

УДК.621.515

Анализ эффективности систем охлаждения тяговых асинхронных двигателей и мотор-генераторов

М.С. Драгомиров, С.А. Журавлев, А.М. Зайцев
Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения (НИПТИЭМ), г. Владимир, Российская Федерация
E-mail: main@nptiem.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Способ охлаждения электрической машины и его эффективность во многом определяют допустимый уровень использования активных материалов и достижимый уровень форсирования удельных показателей мощности и крутящего момента, с одной стороны, а с другой стороны, надежность и долговечность. В настоящий момент имеется несколько методик расчета теплового состояния электрических машин, учитывающих особенности уже выбранного способа охлаждения. Однако на практике на этапе проектирования зачастую встает вопрос о выборе рационального способа охлаждения тяговых электрических машин исходя из условий эксплуатации и режимов нагружения. Это обуславливает актуальность и практическую значимость создания инструмента для выбора конструкции системы охлаждения и первичной оценки ожидаемого уровня превышения температуры обмотки статора.

Материалы и методы: Оценка эффективности систем охлаждения проведена на основе имеющихся экспериментальных данных, полученных при испытаниях тяговых электрических машин в Испытательном центре ПАО «НИПТИЭМ». Введен единый критерий эффективности систем охлаждения разных конструкций, позволяющий проводить количественную оценку ожидаемого уровня перегрева.

Результаты: Систематизированы и подробно рассмотрены системы охлаждения тяговых электрических машин. Сформулированы их преимущества и недостатки. Приведен интегральный показатель эффективности системы охлаждения для каждой из рассмотренных систем охлаждения.

Выводы: Проведенный анализ систем охлаждения тяговых электрических машин базируется на реально выполненных разработках и их экспериментальных исследованиях в части теплового состояния и имеет практическую значимость для разработчиков электрических машин при выборе системы охлаждения на этапе проектирования. Приведенный интегральный показатель эффективности системы охлаждения позволяет сгруппировать все системы охлаждения по определенным уровням их эффективности.

Ключевые слова: система охлаждения электрических машин, показатель эффективности охлаждения, тяговый асинхронный двигатель, конструкция системы охлаждения, машинная постоянная, коэффициент использования объема, перегрев обмотки, воздушное охлаждение, жидкостное охлаждение, непосредственное внутреннее масляное охлаждение.

Analysis of cooling systems efficiency of traction induction motors and motor-generators

M.S. Dragomirov, S.A. Zhuravlyov, A.M. Zaitsev
Scientific Design and Technology Institute of Electric Machine Building (NIPTIEM), Vladimir, Russian Federation
E-mail: main@nptiem.ru

Abstract

Background: The way of cooling of the electrical machines and its efficiency in many respects determine the valid level of using of active materials and achievable boosting level of specific indicators of power and a torque on the one hand, and on the other hand, reliability and durability. At the moment there are some methods of calculation of a thermal condition of the electrical machines considering features of already chosen way of cooling. In real-life conditions, the design stage often involves choosing the method of cooling traction electric machines depending on their operating and loading modes, which makes it necessary to develop a tool for choosing the construction of the cooling system and primary estimation of the expected stator winding temperature growth.

Materials and Methods: The assessment of cooling systems efficiency was carried out on the basis of available experimental data obtained by experimental tests of electric traction machines at the Test Center of OAO NIPTIEM. A uniform criterion has been introduced for efficiency assessment of cooling systems of different designs enabling the estimation of the expected overheating level.

Results: Different cooling systems of electric traction machines have been systematized and studied in detail. Their advantages and shortcomings have been formulated. An integral criterion has been suggested for estimating the efficiency of cooling systems for each of the considered cooling systems.

Conclusions: The analysis of cooling systems of electric traction machines is based on real design projects and the experimental tests of their thermal status and is of practical value to engineers. The given integral criterion of efficiency of cooling system allows to group all cooling systems in certain levels of their efficiency.

Key words: cooling system of electric machines, criterion of cooling efficiency, traction induction motor, construction of a cooling system, machine constant, volume efficiency, winding overheat, air cooling, liquid cooling, direct internal oil cooling.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.039-043

Основными требованиями, предъявляемыми к тяговым электрическим машинам (ЭМ) для транспортных средств, являются высокие удельные показатели мощности и крутящего момента на единицу массы и/или объема ЭМ. Достичь этого возможно только с применением систем охлаждения, обеспечивающих интенсивный отвод тепловых потерь из ЭМ.

В табл. 1 приведена классификация применяемых в ПАО «НИПТИЭМ» систем охлаждения на тяговых ЭМ.

Таблица 1. Основные типы систем охлаждения, применяемые ПАО «НИПТИЭМ» в проводимых разработках тяговых асинхронных электрических машин

Описание системы охлаждения	Тип охлаждения по ГОСТ МЭК 60034-6-2012	Степень защиты по ГОСТ 14254-96
Защищенная машина с вентилятором на валу	IC01	IP2X
Защищенная машина с независимой вентиляцией и повышенным давлением воздуха внутри машины	IC06	IP2X IP5X
Закрытая машина с жидкостной рубашкой охлаждения	IC51W	IP5X
Закрытая машина с жидкостной рубашкой охлаждения + проточная вентиляция внутреннего пространства машины	IC55W	IP2X IP5X
Закрытая машина с жидкостным (масляным) охлаждением статора и ротора	IC3W7	IP5X

Приведенные в табл. 1 типы систем охлаждения обладают разной эффективностью и отличаются стоимостью реализации в конкретной ЭМ, поэтому на этапе проектирования ЭМ необходимо обосновывать применение тех или иных конструктивных решений с учетом их преимуществ и недостатков. Критериями эффективности системы охлаждения электрических машин могут служить различные величины и комплексы. Так, например, известен так называемый коэффициент использования, или постоянная Эссона [1–3], который определяет мощность электрической машины в заданном объеме:

$$C_3 = \frac{S}{D^2 L_{\text{ст}} n} \cdot 10^6,$$

где S – полная мощность, кВ·А; $L_{\text{ст}}$ – длина статора, см; D – внутренний диаметр статора, см; n – частота вращения вала, об/мин.

Указанная постоянная в наиболее общем виде определяет степень соответствия примененной системы охлаждения ее целевому назна-

чению. Однако она не учитывает степень совершенства электрической машины по КПД и не имеет связь с допустимым перегревом обмотки ЭМ в зависимости от класса нагревостойкости используемых материалов.

Для исключения указанных недостатков при сравнительной оценке эффективности систем охлаждения можно ввести иной интегральный показатель эффективности охлаждения $k_{\text{эфф}}$, равный отношению суммарных тепловых потерь ΣP_t , отводимых в систему охлаждения, к объему $Q_{\text{ст}}$, занимаемому сердечником статора ЭМ, на каждый градус разницы температуры обмотки ЭМ и температуры теплоносителя системы охлаждения (перегрев обмотки $\Delta T_{\text{обм}}$):

$$k_{\text{эфф}} = \frac{\Sigma P_t}{Q_{\text{ст}} \Delta T_{\text{обм}}} = \frac{4 \Sigma P_t}{\pi D_{\text{ст}}^2 L_{\text{ст}} \Delta T_{\text{обм}}}, \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \right],$$

где $D_{\text{ст}}$ – внешний диаметр статора, м; $L_{\text{ст}}$ – длина статора, м.

Рассмотрим реализацию каждого типа систем охлаждения в разработках ПАО «НИПТИЭМ» с указанием достигнутых показателей эффективности охлаждения, а также имеющихся преимуществ и недостатков.

Примером тяговой асинхронной защищенной ЭМ с вентилятором на валу, реализующей способ охлаждения IC01, может служить двигатель ТАДВМ280-4У2, предназначенный для привода вагонов метрополитена серии 81-760/761. В конструкции этого двигателя, защищенной патентом РФ [4], применена симметричная радиальная воздушная вентиляция с помощью лопаток, размещенных на короткозамыкающих кольцах ротора. Воздух входит через отверстия в подшипниковых щитах с обеих сторон, охлаждает торцевые поверхности ротора и, омывая лобовые части обмотки и частично поверхность статора, выходит через отверстия в станине. Основными преимуществами такой системы охлаждения являются ее простота, высокая надежность и низкая стоимость. Еще одной конструктивной реализацией такого способа охлаждения является проточная вентиляция через каналы в роторе и/или в статоре с помощью внутреннего вентилятора, установленного на валу с одной стороны между ротором и подшипниковым узлом. При этом воздух входит через отверстия в подшипниковом щите с одной стороны, охлаждает обмотку статора и ротор и выходит радиально с другой стороны через отверстия в станине или подшипниковом щите. Недостатком такой реализации является применение вентилятора, как правило, большого диаметра, что приводит к увеличению общего уровня шума двигателя и снижению его КПД. Существенными минусами описанного способа охлаждения IC01 являются:

– необходимость в защите или очистке воздуха от пыли и влаги, проникающей внутрь ЭМ, для повышения надежности обмотки;

– зависимость расхода воздуха от частоты вращения ротора ЭМ, что может приводить к перегреву ЭМ на режимах работы с низкой скоростью и большим моментом.

В зависимости от конструктивной реализации при таких схемах охлаждения можно достичь значений показателя эффективности охлаждения $k_{эфф} = 2000-3000$ (Вт/(м³·К)).

Примером тяговой асинхронной ЭМ с применением независимой вентиляции (IC06) может служить разработка двигателя ТАД225-380 и мотор-генератора ТАГ225-280 для привода гибридного городского автобуса ЛиАЗ-5292Х [5, 7]. Воздух также проходит через каналы в статоре и/или роторе, только поступает он от внешнего вентилятора, установленного вне ЭМ. Во-первых, это позволяет облегчить очистку воздуха от пыли и влаги, повысить давление воздуха внутри ЭМ, что дополнительно защищает ЭМ, а во-вторых, дает возможность эффективно охлаждать двигатель независимо от частоты вращения ротора. Этот способ также обеспечивает достижение $k_{эфф} = 2000-3000$ (Вт/(м³·К)), однако следует учитывать возможность повышения аэродинамического шума от внешнего вентилятора и воздуховодов.

Несколько разработок ПАО «НИПТИЭМ» выполнены с применением жидкостного охлаждения. Так, например, тяговый асинхронный двигатель ТАД200-260 и асинхронный мотор-генератор ТАГ280-140, входящие в комплект тягового электрооборудования для привода гусеничного трактора «Беларус-1502» мощностью 160 л.с., имеют жидкостную рубашку охлаждения, расположенную в станине ЭМ (IC51W). Охлаждающая жидкость – Тосол марки А40 с максимальной температурой на входе в рубашку охлаждения +60 °С. Также в системе охлаждения имеется замкнутый воздушный контур: внутренний воздух в ЭМ с помощью внутреннего вентилятора на валу направляется через каналы в роторе и возвращается через полости над статором, осуществляя теплообмен с жидкостной рубашкой охлаждения. Такая система охлаждения имеет как очевидные плюсы (высокую степень защиты оболочки, низкий уровень шума), так и минусы: сложность конструкции и технологии изготовления станины, наличие внешнего контура охлаждения (насос, радиатор, соединяющие патрубки) и несколько меньшую эффективность, так как основной теплоноситель – Тосол – не контактирует непосредственно с тепловыделяющими элементами ЭМ (обмоткой статора, обмоткой ротора, железом статора). Этим определяется невысокий показатель эффективности охлаждения $k_{эфф} = 1000-2500$ (Вт/(м³·К)). Большие значения данного показателя имеют конструкции с большей длиной сердечника статора относительно его диаметра, что обусловлено лучшей

теплоотдачей от статора в рубашку охлаждения. Стоимость же ЭМ с описанной системой охлаждения значительно возрастает, что ограничивает их широкое распространение.

Повысить эффективность указанной системы охлаждения можно за счет применения точной воздушной вентиляции (IC55W). Предварительно очищенный воздух из окружающей среды с помощью встроенного или внешнего вентилятора проходит через каналы в роторе и/или статоре, непосредственно охлаждая лобовые части обмотки статора, ротор и частично сердечник статорный, дополнительно к жидкостной рубашке охлаждения в станине. Такое решение позволяет повысить показатель эффективности охлаждения до $k_{эфф} = 2500-3500$ (Вт/(м³·К)). Примером использования подобной системы может служить комплект ЭМ, разработанный в ПАО «НИПТИЭМ» для привода колесного высоконагруженного трактора «Беларус-3023» мощностью 300 л.с. – асинхронный мотор-генератор ТАГМ280-310 и тяговый асинхронный двигатель ТАДМ280-310 [6].

Последний из рассматриваемых вариантов конфигураций системы охлаждения – непосредственное внутреннее масляное охлаждение сердечника статора, обмотки статора и ротора (IC3W7). Система является наиболее сложной, однако при этом и наиболее эффективной: достижимый уровень значений показателя эффективности охлаждения – $k_{эфф} = 4000-5000$ (Вт/(м³·К)) и более. Схематично данная система охлаждения показана на рисунке.

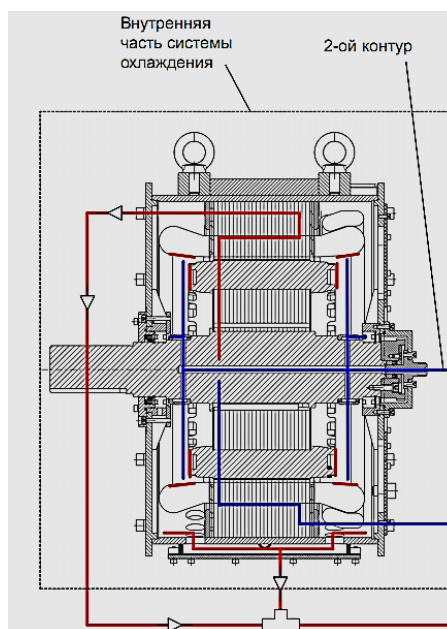


Схема внутренних контуров непосредственного масляного охлаждения ЭМ

Система охлаждения состоит из двух контуров, работающих параллельно:

1) контур охлаждения сердечника статорного: масло проходит через каналы, выполненные непосредственно в железе статора;

2) контур охлаждения ротора и лобовых частей обмотки: масло подается в полый вал ЭМ, откуда через специальные форсунки под действием давления и центробежной силы разбрызгивается на лобовые части обмотки и подшипники.

Благодаря интенсивному смазыванию подшипников качения обеспечиваются низкие механические потери, хороший отвод тепла и большой срок службы подшипников.

Кроме элементов, представленных на схеме, в состав системы охлаждения входят также масляный насос, фильтр, воздушно-масляный теплообменник, регулирующие вентили и расширительный бачок. Рабочая жидкость (теплоноситель) – трансформаторное масло Т-1500.

Подобная схема охлаждения реализована в ПАО «НИПТИЭМ» на тяговом асинхронном двигателе ТАДСМ315-150, являющемся составной частью мотор-колеса трактора «Кировец-9450» мощностью 455 л.с. При расчетной номинальной мощности тягового двигателя 65 кВт применение описанной системы охлаждения позволило обеспечить длительную мощность 114 кВт в режиме S1 на той же частоте вращения вала двигателя.

Следует отметить, что, регулируя соотношение расхода масла через контур статора и контур вала, можно найти оптимальное распределение теплоносителя с учетом конструкции конкретной ЭМ и ее режимов работы. Эффективность описанной системы охлаждения повышается с уменьшением длины пакета статора и повышением рабочей частоты вращения.

Подводя итог, можно представить данные по эффективности систем охлаждения, их преимуществам и недостаткам в сводной таблице, которая будет иметь практический интерес для разработчиков ЭМ (табл. 2). Анализ данных табл. 2 показывает, что рассмотренные выше различные варианты организации систем охлаждения обладают преимуществами и недостатками, которые определяют целесообразность их применения в каждом конкретном случае. Используемый показатель эффективности охлаждения $k_{эфф}$ позволяет на этапе проектирования оценить ожидаемую эффективность и в первом приближении определить превышение температуры обмотки статора.

Таблица 2. Преимущества и недостатки различных систем охлаждения, применяемых ПАО «НИПТИЭМ» на тяговых электрических машинах

Описание системы охлаждения	Достижимый уровень $k_{эфф}$, Вт/(м ³ ·К)	Относительные преимущества	Относительные недостатки
Защищенная машина с вентилятором на валу (IC01)	2000–3000	– невысокая стоимость	– степень защиты IP23 – повышенный уровень шума – зависимость интенсивности охлаждения от режима работы двигателя
Защищенная машина с независимой вентиляцией и повышенным давлением воздуха внутри машины (IC06)	2000–3000	– невысокая стоимость – независимость интенсивности охлаждения от режима работы двигателя	– повышенный уровень шума
Закрытая машина с жидкостной рубашкой охлаждения (IC51W)	1000–2500	– степень защиты IP54 и выше – низкий уровень шума – независимость интенсивности охлаждения от режима работы двигателя	– высокая стоимость – необходимость применения радиатора и насоса – невысокая эффективность
Закрытая машина с жидкостной рубашкой охлаждения + проточная вентиляция внутреннего пространства машины (IC55W)	2500–3500	– высокая эффективность – независимость интенсивности охлаждения от режима работы двигателя	– высокая стоимость – необходимость применения радиатора и насоса
Закрытая машина с жидкостным (масляным) охлаждением статора и ротора (IC3W7)	4000–5000	– степень защиты IP54 и выше – низкий уровень шума – очень высокая эффективность – независимость интенсивности охлаждения от режима работы двигателя	– высокая стоимость – необходимость применения радиатора и насоса

Список литературы

1. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах: учеб. пособие. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
2. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
3. Методы исследования и анализ теплоотдачи асинхронных двигателей / Я.Б. Тубис, М.С. Фанарь, В.М. Новинская, Л.М. Зезюлина; Всесоюзный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований в электротехнике. – М., 1981. – 48 с.
4. Пат. №109933 Российская Федерация МПК H02K 9/06, H02K 5/20. Защищенная электрическая машина / А.В. Гловацкий, Л.В. Горелик, М.С. Драгомиров, С.А. Журавлев, А.М. Зайцев,

В.В. Лопатин, Л.В. Макаров, В.Г. Машкин, О.В. Кругликов; опублик. 27.10.2011, Бюл. №30.

5. Гибридное будущее российского автотранспорта. Специальные электрические машины для энергоэффективных транспортных силовых установок / М.С. Драгомиров, С.А. Журавлев, А.М. Зайцев, О.В. Кругликов // Конструктор-машиностроитель. – 2011. – № 1. – С. 32–33.

6. Разработка и исследование энергоэффективных тяговых электрических машин для перспективных транспортных силовых установок / Ю.Б. Казаков, И.А. Палилов, С.В. Пискунов и др. // Материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. г. Севастополь, 23–27 сентября 2013 г. – Севастополь, 2013.

7. Городской маршрутный автобус ЛИА3 5292XX с комбинированной энергоустановкой. Ч. II. Стендовые испыта-

ния комплекта тягово-энергетического оборудования автобуса ЛИАЗ 529XX / Д.Б. Изосимов, С.В. Журавлев, С.В. Байда, А.А. Белоусов // Электротехника. – 2009. – № 8. – С. 2–7.

References

1. Filippov, I.F. *Teploobmen v elektricheskikh mashinakh* [Heat transfer in electric machines]. Leningrad, Energoatomizdat, 1986. 256 p.
2. Borisenko, A.I., Kostikov, O.N., Yakovlev, A.I. *Okhlazhdenie promyshlennykh elektricheskikh mashin* [Cooling of industrial electric machinery]. Moscow, Energoatomizdat, 1983. 296 p.
3. Tubis, Ya.B., Fanar', M.S., Novinskaya, V.M., Zezyulina, L.M. *Metody issledovaniya i analiz teplootdachi asinkhronnykh dvigateley* [Methods of study and analysis of heat induction motors]. Moscow, 1981. 48 p.
4. Glovatskiy, A.V., Gorelik, L.V., Dragomirov, M.S., Zhuravlev, S.A., Zaytsev, A.M., Lopatin, V.V., Makarov, L.V., Mashkin, V.G., Kruglikov, O.V. *Zashchishchennaya elektricheskaya mashina* [Protected electric machines]. Patent RF, no. 109933, 2011.
5. Dragomirov, M.S., Zhuravlev, S.A., Zaytsev, A.M., Kruglikov, O.V. *Gibridnoe budushchee rossiyskogo avtotranspor-*

ta. Spetsial'nye elektricheskie mashiny dlya energoeffektivnykh transportnykh silovykh ustanovok [Hybrid future of the Russian automobile transport. Special electric machines for energy-efficient transport power units]. *Konstruktor-mashinostroitel'*, 2011, no. 1, pp. 32–33.

6. Kazakov, Yu.B., Palilov, I.A., Piskunov, S.V. *Razrabotka i issledovanie energoeffektivnykh tyagovykh elektricheskikh mashin dlya perspektivnykh transportnykh silovykh ustanovok* [Development and study of energy-efficient traction electric machines for future transport power plants]. *Materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the XII International scientific and technical conference]. Sevastopol', 2013.

7. Izosimov, D.B., Zhuravlev, S.V., Bayda, S.V., Belousov, A.A. *Gorodskoy marshrutnyy avtobus LIAZ 5292KhKh s kombinirovannoy energoustanovkoy. Chast' II. Stendovye ispytaniya kompleksa tyagovo-energeticheskogo oborudovaniya avtobusa LIAZ 529KhKh* [City public bus LIAZ 5292XX with a combined power plant. Part II. Bench tests of the traction power equipment complex of LIAZ 529XX bus]. *Elektrotehnika*, 2009, no. 8, pp. 2–7.

Драгомиров Михаил Сергеевич,

ПАО «НИПТИЭМ»,

кандидат технических наук, ведущий специалист по научным исследованиям и опытно-конструкторским работам,

научный сотрудник,

телефон (4922) 33-13-37,

e-mail: dragomirov@ec.vemp.ru

Журавлев Сергей Александрович,

ПАО «НИПТИЭМ»,

кандидат технических наук, начальник конструкторского бюро перспективных разработок и исследований,

телефон (4922) 33-13-37,

e-mail: zhuravlevsa@ec.vemp.ru

Зайцев Андрей Михайлович,

ПАО «НИПТИЭМ»,

главный конструктор общепромышленных серий и регулируемых двигателей, начальник конструкторско-

исследовательского отдела,

телефон (4922) 33-13-37,

e-mail: zaitsevam@ec.vemp.ru