $\theta_0$  до  $\theta_{\text{доп.}}$ , не достигая установившегося значения. При малых значениях  $t$ , когда  $\theta$  и теплоотдача в окружающее пространство малы, большая часть тепла накапливается в обмотках и температура их растет быстро. Затем по мере увеличения  $\theta$  теплоотдача увеличивается и рост температуры обмотки замедляется. Из приведенных уравнений следует, что снижение скорости нарастания температуры обмоток полюсов и увеличение времени их нагрева в кратковременных режимах работы может быть достигнуто вследствие поглощения (аккумуляции) теплоты обмотками и полюсами за счет их теплоемкости.

Одним из направлений решения этой задачи является замена внутреннего теплоносителя – воздуха, окружающего полюса с обмотками, на другой теплоноситель с лучшими теплофизическими и энергетическими свойствами. В качестве такого теплоносителя предлагается использовать легкоплавкое вещество из предельных углеводородов парафинового ряда (парафин, озокерит и др.) или твердых высших жирных кислот (стеарин, нафталин, дифенил и др.), температура плавления которых составляет 45...85 °С. Поскольку плавление есть переход вещества из твердого состояния в жидкое, т.е. переход первого рода, происходящий с поглощением тепла, то используемым в рассматриваемом случае свойством этих веществ является их способность кратковременно задерживать (аккумулировать) тепло и та-

ким образом замедлять скорость роста температуры, а также передавать тепло без затрат внешней энергии.

С начала плавления вещества и до его завершения температура вещества остается постоянной и равной температуре плавления, а поступающая к нему теплота расходуется на изменение внутренней структуры вещества.

Фрагмент принципиальной схемы ТД постоянного тока с капсулированными полюсами показан на рисунке 1.



- 1 – катушка дополнительного полюса; 2 – сердечник дополнительного полюса; 3 – катушка главного полюса; 4 – сердечник главного полюса;  
 5 – межполюсные аксиальные каналы (легкоплавкое вещество); 6 – станина;  
 7 – полюсный наконечник; 8 – уплотнительная пластина; 9 – торцевая крышка;  
 10 – люковая крышка

*Рисунок 1 – Принципиальная схема тягового двигателя с легкоплавким веществом: а – поперечный разрез, б – продольный разрез*

В качестве легкоплавкого вещества рассматривается парафин, который отличается от других легкоплавких веществ высокой теплоемкостью, хорошими электроизоляционными свойствами и инертностью к электротехническим материалам. Заполнение нагретой капсулы расплавленным парафином происходит через отверстия в торцевой крышке капсулы (на схеме не показано).

В кратковременном режиме работы ТД парафин выполняет роль дополнительного аккумулятора тепла, а в длительном и повторно-кратковременном режимах работы – роль эффективного теплопровода между обмотками полюсов и корпусом, т.к. коэффициент теплопроводности парафина в 10 раз больше, чем у воздуха.

Эта конструкция по сравнению с серийным ДРТ-13М обладает следующими преимуществами:

а) около 60 % наружной поверхности обмоток погружены в парафин, что резко увеличивает, по сравнению с воздухом, коэффициент теплоотдачи от обмоток полюсов и усиливает перенос теплоты от них к корпусу;

б) за счет высокого коэффициента теплоотдачи от обмоток к парафину и от него к корпусу, а также высокой теплопроводности парафина более чем в девять раз увеличивается тепловая проводимость от обмоток полю-

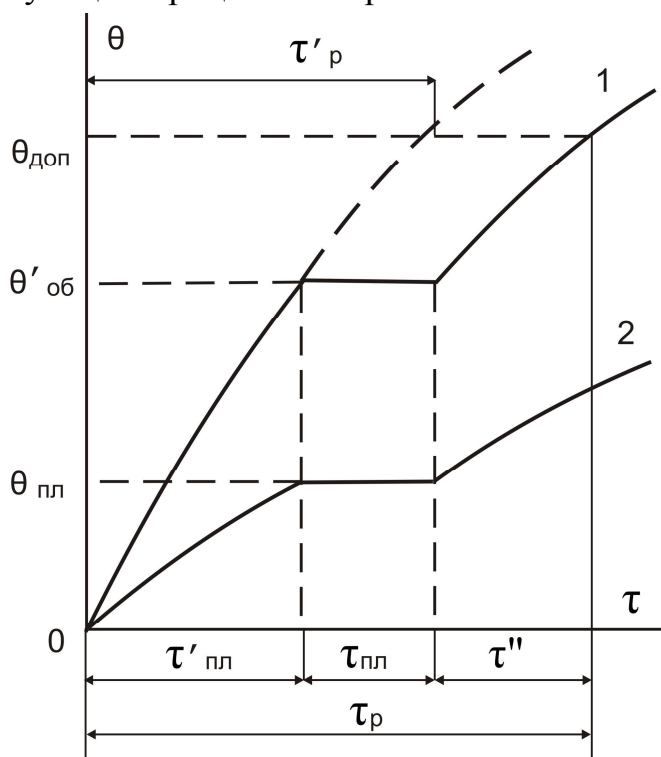
сов к корпусу (теплопроводность воздуха равна  $0,0283 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ , парафина –  $0,27 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ );

в) повышение тепловой проводимости приводит к повышению температуры корпуса за счет повышения плотности теплового потока и, как следствие, к повышению теплообмена с окружающим воздухом, что увеличивает рабочий цикл ТД в кратковременном или в длительном режиме работы и снижает температуру обмоток;

г) увеличенная температура корпуса позволяет применить наружное обребрение и принудительную вентиляцию корпуса, что в свою очередь приведет к еще большей эффективности применения парафина.

В капсуле ТД можно разместить более  $3...5 \text{ кг}$  парафина общей теплоемкостью  $16250 \text{ Вт/град}$ . Поскольку теплоемкость меди обмоток полюсов составляет  $13955 \text{ Вт/град}$ , то теплоемкость парафина превышает их теплоемкость более чем на  $16 \%$ .

На рисунке 2 приведены идеализированные экспоненты, характеризующие процессы нагревания обмоток полюсов, окруженных плавящимся парафином (1) и самого парафина (2) при кратковременном нагревании.



Хотя в действительности из-за жесткой тепловой связи между разными частями ТД, обладающими конечными значениями теплоемкости, теплопроводности и теплоотдачи, кривые нагревания не являются, строго говоря, экспоненциальными, однако в нашем случае при качественной оценке мы не делаем существенных ошибок, считая их экспоненциальными в соответствии с теорией нагревания идеального однородного тела.

*Рисунок 2 – Идеализированные кривые нагрева обмотки полюсов и парафина при кратковременном режиме работы двигателя*

После включения ТД на номинальную нагрузку на первом отрезке времени  $\tau'_{пл}$  происходит рост температуры обмотки только за счет теплоемкости обмоток и плавящегося парафина без передачи тепла в окружающее их пространство. При достижении температуры плавления парафина  $\theta_{пл}$  начинается второй этап нагревания, при котором выделяющееся в об-



мотке тепло расходуется на плавление парафина, т.е. на изменение его внутренней структуры. В результате этого температура парафина и обмотки  $\theta_{об}$  остается теоретически постоянной. Продолжительность времени плавления парафина  $\tau_{пл}$  определяется значением теплового потока от обмоток в конце первого этапа и теплотой плавления парафина.

Начало третьего этапа соответствует моменту времени  $\tau''$ , когда вся масса парафина перешла в жидкое состояние. Дальнейший процесс нагрева ТД характеризуется изменением теплосодержания всей его массы, в том числе и массы парафина и приводит к новому росту температуры обмотки. Продолжительность этого этапа определяется допустимой температурой обмоток полюсов  $\theta_{дон}$ , значением теплового потока  $Q$ , теплотой плавления парафина и его массой  $G$ . Общее время кратковременной работы ТД с парафином  $\tau_p$  определяется как сумма трех временных интервалов  $\tau'_{пл}$ ,  $\tau_{пл}$ , и  $\tau''$ , соответствующих указанным этапам. Время работы стандартного двигателя без парафина составляет только  $\tau'_p$ .

Практическая реализация разработанной концепции дает следующие положительные результаты:

- а) снижение скорости нарастания температуры обмоток полюсов ТД в кратковременном режиме работы;
- б) повышение тепловой проводимости от обмоток полюсов к корпусу;
- в) механическая защита изоляции обмоток полюсов от разрушительного воздействия шахтной атмосферы (жесткой воды, пыли и проч.);
- г) снижение подогрева якоря и коллектора от более нагретых обмоток главных и дополнительных полюсов;
- д) теплопередача (охлаждение) без затрат электроэнергии аккумуляторов РАЭ.

Расчет показал, что в кратковременном режиме работы ТД применение парафина позволяет увеличить время рабочего цикла в 1,5–2 раза или, при фиксированном значении рабочего периода, увеличить, если это позволяет тепловое состояние обмотки якоря и коллектора, нагрузку на 15...20 %.

Подбирая вид и массу промежуточного теплоносителя, можно эффективно и экономно регулировать процесс отвода тепловых потерь от отдельных источников (якоря, обмоток полюсов, коллектора).

Разработанный способ охлаждения применим как при проектировании и изготовлении новой серии ТД, так и на стадии их капитального ремонта.

### **Выводы:**

1. Двигатели типа ДРТ, концептуально разработанные более 50 лет, достигли своего предела в части преобразования электрической энергии в

механическую и по многим параметрам значительно превосходят другие виды ТД, например, дизельные.

2. Эти ТД останутся основой электропривода РАЭ на ближайшую перспективу до замены их регулируемым асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.

3. Наибольшее число отказов ТД происходит по причине систематических тепловых перегрузок обмоток и приходится на разрушение изоляции обмоток возбуждения.

4. Разработанные концептуальные основы нового способа охлаждения обмоток ТД постоянного тока основаны на применении в качестве промежуточного теплоносителя легкоплавких веществ, обеспечивающих повышение времени рабочего цикла или номинальной нагрузки, а также значимое повышение надежности обмоток полюсов без затрат электроэнергии аккумуляторов РАЭ.

#### Список литературы

1. Шахтный подземный транспорт: справочное изд.: в 2 т. Т.1. Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт /Под ред. Б.А. Грядущего.– Донецк: ВИК, 2011.– 480 с.

2. Рак А.Н. Разработка системы теплового контроля и оценка остаточного ресурса по фактору срока службы изоляции рудничных тяговых электродвигателей: автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05. 09.01 «Электрические машины»/А.Н.Рак.–Донецк, 1999.-19 с.

3. Кузьменко Л.В. Пути интенсификации охлаждения тяговых электродвигателей рудничных электровозов: автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.09.01 «Электрические машины» /Л.В. Кузьменко.– Харьков, 1983.– 23 с.

4. Разработать перспективную программу развития рельсового подземного транспорта, обеспечивающую повышение его тяговой способности, надежности, энерговооруженности и безопасности: отчет о НИР; шифр темы 0119205070.– Донецк: ДонУГИ, 1992 .– 88 с.

5. Асинхронный двигатель с форсированным охлаждением для кратковременного режима работы /В.М. Петров, Э.А.Мотин, Е.П.Бойко [и др.] // Электротехническая промышленность. Сер. Электрические машины.– 1980.– Вып. 8(114). – С.6-7.