электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51036. ISSN 2307-0595

Особенности проектирования систем охлаждения современного транспортного тягового электропривода

01, январь 2017

Травников А. Н.[1,*], Бутарович Д. О.[1]

УДК: 629.341

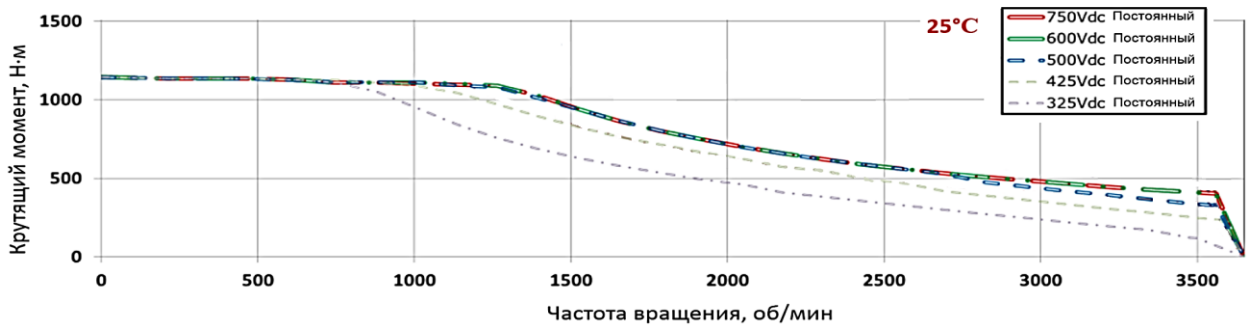
[1]Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
[*]tran91@mail.ru

В настоящее время высокими темпами развивается сфера проектирования и производства электротранспорта. Всё большее распространение получают полностью электрические транспортные средства, построенные по схеме тяговый инвертор – электродвигатель – механическая главная передача.
Поддержание требуемого производителем температурного режима электродвигателя обеспечивает и гарантирует его работу с эффективными характеристиками и максимальным ресурсом. Особенностью при проектировании систем охлаждения тягового привода электротранспорта являются жесткие требования производителей компонентов к расходу жидкости и максимальному давлению, а не к количеству отводимой тепловой энергии. Это связано с конструктивными особенностями электрокомпонентов.
При проектировании системы охлаждения электромобиля возникают проблемы, связанные с отсутствием готовых решений, опыта и методик создания таких гидросистем для дорожных транспортных средств.

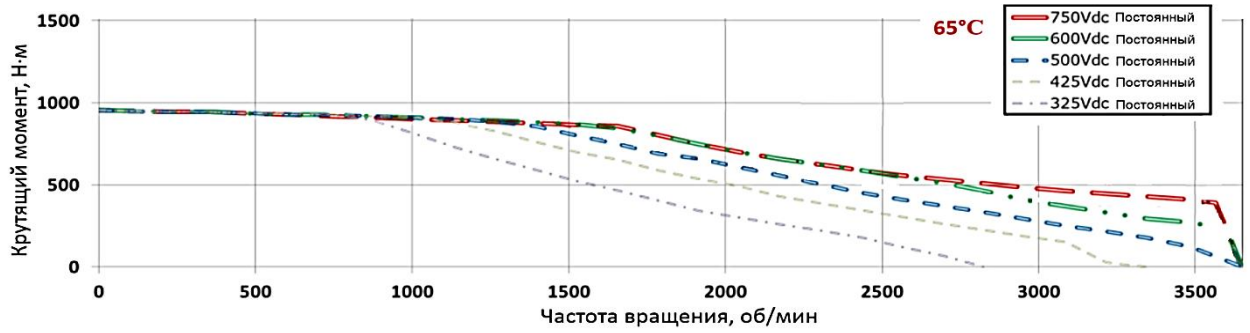
Ключевые слова: электротранспорт, тяговый электропривод, система охлаждения, электродвигатель, инвертор.

Введение

В качестве электрического тягового привода наземных транспортных средств наиболее часто используются асинхронные и синхронные электромашины, обладающие более высоким КПД по сравнению с ДВС [3]. Выделение тепла происходит в результате протекания больших токов через обмотки электродвигателя и силовые ключи преобразователя. При повышении эксплуатационной температуры устройства происходит снижение его мощностных характеристик. Исходя из этого, чем большее количество тепла возможно отводить, тем большие токи можно пропускать. На Рисунке 1 в качестве примера представлена зависимость крутящего момента, развиваемого электродвигателем TM-4 LSM200C (Канада), от частоты вращения при температурах 25°C и 65°C [8].



а)



б)

Рис. 1. Зависимость крутящего момента от частоты вращения электродвигателя:
а – при температуре 25°С; **б** – при температуре 65°С

Для асинхронных двигателей, как правило, применяется воздушная система охлаждения с развитым оребрением корпуса. Особенностью второго типа электродвигателей является наличие в конструкции редкоземельных магнитов, которые ограничивают перегрев машины. Для двигателей машин с постоянными магнитами наиболее часто применяется жидкостная система охлаждения [1].

Охлаждение также требуется для вспомогательных электрических систем тягового электропривода. В первую очередь это относится к тяговым и вспомогательным инверторам, которые выделяют много тепловой энергии. Зачастую системы тягового электропривода представляют собой готовый комплект, состоящий из двигателя и инверторов, главного и вспомогательных.

При рассмотрении транспортных средств с электрическим или гибридным приводом можно сделать вывод, что в условиях плотной компоновки агрегатов наибольшее распространение получили системы, где все компоненты включены в общий контур системы охлаждения.

Конструкции систем терморегуляции тяговых приводов электромобилей, таких как Nissan Leaf, Tesla Model S, Chevrolet Volt, Toyota Prius, получивших наибольшее распространение, схожи, как по принципиальной схеме, так и по конструктивному исполнению. Двигатель и инверторы имеют в своем корпусе каналы, образующие водяную рубашку для отвода тепла (см. Рисунок 2). Для сохранения преимущества компактности электропривода каналы выполняются с достаточно малым сечением, но в большом количестве для отбора тепла от наиболее термонагруженных элементов [2, 4-7].

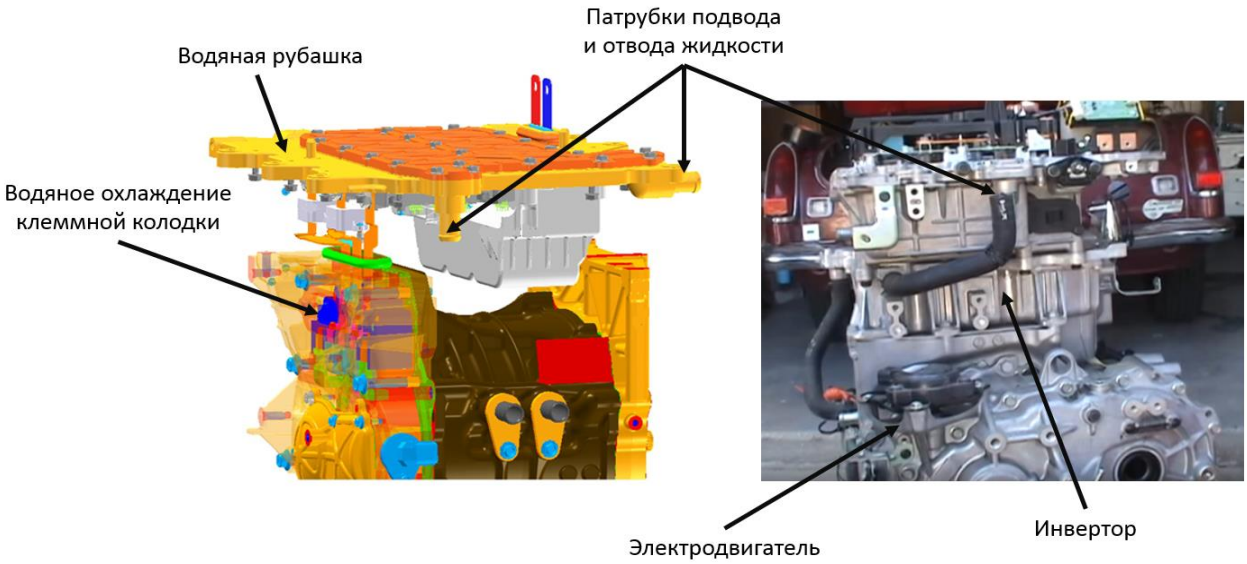


Рис. 2. Элементы системы охлаждения электродвигателя Nissan Leaf

Для прокачки и направления жидкости применяются электрические помпы, элетромагнитные клапаны, дроссели. Радиаторы, используемые для охлаждения жидкости конструктивно идентичны алюминиевым автомобильным. Контроль давления и температуры осуществляются с помощью датчиков, установленных на различных участках гидросистемы.

Производители указывают требования к охлаждению каждого элемента электропривода, соблюдение которых не приводят к выходу его из строя. Регламентируются следующие характеристики:

- состав рабочей жидкости;
- расход рабочей жидкости;
- максимальная температура на входе в агрегат;
- максимальное допустимое давление на входе в агрегат.

В качестве рабочей жидкости применяется смесь гликоля с дистиллированной водой в пропорции 50 % к 50 %. Возможно увеличение доли гликоля при эксплуатации электромобиля при низких температурах. Требуемый расход жидкости определяет характеристики применяемого водяного насоса. Выбор радиатора и других агрегатов, предназначенных для отвода тепла, обуславливается количеством отводимой тепловой мощности. Максимальная температура и давление на входе в каждый компонент должны быть точно соблюдены, так как превышение параметров отключает тяговый электропривод или приводит к выходу из строя узла.

Синтез схемы системы охлаждения

Проектирование системы охлаждения начинается с выбора компоновки агрегатов в гидросистеме. На Рисунке 3 в качестве примера представлен один из вариантов схемы расположения инверторов и электродвигателей [9]. Инверторы установлены параллельно

относительно друг друга. Последовательно им в схему включены электродвигатели, также параллельно соединенные между собой. Последовательная компоновка наиболее рациональна для узлов, через которые требуется прокачивать жидкость с одинаковым расходом, или в случаях, когда возможно уменьшить длину трубопроводов путем объединения агрегатов в группы. Это позволяет уменьшить количество соединений и дросселей в гидросистеме.

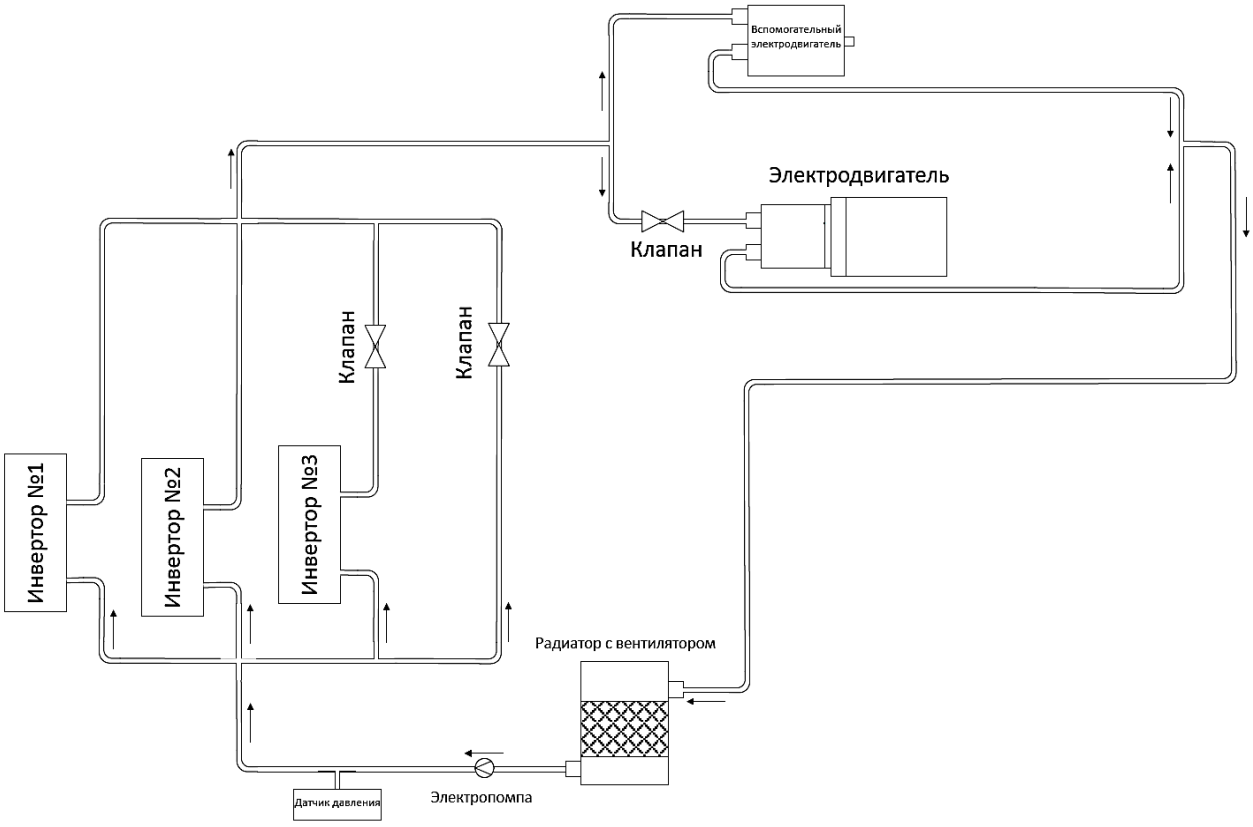


Рис. 3. Пример схемы системы охлаждения тягового оборудования электрического транспортного средства

На представленной схеме видно, что через первый и второй инверторы прокачивается одинаковое количество жидкости, так как их контуры обладают равным гидравлическим сопротивлением (длины магистралей считаем равными). В магистраль расположенного параллельно им третьего инвертора включен клапан, повышающий сопротивление движению жидкости. Это означает, что через третий инвертор требуется прокачать меньшее количество охлаждающей жидкости. Четвертый параллельный канал, называемый байпасом, предназначен для обеспечения требуемого расхода на электродвигателях. На нем также встроен клапан для дополнительного сопротивления. Еще одной функцией данного канала является предохранение от разгерметизации или повышения давления в системе при выходе из строя какого-либо параллельного элемента.

По аналогичной схеме организовано охлаждение электродвигателей. На последовательных участках расход рабочей жидкости одинаков.

При проектировании системы охлаждения тягового привода электробуса ЛиАЗ-6274, разрабатываемого в рамках совместной работы, выполненной при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № ДН01/0001/216/15 между ООО «ЛиАЗ» и МГТУ им. Н.Э. Баумана, была создана математическая модель (см. Рисунок 4) гидросистемы с использованием модуля SimHydraulics программного комплекса MatLab.

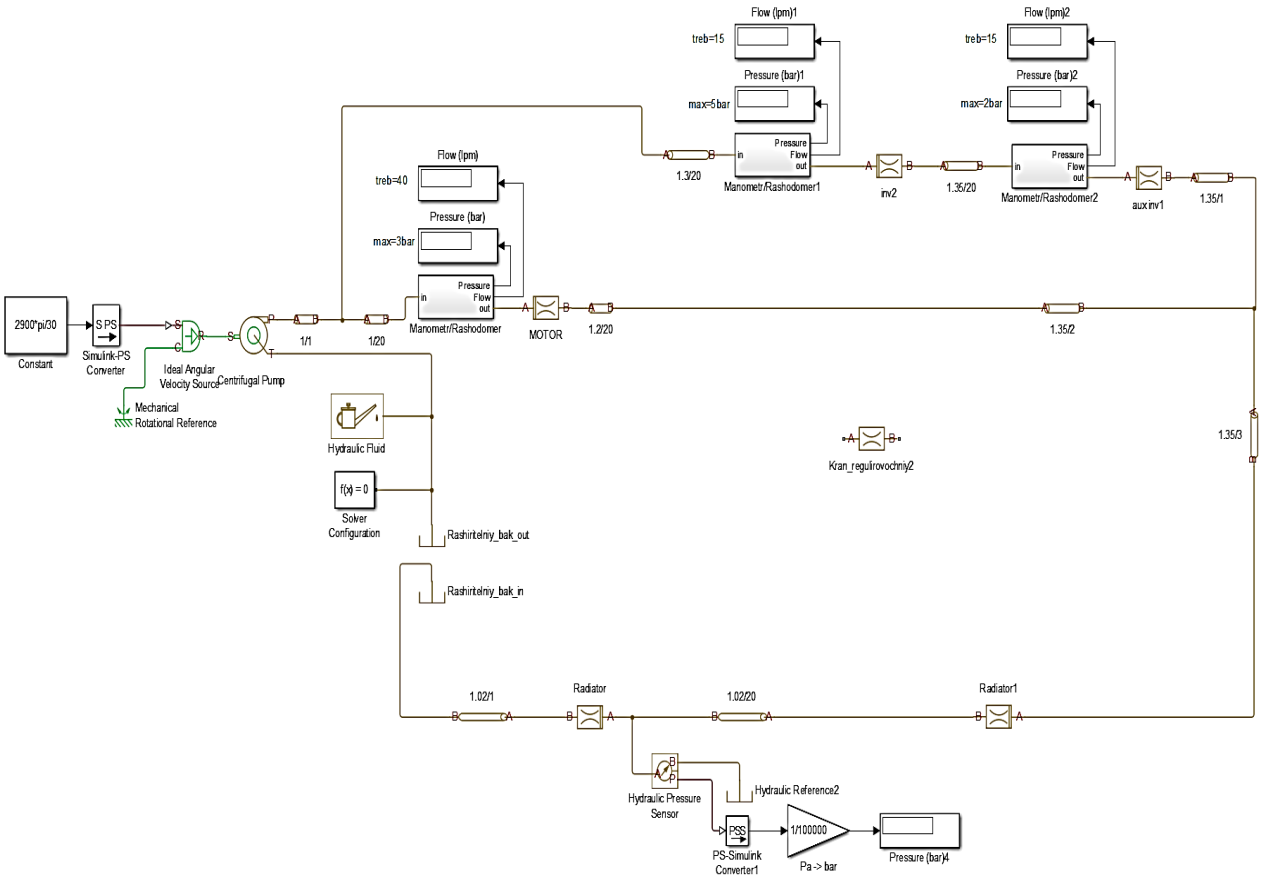
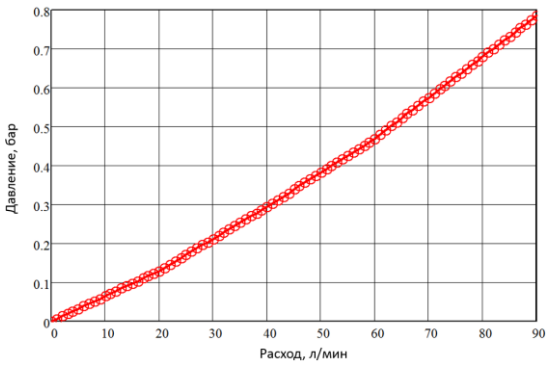
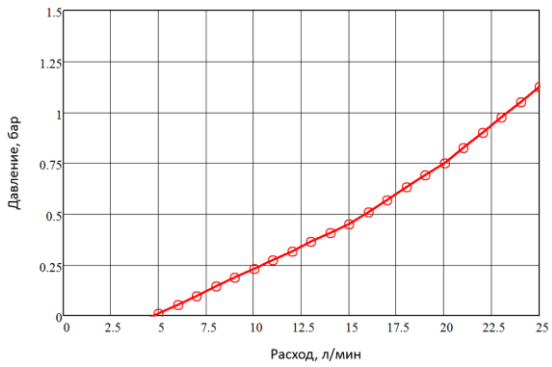


Рис. 4. Математическая модель системы охлаждения электробуса

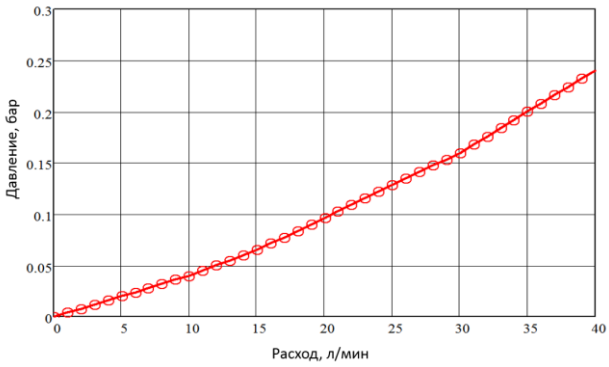
Тяговый привод электробуса ЛиАЗ-6274 включает электродвигатель и инвертор. Также в общую систему охлаждения был включен вспомогательный инвертор. Программные блоки, с помощью которых моделировались электрокомпоненты и радиатор, учитывали имеющиеся зависимости падения давления от расхода жидкости (рис. 5). Итерационным методом подбирались длины трубопроводов с сечениями, учтенными в математической модели, а также водяной насос, обеспечивающий требуемый расход жидкости при полученном общем сопротивлении в системе. Характеристика помпы представлена на рисунке 6.



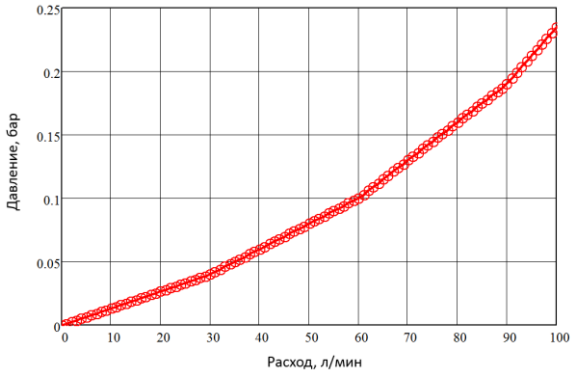
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Зависимости падения давления на агрегатах тягового электропривода:
а – на электродвигателе; **б** – на главном инверторе; **в** – на вспомогательном инверторе; **г** – на радиаторе

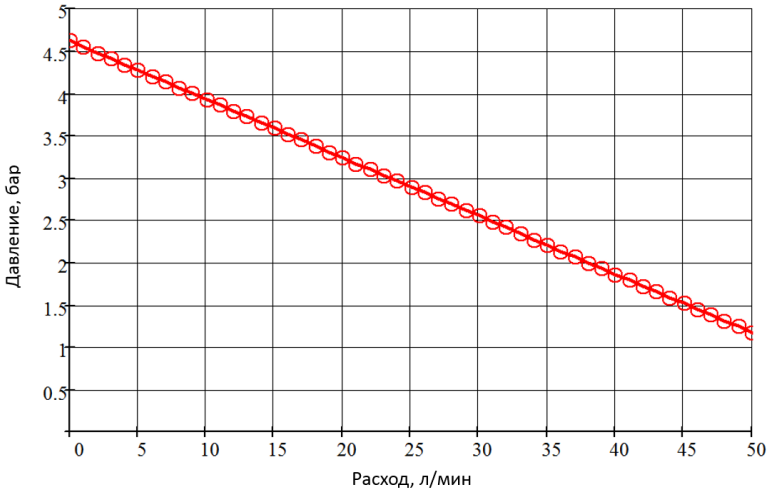
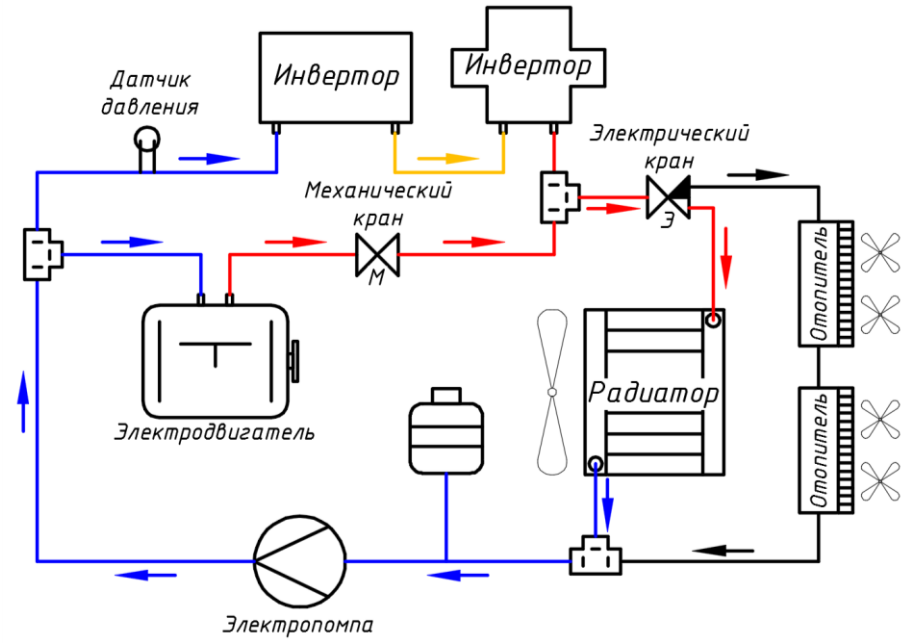


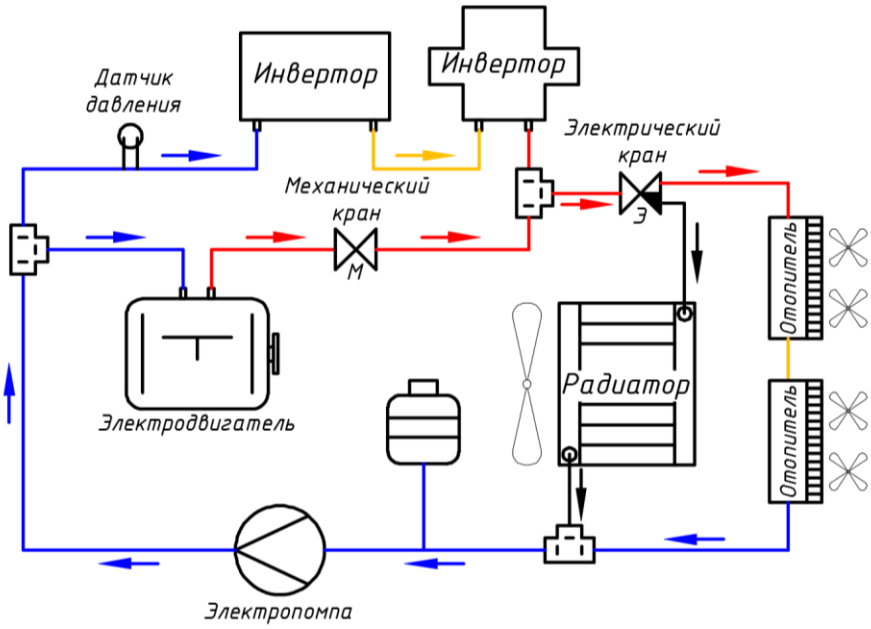
Рис. 6. Характеристика водяного насоса

В результате моделирования была получена и реализована на ходовом макете электробуса схема, представленная на рисунке 7. Электродвигатель включен в гидросистему параллельно с главным и вспомогательным инвертором, которые соединены параллельно, так как требуемый расход жидкости через двигатель составляет 40 л/мин, для инверторов – 15 л/мин. Расход через электродвигатель, полученный в модели – 44 л/мин, через инверторы – 12 л/мин. В связи с этим в магистраль двигателя был включен механический кран, с по-

мощью которого при подключении расходомера настраивалось соотношение расходов в параллельных магистралях. По техническим требованиям также не допускается превышение заданного давления в магистралях агрегатов. Для контроля в трубопровод был включен датчик давления с диапазоном измерений 0…2,5 Бар. Электрический кран, установленный после электрокомпонентов, предназначен для перераспределения потока с радиатора на отопители для обогрева салона в холодное время года при достаточности их эффективности в отведении тепла.



а)



б)

Рис. 7. Схема системы охлаждения электробуса:
а – в режиме работы через радиатор; **б** – в режиме работы через салонные отопители

В Таблице 1 приведены основные характеристики системы охлаждения и ее элементов.

Таблица 1. Технические характеристики системы охлаждения тягового привода электробуса ЛиАЗ6274

Параметр	Показатель
1. Водяной насос: - максимальное рабочее давление, Бар; - максимальный расход жидкости, л/мин; - частота вращения, мин-1	 6 60 2900
2. Расход охлаждающей жидкости: - через тяговый электродвигатель, л/мин; - через тяговый инвертор, л/мин - через вспомогательный инвертор, л/мин	 40 15 15
3. Давление на входе: - в тяговый электродвигатель, Бар - в тяговый инвертор, Бар - во вспомогательный инвертор, Бар	 1,5 1,5 1,2
4. Радиатор: - теплоотдача при расходе жидкости 114 л/мин и при удельных расходах воздуха 4…20 кг/м с2, кВт - гидравлическое сопротивление при расходе жидкости 114 л/мин, Бар	 45…120 0,3
5. Магистраль системы охлаждения: - внутренний диаметр патрубков, мм - общая длина магистрали, м	 19 9

Заключение

По итогам испытаний были получены и оценены значения давления и расхода жидкости на различных участках спроектированной системы охлаждения тягового привода электробуса. Температура электродвигателя и инверторов находилась в допустимых значениях. Особенностью системы охлаждения является строгое выполнение задаваемых производителем электрокомпонентов параметров, таких как расход и максимальное давление жидкости, путем выбора гидравлической схемы с параллельными контурами и включению в систему крана для регулировки соотношения расходов в них.

Список литературы

[1]. Z. A. Abdul Karim, A. H. Mohd Yusoff. Cooling System for Electric Motor of an Electric Vehicle Propulsion. // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 903. P. 209-214. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.903.209.

[2]. Park S. A Comprehensive Thermal Management System Model for Hybrid Electric Vehicles. A dissertation ….. Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering). The University of Michigan. 2011. 125 p.

[3]. Смирнов А.А., Пикалов Н.А. Определение потребной энергоемкости накопителей электробуса методами имитационного моделирования // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал. 2016. №12. Режим доступа: http://engsi.ru/doc/851764.html (дата обращения 20.12.2016).

[4]. Hybrid and Electric Thermal Solutions. Режим доступа: http://www.dana.com/light-vehicle/products/electric-and-hybrid/thermal-solutions (дата обращения 1.12.2016).

[5]. Hybrid & Electric Vehicle Systems. Delphi. Режим доступа: http://www.delphi.com/docs/default-source/contact/hybrid-electric-vehicle-systems.pdf (дата обращения 1.12.2016).

[6]. Jiling Li, Zhen Zhu. Battery thermal management systems of electric vehicles: Master's Thesis in Automotive Engineering. Göteborg, Sweden: 2014. 67 p.

[7]. LaMarre Jeff. FSAE Electric Vehicle Cooling System Design. Honors Research Projects. 2015. 45 p.

[8]. TG-0155 TM4 LSM200C-HV2600-A1_CO200-HV-A1, System specifications v.2.0 // © TM4 inc. 2015-2016, pp. 1-12.

[9]. A5E31658264A Version AL ELFA2 Cooling Specification // Siemens AG, pp. 1-11.