

УДК.621.515

Опыт улучшения теплового состояния специальных высоконагруженных тяговых электрических машин

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: В условиях ограниченного объема месторасположения в составе комплекта тягового электрооборудования на тракторе одним из важных факторов работоспособности тягового электропривода является создание высокоэффективной системы охлаждения тяговых электрических машин, обеспечивающей требуемое тепловое состояние обмотки, подшипников и датчиков положения ротора.

Материалы и методы: Экспериментальные исследования проведены на опытных образцах тяговых электрических машин на базе специально разработанного стенда, имитирующего тепловые условия в составе трактора, в лаборатории Испытательного центра ОАО НИПТИЭМ.

Результаты: Предложена комбинированная система охлаждения тяговых электрических машин – жидкостное охлаждение пакета статора и лобовых частей обмотки статора и воздушное охлаждение ротора и лобовых частей обмотки статора. Экспериментально подтверждена эффективность данной системы охлаждения.

Выводы: Созданная оригинальная система охлаждения высоконагруженных тяговых электрических машин легла в основу рекомендаций по проектированию замкнутых комбинированных систем охлаждения.

Ключевые слова: комбинированная система охлаждения, экспериментальное исследование, охлаждение лобовых частей обмотки статора.

Experience of improving thermal status of special high-load traction electric motors

M.S. Dragomirov, S.A. Zhuravlev, A.M. Zaitsev

Research Design and Technology Institute of Electrical Engineering (NIPTIEM), Vladimir, Russian Federation
E-mail: main@nptiem.ru

Abstract

Background: Since the space within the traction electric equipment unit of a tractor is limited, one of the important factors of operability of the electric traction drive is a highly effective cooling system which ensures the required thermal state of the winding, bearings and rotor position sensors.

Materials and Methods: The experimental studies were conducted on prototypes of electric traction machines based on a specially designed test bench which simulates tractor thermal conditions, in the laboratory of the Test Center of the Research Design and Technology Institute of Electrical Engineering (NIPTIEM).

Results: A combined cooling system of electric traction machines has been developed including liquid cooling of the stator pack and stator winding end parts and air cooling of the rotor and stator winding end parts. The efficiency of this cooling system was confirmed experimentally.

Conclusions: Recommendations were made on the design of closed combined cooling systems based on the developed original cooling system of high-load electric traction machines.

Key words: combined cooling system, experimental study, cooling of stator winding end parts.

ОАО «НИПТИЭМ» в течение десяти лет проводит научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области создания специальных электрических машин (ЭМ) для тягового привода перспективных транспортных средств – энергонасыщенных тракторов с электромеханической трансмиссией и маршрутных городских автобусов с гибридными силовыми установками. Основное требование, определяющее сложность подобных разработок, – высокие удельные показатели, а также малые габариты и вес, обусловленные компоновочными решениями на транспортных средствах. Достижение указанных требований возможно только с применением эффективных систем охлаждения, обеспечивающих длительную работу ЭМ при их интенсивной экс-

плуатации [1]. В разное время этой проблемой занимались ведущие научные школы нашей страны [2, 3].

Рассмотрим вариант решения поставленной задачи на примере разработки комплекта тяговых электрических машин для электромеханической трансмиссии трактора «Беларус-3023» мощностью 300 л.с., состоящего из асинхронного мотор-генератора ТАГМ280-310 и тягового асинхронного двигателя ТАДМ280-310, расположенных соосно друг за другом внутри несущих корпусных деталей трактора (рис. 1) [4].

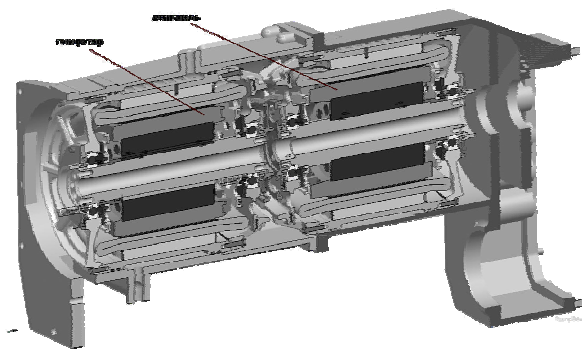


Рис. 1. Общая схема компоновки электрических машин в корпусе трактора «Беларус-3023»

Вал генератора соединен с валом дизеля. Вал тягового электродвигателя соединен с входным валом двухдиапазонной коробки передач (рабочий и транспортный диапазоны). Наружная поверхность станины каждой ЭМ имеет радиальное кольцевое оребрение и вместе с внутренней частью корпуса трактора образует рубашку охлаждения, в которой циркулирует охлаждающая жидкость (ОЖ). Охлаждающий воздух подается внутрь электрических машин через окно в корпусе трактора, расположенное между двигателем и генератором в центральном отсеке, и проходит через вентиляционные отверстия в роторе. Таким образом, используемая система охлаждения является комбинированной: водяная рубашка – снаружи, над пакетом статора, воздушный контур – внутри ЭМ.

Основные параметры и показатели электрических машин электромеханической трансмиссии трактора приведены в табл. 1.

Для решения задачи интенсификации охлаждения электрических машин рассматривалось несколько вариантов организации воздушного контура охлаждения и охлаждения обмотки статора:

1) *замкнутая воздушная система*: воздух, выходящий из крайних отсеков генератора и двигателя, направляется в центральный отсек (движение воздуха обеспечивается внутренними вентиляторами, установленными на крайних концах валов обеих ЭМ);

2) *разомкнутая воздушная система*: воздух входит из атмосферы в центральный отсек и выходит из крайних отсеков обеих ЭМ (движение воздуха обеспечивается внутренними вентиляторами, установленными на крайних концах валов обеих ЭМ);

3) *разомкнутая воздушная система*: воздух входит из атмосферы в центральный отсек и выходит из крайних отсеков обеих ЭМ (нагнетается принудительно внешним вентилятором в центральный отсек);

4) *замкнутая воздушная система* – аналогична варианту 1, но на лобовых частях обмотки статора установлены трубчатые теплообменники, в которые поступает ОЖ.

Таблица 1. Основные параметры и показатели электрических машин для электромеханической трансмиссии трактора «Беларус-3023»

Наименование	Ед. изм.	Мотор-генератор ТАГМ280-310	Тяговый двигатель ТАДМ280-310
Номинальная мощность	кВт	220	182
Номинальный крутящий момент	Н·м	1200	
Номинальная частота вращения	мин ⁻¹	1751	1442
Диапазон рабочих частот вращения		800–2200	0–3600
Номинальный КПД (без ПЧ)	%	95	
Класс изоляции	–	H	
Масса	кг	650	
Габаритные размеры (длина × наружный диаметр оболочки)	мм	630×Ø555	
Диаметр пакета активного железа		490	
Длина пакета активного железа		310	

Испытание ЭМ по отдельности показало, что пренебрежение условиями размещения ЭМ в составе конечного изделия (трактора) является недопустимым, так как приводит к неадекватной оценке теплового состояния ЭМ. Поэтому окончательные тепловые испытания и исследование эффективности каждого из перечисленных вариантов конфигурации системы охлаждения проводились на специально созданном стенде (рис. 2). Электрические машины были установлены в испытательные оболочки, которые формировали водяную рубашку охлаждения. Воздушные отсеки были выполнены с помощью теплоизолированных коробов.

Генератор приводился от асинхронного двигателя, который имитировал первичный источник энергии – дизель. В качестве нагрузочного устройства также использовался асинхронный двигатель. Между испытуемыми двигателями и гонной ЭМ, с одной стороны, и нагрузочной ЭМ, с другой стороны, были установлены датчики момента и частоты вращения.

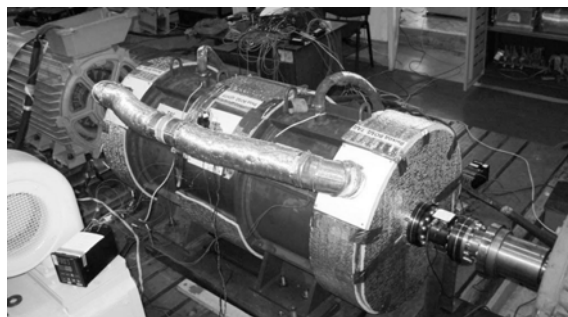


Рис. 2. Внешний вид экспериментального стенда для проведения тепловых испытаний ЭМ в условиях их компоновки на тракторе

Созданный стенд был оснащен необходимым измерительным оборудованием [5] и позволял регистрировать следующие параметры испытуемых ЭМ:

- 1) механические параметры:
 - частота вращения ЭМ, об/мин;
 - крутящий момент на валах ЭМ, Н·м;
- 2) электрические параметры:
 - ток, А;
 - напряжение питания, В;
 - частота питания, Гц;
 - скольжение, %;
 - электрическая мощность, Вт;
 - среднеквадратичное значение тока (при питании от ПЧ), А;
 - первая гармоника тока (при питании от ПЧ), А;
 - коэффициент первой гармоники (при питании от ПЧ);
- 3) тепловые параметры (всего 13 температур):
 - температура ОЖ на входе и выходе из рубашек охлаждения, °С (на входе в рубашку охлаждения температура стабилизировалась на уровне 65 °С в соответствии с требованиями ТЗ);
 - температура воздуха на выходе из крайних отсеков и на входе в центральный отсек блока электрических машин (БЭМ), °С;
 - температура всех подшипников, °С;
 - температура лобовых частей обеих ЭМ в центральном отсеке, °С;
 - расход ОЖ, л/мин (расход регулировался и устанавливался равным 30 л/мин на каждую ЭМ);
 - расход воздуха на входе в центральный отсек, т.е. общий расход воздуха для БЭМ, кг/ч.

В качестве датчиков температуры использовались термометры сопротивления ТСР-100 в комплекте с измерителем ТРМ-138. Расход воздуха измерялся термоанемометрическим расходомером Bosch HFM5-4.7. Расход ОЖ определялся по показаниям водяных счетчиков СГВ-20.

Испытания блока электрических машин (БЭМ) с первым вариантом организации системы охлаждения показали, что встроенные вентиляторы имеют крайне низкую производительность, что обусловлено плотной компоновкой ЭМ и отсутствием пространства для размещения высокопроизводительного вентилятора, имеющего качественную проточную часть. Температура воздуха внутри ЭМ превышает 130 °С, температура подшипников превышает 160 °С. Обмотка электрических машин имела изоляцию класса «Н», т.е. допускала рабочую температуру 180 °С, однако при продолжении эксперимента до установившегося теплового состояния, вероятнее всего, это значение было бы также превышено. Кроме того, в центральном отсеке БЭМ установлены датчики частоты вращения мотор-генератора и тягового электродвигателя, которые имеют ограничение по максимальной рабочей температуре 120 °С. Полученные данные (табл. 2) позволили сделать вывод о принципиальной не-

целесообразности использования самовентиляции и замкнутого воздушного контура охлаждения в данных условиях компоновки ЭМ.

Исходя из этого, следующий этап исследований был посвящен оценке эффективности принудительной проточной вентиляции БЭМ, которая была организована путем установки на вход в центральный отсек внешнего вентилятора, подающего воздух из окружающей атмосферы. Выход воздуха осуществлялся также в атмосферу через крайние отсеки БЭМ. Это позволило поднять общий расход воздуха через БЭМ более чем в 10 раз, добиться установившегося теплового режима ЭМ и обеспечить существенное снижение рабочих температур обмотки и подшипников. Сравнительный анализ полученных результатов приведен в табл. 2.

Несмотря на удовлетворительный результат, достигнутый с открытой системой вентиляции, исследования были продолжены, так как основной задачей проектирования системы охлаждения ЭМ было получение эффективной замкнутой системы охлаждения без внешнего подвода теплоносителя. После проработки нескольких конструктивных решений и их анализа было установлено, что радикальным способом улучшения теплового состояния БЭМ является непосредственное охлаждение обмотки статора. Существующую конструкцию системы охлаждения ЭМ можно улучшить путем установки теплообменников на лобовые части обмотки статоров. Принципиальная схема такого варианта охлаждения представлена на рис. 3.

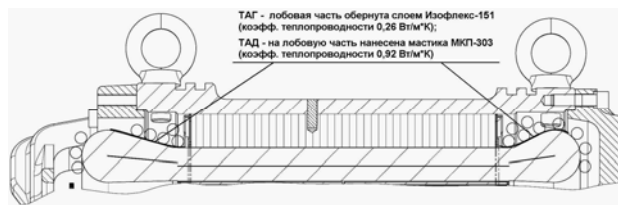


Рис. 3. Эскиз установки медных трубчатых теплообменников на лобовые части обмотки статора ЭМ

Теплообменники на лобовых частях были выполнены из медной трубки Ø12×1 мм. На каждой лобовой части было выполнено по 6–7 полных витков медной трубки. Подвод и отвод ОЖ осуществлялся через отверстия для вентиляции в подшипниковых щитах. Все четыре получившихся теплообменника в БЭМ были подключены параллельно основным рубашкам охлаждения. Суммарный расход ОЖ на все четыре теплообменника на лобовых частях устанавливался равным 60 л/мин.

Движение воздуха внутри ЭМ в этом варианте организации системы охлаждения обеспечивалось самовентиляцией по замкнутой схеме.

Результаты, полученные в ходе экспериментальной проверки предложенного способа охлаждения ЭМ, приведены в табл. 2. Их анализ показывает, что, в сравнении с приточной вентиляцией, произошло перераспределение отводимых потерь: 1/4 потерь, которые отводились при-

Таблица 2. Основные результаты экспериментального исследования эффективности различных вариантов системы охлаждения тяговых электрических машин для электромеханической трансмиссии трактора «Беларус-3023»

Режимные параметры и показания датчиков	Варианты организации системы охлаждения электрических машин					
	Замкнутая самовентиляция		Принудительная приточная вентиляция		С трубками на лобовых частях, замкнутая самовентиляция	
	ТАГ	ТАД	ТАГ	ТАД	ТАГ	ТАД
Частота вращения, об/мин	1732	1703	1732	1703	1732	1704
Момент, Н·м	–1175	1043	–1181	1048	–1173	1040
Частота питания, Гц	85,86		85,86		85,86	
Напряжение, В	516		514		521	
Ток, А	257,0	246,0	255,8	246,2	251,0	241,5
Мощность подводимая (-отдаваемая), кВт	–203,0	196,8	–202,0	196,5	–200,5	194,7
Скольжение, %	–0,91	0,86	–0,92	0,84	–0,94	0,82
Длительность эксперимента, ч	2,0 (без установившегося теплового режима)		4,0 (установившийся тепловой режим)		4,0 (установившийся тепловой режим)	
Средняя температура обмотки статора, °С	> 155	> 135	150	128	140	115
Температура лобовой части в центральном отсеке, °С	> 165	> 165	143	145	160	150
Температура подшипников в центральном отсеке, °С	> 160		110	100	131	116
Температура подшипников крайнем отсеке, °С	–	–	140	130	157	106
Температура воздуха на выходе из крайних отсеков, °С	> 130		140	130	130	100
Температура воздуха на входе в центральный отсек, °С	> 120		50		80	
Расход воздуха (суммарно), кг/ч	40,4 (самовентиляция)		480 (принудительно)		35,5 (самовентиляция)	
Тепловая мощность, отводимая рубашками охлаждения (суммарно), кВт	14,3		12,1		14,6	
Тепловая мощность, отводимая трубками на лобовых частях (суммарно), кВт	–		–		7,2	
Тепловая мощность, отводимая воздухом (суммарно), кВт	0,1		10,0		0,3	

принудительной вентиляцией, стала отводиться основной рубашкой охлаждения, 3/4 потерь – теплообменниками на лобовых частях. Кроме того, ухудшилось охлаждение подшипниковых узлов, что привело к возрастанию их температуры на 15–20 °С. Несмотря на то, что температура воздуха в центральном отсеке повысилась на 30 °С, она оказалась ниже, чем ограничение, накладываемое датчиками частоты вращения. В целом, в тепловом отношении вариант с охладителями на лобовых частях незначительно уступает варианту с принудительной приточной вентиляцией и может быть принят для реализации в случае невозможности организации приточной вентиляции. Проведенное исследование показало, что при проектировании электрических машин для гибридных и электромеханических силовых установок транспортных средств необходимо уделять повышенное внимание эффективности системы охлаждения с учетом условий размещения электрических машин на конечном изделии. При этом важным параметром является не только рабочая

температура обмотки, но и температура воздуха внутри электрических машин или внутри блока электрических машин, так как она лимитирована установленными датчиками частоты вращения. Наилучшим вариантом организации системы охлаждения является жидкостное охлаждение пакета статора и воздушное охлаждение лобовых частей и ротора проточным воздухом из атмосферы. Однако в данном случае необходимо обеспечивать соответствующую подготовку воздуха – очистку до уровня концентрации пыли не более 1,5–2,0 мг/м³, что не всегда приемлемо. Поэтому был предложен альтернативный способ охлаждения – использование теплообменников, установленных на лобовых частях обмотки статора. В ходе выполнения работ была экспериментально подтверждена его эффективность.

Список литературы

1. Gianfranco Pistoia Electric and Hybrid Vehicles. – Amsterdam: Elsevier, 2010. – 645 p.

2. **Филиппов И.Ф.** Основы теплообмена в электрических машинах. – Л.: Энергия, 1974. – 384 с.
3. **Борисенко А.И., Данько В.Г., Яковлев А.И.** Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.
4. **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-машинистроитель. – 2011. – № 1. – С. 32–33.
5. **Родионов Р.В.** Управление энергетическими потоками при испытаниях тяговых электрических машин // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: сб. науч. тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – С. 266–271.

References

1. Gianfranco Pistoia Electric and Hybrid Vehicles. Amsterdam, Elsevier, 2010. 645 p.

2. Filippov, I.F. *Osnovy teploobmena v elektricheskikh mashinakh* [Heat exchange basis in electrical machines]. Leningrad, Energiya, 1974. 384 p.
3. Borisenko, A.I., Dan'ko, V.G., Yakovlev, A.I. *Aerodinamika i teploperedacha v elektricheskikh mashinakh* [Aerodynamics and heat transfer in electrical machines]. Moscow, Energiya, 1974. 560 p.
4. Dragomirov, M.S., Zhuravlev, S.A., Zaytsev, A.M., Kругликов, О.В. *Gibridnoe budushchee rossiyskogo avtotransporta. Spetsial'nye elektricheskie mashiny dlya energoefektivnykh transportnykh silovykh ustanovok* [Hybrid future of the Russian motor transport. Special electrical machines for effective transport power plants]. *Konstruktor-mashinostroitel'*, 2011, no. 1, pp. 32–33.
5. Rodionov, R.V. *Upravlenie energeticheskimi potokami pri ispytaniyakh tyagovykh elektricheskikh mashin* [Control of energy flows in electric traction machines tests]. *Sbornik nauchnykh trudov IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektromekhanicheskie i elektromagnitnye preobrazovateli energii i upravlyaemye elektromekhanicheskie sistemy»* [Collection of scientific works of the IVth International scientific and technical conference «Electromechanical and electromagnetic transformers of energy and controlled electromechanical systems»]. Ekaterinburg, UrFU, 2011, pp. 266–271.

Драгомиров Михаил Сергеевич,

ОАО «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,

ОАО «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,

ОАО «НИПТИЭМ»,

главный конструктор общепромышленных серий и регулируемых двигателей, начальник конструкторско-исследовательского отдела,

телефон (4922) 33-13-37,

e-mail: zaitsevam@ec.vemp.ru