

---

---

**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

---

---

УДК 621.313.333.2

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА  
АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**© 2019 г. Е. С. Дорохина<sup>1</sup>, А. А. Голдовская<sup>1,\*</sup>, А. С. Гирник<sup>1</sup><sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия**\*e-mail: Horoshko@tpu.ru*

Поступила в редакцию 10.01.2019 г.

Принята к публикации 24.04.2019 г.

Проведен анализ влияния тепловых процессов на конструктивные элементы двигателя и выявлены факторы, определяющие остаточный ресурс тягового электродвигателя. Предложена методика прогнозирования остаточного ресурса асинхронных тяговых электродвигателей, основанная на исследованиях их теплового состояния.

*Ключевые слова:* ресурс, прогнозирование, асинхронный тяговый электродвигатель, изоляция, тепловое состояние, мониторинг, надежность

**DOI:** 10.1134/S0235711919040060

Современная экономическая ситуация оказывает огромное влияние на все сферы промышленности и общественной жизни, в том числе и железнодорожный транспорт. Приоритетной становится задача более эффективного использования локомотивного оборудования для обеспечения надежной и бесперебойной работы, как отдельно взятого электровоза, так и железнодорожных перевозок в целом. Решение данной задачи возможно при наличии полной информации об остаточном ресурсе работы локомотивного оборудования. Необходимо отметить, что ресурс того или иного оборудования может быть определен лишь после того, как наступил отказ или достигнуто предельное состояние. Пока эти события не наступили, возможно только прогнозирование этих величин с большей или меньшей достоверностью [1].

К основному электрическому оборудованию электровозов как постоянного, так и переменного тока относят токоприемники, пускорегулирующую аппаратуру, тяговые двигатели, преобразовательные установки, аппараты защиты и управления, а также вспомогательные машины и оборудование. При этом оборудованием локомотива, на которое приходится наибольшая эксплуатационная нагрузка, и как следствие, высокий процент отказов, являются тяговые электродвигатели [2]. Следует отметить, что стоимость устранения последствий выхода из строя тяговой машины превышает аналогичный показатель практически всех других видов отказов на локомотиве.

Электрическая машина является сложным комплексным устройством, ее надежная и безотказная работа зависит от надежности узлов – магнитной системы, обмоток и др. Выход из строя любого из элементов приводит к отказу в работе всего электродвигателя.

Статистика отказов асинхронных электродвигателей показывает, что (85–95)% повреждений приходится на обмотки двигателя. При этом до 93% – на междувитковые замыкания обмотки статора, обусловленные снижением электрической прочности электрической изоляции [3]. Основными причинами, приводящими к повреждениям изоляции обмотки, являются превышения допустимых норм теплового состояния,

воздействия механических усилий (давление, вибрация и удары), влияние влаги, агрессивных сред и других факторов. Среди различных факторов, определяющих срок службы изоляции, а, следовательно, и ресурс тягового электродвигателя, основным является тепловое старение изоляции. Это явление лучше других поддается количественному учету и может являться основой методики прогнозирования остаточного ресурса асинхронного тягового электродвигателя (АТЭД).

Оценка ресурса изоляции может проводиться, опираясь на экспериментально полученные зависимости изменения ресурса изоляции  $L$  от температуры  $T$  [4]

$$L = Ae^{B/T} \quad \text{или} \quad \lg L = A' + B'/T, \quad (1)$$

где  $A, B, A', B'$  – постоянные коэффициенты, полученные экспериментально.

При этом, учитывая, что изоляция обмоток статора асинхронных тяговых электродвигателей состоит из нескольких изоляционных материалов, при расчете ресурса используется средний срок ресурса изоляции  $L_{CP}$ , рассчитанный как среднее арифметическое всех сроков  $L$  изоляций, применяющихся в электродвигателе.

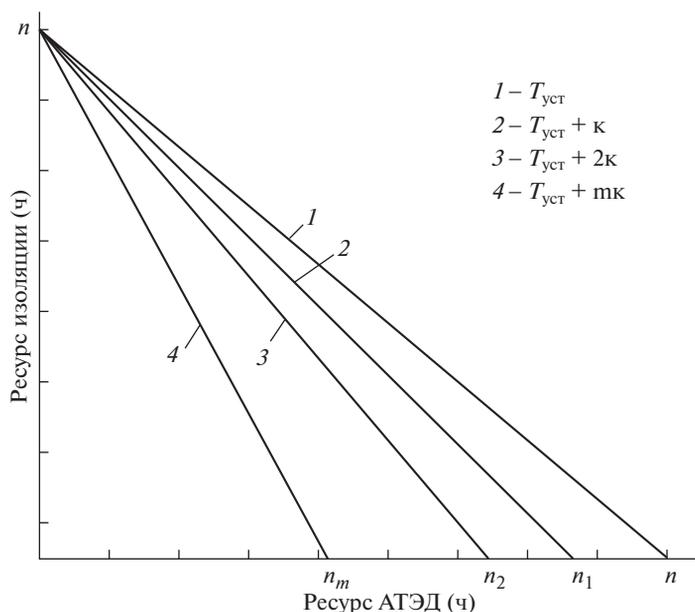
Необходимо отметить, что корректная оценка остаточного ресурса изоляции обмоток статора возможна только, если: 1) имеется информация о начальном ресурсе изоляции обмоток; 2) при расчетах исключена изоляция с резко выделяющимися значениями логарифмов [5]; 3) оптимальным является мониторинг изменения состояния АТЭД с начального момента эксплуатации электродвигателя.

Для каждого электроизоляционного материала или системы изоляции асинхронного тягового электродвигателя должно быть получено несколько зависимостей ресурса от температуры. Необходимо иметь зависимость ресурса изоляционного материала для номинальной установившейся температуры, и несколько зависимостей для превышающих значений температур. При этом, чем меньше шаг изменения температуры  $k$  от номинальной температуры, тем выше будет точность определения остаточного ресурса изоляции электродвигателя.

Так как ресурс изоляции напрямую определяет ресурс тягового электродвигателя в целом, то возможно проводить оценку остаточного ресурса электродвигателя по температурному старению изоляцию обмотки статора с достаточной точностью (рис. 1). При начальном значении ресурса изоляции обмоток статора  $n$  часов, в процессе эксплуатации асинхронного тягового электродвигателя в условиях, когда значения температуры изоляции равны или меньше установившихся температур ( $T_{уст}$ ), тяговый электродвигатель будет также иметь ресурс  $n$  часов. В случае же работы электродвигателя при температуре изоляции обмотки статора выше номинальной на  $k, 2k, 3k...mk$  градусов, происходит снижение ресурса изоляции, соответственно снижается остаточный ресурс АТЭД, и уменьшается до  $n_1, n_2, n_3...n_m$  часов.

Представленные на рис. 1 зависимости являются основой методики прогнозирования остаточного ресурса АТЭД по его тепловому состоянию. В процессе мониторинга теплового состояния асинхронного тягового электродвигателя при эксплуатации должно проводиться отслеживание температуры изоляции обмотки статора. При этом, когда температура изоляции превышает допустимое значение температуры для указанного класса изоляции, производится перерасчет остаточного ресурса изоляции обмотки статора, и самого электродвигателя.

В процессе эксплуатации электродвигателя при температурах меньше или равных допустимой температуре, ресурс изоляции электродвигателя будет снижаться по наклонной, полученной для номинальной температуры данного класса изоляции  $T_{уст}$  (1) (рис. 2). В случае превышения рабочей температуры обмотки статора в момент времени  $t_1$  (ч) выше номинального значения на  $k$  (град) осуществляется корректировка наклона прямой и новый прогноз остаточного ресурса изоляции электродвигателя. Дальнейшее снижение ресурса происходит по кривой  $T_{уст} + k$  (2). Если в какой-то



**Рис. 1.** График снижения ресурса АТЭД при эксплуатации от превышения методики определения остаточного ресурса АТЭД.

момент времени  $t_2$  произойдет возврат температуры до номинального значения и/или ниже, снижение ресурса снова будет описываться наклонной ( $I'$ ), которая будет проходить параллельно первоначальной кривой  $T_{уст}$  ( $I$ ). Условия эксплуатации, приводящие к повышению температур выше допустимого значения, могут происходить за время работы электродвигателя многократно, но при возврате значений температур к номинальной, снижение ресурса будет проходить по наклонным  $I'$ ,  $I''$ , ...  $I'''$ , проходящим параллельно первоначальной кривой  $T_{уст}$  ( $I$ ). Таким образом, пересечение наклонной прямой с осью абсцисс даст величину остаточного ресурса электродвигателя, для эксплуатации при данных условиях, каждый момент времени  $t$ .

Применение предложенной методики для асинхронных тяговых электродвигателей имеет ряд особенностей.

Асинхронные тяговые электродвигатели имеют достаточно большие габариты, а также герметизацию узлов от внешней среды для защиты от агрессивных воздействий. Система вентиляции таких машин независимая аксиальная. Опыт эксплуатации тяговых электрических машин показывает, что нагревание узлов конструкции вдоль оси вращения происходит неравномерно. Для крупных тяговых машин характерным является градиент в 15–32% между температурами лобовых частей обмоток машины со сторон подачи и выхода охлаждающего воздуха из электродвигателя [6, 7].

Другой особенностью эксплуатации АТЭД является периодическая работа электродвигателя в условиях отличных от номинальных (повышенные токовые нагрузки, изменение режима охлаждения и т.д.). Работа в таких условиях приводит также к неравномерному нагреванию узлов их конструкции [8, 9].

Это позволяет сделать вывод, что к определению температуры изоляции обмотки статора необходимо подходить комплексно. При оценке температурных нагрузок на изоляционные материалы, применяемые в асинхронном тяговом электродвигателе

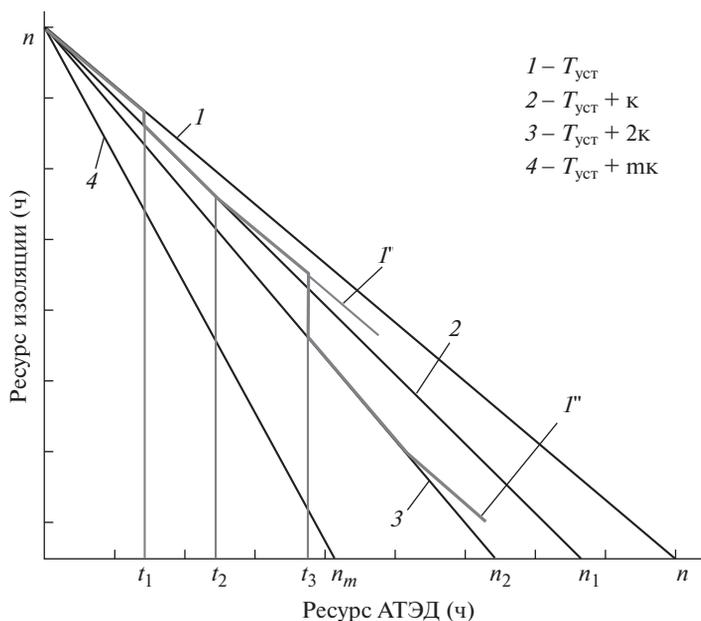


Рис. 2. Пример методики определения остаточного ресурса АТЭД.

нужно учитывать нагрев сердечника статора, нагрев самой обмотки по всей ее длине. Всестороннее исследование асинхронного тягового электродвигателя как теплового объекта позволяет получить расчетным путем температурное поле машины, и использовать эту информацию для корректировки режима работы АТЭД и оценки его остаточного ресурса. Информацию о полной картине температурного поля машины можно получить, осуществляя мониторинг теплового состояния электродвигателя на основании разработанной системы мониторинга для АТЭД [10].

Техническое решение задачи мониторинга теплового состояния электродвигателя осуществляется созданием программно-технического комплекса, в основе которого лежит тепловая математическая модель АТЭД, с ее помощью, в зависимости от входных данных определяются параметры, влияющие на ресурс и долговечность двигателя. Математическая модель основана на решении задач теплопроводности и осуществляет вычисление установившихся температур всех узлов электродвигателя, при этом учитывается температура окружающего и расход охлаждающего воздуха [9].

Таким образом, комплексное использование системы мониторинга теплового состояния АТЭД вместе с предложенной методикой оценки остаточного ресурса электродвигателя по тепловому старению изоляции дает возможность проводить прогнозирование его остаточного ресурса. Решение данной задачи позволит: 1) получить информацию о тепловом поле машины в процессе эксплуатации; 2) определить тепловой ресурс тягового электродвигателя по результатам послеремонтных испытаний; 3) проводить корректировку прогноза ресурса на основании мониторинга АТЭД в процессе эксплуатации.

Применение предложенной методики прогнозирования ресурса АТЭД на основе мониторинга теплового состояния электродвигателя может осуществляться как в период эксплуатации, так и в процессе его разработки и послеремонтных испытаний. Стоимость ремонта тягового электродвигателя сопоставима с его заменой на новый, поэтому приоритетным направлением использования методики прогнозирования

остаточного ресурса АТЭД является своевременное выявление критического состояния электродвигателя и последующая разработка предложений по дальнейшей его эксплуатации. Прогнозирование ресурса АТЭД позволит снизить материальные затраты, связанные с внеплановыми ремонтными работами по восстановлению АТЭД и как следствие, уменьшит частые простои подвижного состава. Дальнейшая задача по прогнозированию ресурса сводится к созданию/наработке базы данных по старению изоляционных материалов, применяемых в АТЭД.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дорохина Е.С.* Мониторинг теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей: Дис. канд. техн. наук. Томск: 2015. 155 с.
2. *Исмаилов Ш.К.* Повышение ресурса изоляции электрических машин подвижного состава: Монография. Омск: 2007. 391 с.
3. *Котеленец Н.Ф., Акимов Н.А., Антонов М.В.* Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: учебник для вузов / М.: Издательский центр "Академия", 2003. 384 с.
4. ГОСТ 10518-88. Системы электрической изоляции. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость. Введен – 1988-03-28, № 820, М.: Издательство стандартов, 1988. С. 18.
5. ГОСТ Р 5372-99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов. Общие положения. Введен – 1999-11-29, № 442-ст, М.: Издательство стандартов, 1999. С. 63.
6. *Бочаров В.И., Василенко Г.В., Курочка А.Л. и др.* Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / Под ред. В.И. Бочарова, В.П. Янова. М.: Энергоатомиздат, 1992. С. 464.
7. *Тихонов Ф.В.* Исследование теплового состояния асинхронного тягового двигателя в эксплуатации // Ж. Транспорт: наука, техника, управление. 2007. № 12. С. 16.
8. *Дорохина Е.С., Рапопорт О.Л., Голдовская А.А.* Применение метода конечных разностей для определения распределения температуры в изоляции тяговых электрических машин // Ж. Электроника и электрооборудование транспорта. 2013. № 6. С. 29.
9. *Beyerleyn E.V., Tyuteva P.V.* Energy efficiency of back-to-back method for induction traction motors testing // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM Sep. "2014 IEEE 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2014 – Proceedings" 2014. P. 359.
10. *Дорохина Е.С., Хорошко А.А.* Система мониторинга теплового состояния тяговых электродвигателей // Материалы XVIII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 2012. С. 379.