

УДК 62-83

Е. А. Смотров, канд. техн. наук,  
Д. В. Вершинин, Д. Ю. Шейко

### СИСТЕМА ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

*Аннотация.* Разработана система жидкостного охлаждения для электропривода автономного электротранспортного средства. Оценена эффективность режимов работы с точки зрения энергетических затрат, рассчитан температурный интервал, на котором охлаждение электродвигателя является целесообразным. Приведена структура системы терморегулирования.

*Ключевые слова:* система охлаждения, электротранспорт

E. A. Smotrov, Ph.D.,  
D. V. Vershinin, D. Y. Sheyko

### TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR ELECTRIC TRANSPORT DRIVE

*Abstract.* Developed liquid cooling system for electromobile. Evaluated the effectiveness of modes in terms of energy costs, the cooling expedience of the motor is calculated. The structure of the thermal control system is described.

*Keywords:* cooling system, electric transport

Є. О. Смотров, канд. техн. наук,  
Д. В. Вершинін, Д. Ю. Шейко

### СИСТЕМА ТЕРМОРЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

*Анотація.* Розроблено систему рідинного охолодження для автономного електротранспортного засобу. Оцінено ефективність режимів роботи з точки зору енергетичних витрат, розраховано температурний інтервал, на якому охолодження електродвигуна є доцільним. Наведено структуру системи терморегулювання.

*Ключові слова:* система охолодження, електротранспорт

**Введение.** Разрабатывается система жидкостного охлаждения электротранспортного средства (ЭТС). Источниками тепла, а значит и объектами охлаждения в исследуемом ЭТС являются два мотор-колеса (МК) номинальной мощностью по 40 кВт и инверторы векторных приводов. Отвод тепла от инвертора происходит за счет контакта между его теплообменным телом и системой охлаждения (СО). МК представляет собой трехфазный синхронный двигатель обращенного типа (статор остается неподвижным, тогда как ротор соединен с диском колеса) с возбуждением от постоянных магнитов [1]. Конструктивные особенности привели к температурной изоляции электродвигателя от окружающей среды, поэтому было предусмотрено жидкостное охлаждение.

Работа электропривода (ЭП) неизбежно приводит к его нагреву. При увеличении температуры происходит ускоренное старение изоляции проводников и уменьшение их

механической прочности. Например, если при допустимой длительной температуре  $\Theta_n$  срок службы изоляции проводников равен  $t_u$ , то при возрастании длительной температуры всего лишь на  $8^\circ\text{C}$  срок службы сокращается в 2 раза, т.е.  $t'_e = t_e / 2$  [3].

Традиционно перед СО электропривода, подключенного к электросети, ставится только одна задача – защита от перегрева. В случае использования для охлаждения ЭП энергии бортового источника возникает необходимость эффективного использования заряда аккумулятора для увеличения ресурса работы на одной зарядке аккумулятора.

Снизить затраты на охлаждение представляется возможным двумя путями:

снижением мощности СО;

охлаждением до целесообразного значения.

**Целью работы** является оптимизация затрат на охлаждение электропривода.

В данный момент не существует методик по разработке СО для автономного электротранспорта. Применение опыта по охла-

© Смотров Е.А., Вершинин Д.В.,  
Шейко Д.Ю., 2012

ждению электропривода, работающего от электросети, и автомобиля (в качестве транспортного средства) нерационально.

Для электропривода подобной мощности традиционным принято воздушное охлаждение, причем важнейшую роль тут играет площадь и форма кожуха, рассеивающего тепло: количество ребер, их форма, расположение и т.д., а увеличение рассеивания тепла обеспечивает вентилятор, механически соединенный с валом электродвигателя либо питающийся от той же электросети.

В СО автотранспорта широко используется вращение вала ДВС в качестве движущей силы для насосов охлаждающих агентов, а также применение релейных режимов работы для электровентилятора.

Для эффективной работы СО предлагается разделить контуры по охлаждению МК и преобразователей. Для каждого контура необходимо определить весовой вклад в процесс охлаждения и целесообразность использования максимальной мощности исполнительных механизмов (электронасосы и электровентилятора). Зная связь между режимом работы исполнительного механизма и температурой объекта, разработчик получает сведения для синтеза алгоритма работы системы терморегулирования (СТР), которая должна контролировать процесс охлаждения.

В состав каждого контура охлаждения входит радиатор, соединительные патрубки, датчики температуры и расхода жидкости, исполнительные механизмы (ИМ), а именно электронасос и электровентилятор.

Процесс отвода и рассеивания в каждом контуре можно разделить на три этапа:

теплообмен между источником тепла и охлаждающим агентом;

теплообмен между охлаждающим агентом и радиатором;

рассеивание тепла в окружающую среду.

Во всех трех случаях происходит принудительная конвекция. В первых двух этапах на протекающие процессы влияет только электронасос. Охлаждение через принудительное движение жидкости имеет одну особенность, которой нельзя пренебрегать. Различают три режима движения жидкости — ламинарный, турбулентный и переходный. Последний занимает малую область и прак-

тически переход из ламинарного движения в турбулентное происходит сразу, как только скорость достигает критического значения.

Принципиальное различие между ламинарным и турбулентным потоками в том, что в первом случае произвольная точка в потоке жидкости имеет одинаковое значение скорости, а значит, увеличение скорости приводит к ускорению теплообмена. Во втором случае скорость произвольной точки в пограничном слое (слой, который непосредственно участвует в теплообмене) меньше, чем скорость в ядре потока. Таким образом, увеличение скорости может не иметь ожидаемого эффекта и привести к излишним затратам. Третьему этапу не уделялось особого внимания, так как в нем не было обнаружено требующих исследования вопросов.

Работа электровентилятора непосредственно влияет на температуру радиатора, тогда как на охлаждающую жидкость и объект охлаждения имеет лишь косвенное влияние.

Для решения поставленных задач была проведена серия тепловых экспериментов по охлаждению электродвигателя и преобразователя на специализированном стенде. Целью проводимых экспериментов являлась оценка эффективности затрат энергии и измерение состояния объекта охлаждения при различных режимах работы СО. На величину выделяемой тепловой энергии влияет множество внешних факторов: температура окружающей среды, масса перевозимого груза, угол дорожного полотна, набор скорости или торможение. Для определения характера движения ЭТС был принят ГОСТ 20306-90, а для оценки интенсивности тепловыделения были использованы расчеты, представленные в [2], исходя из которых ЭП развивал момент 650 Н·м и 250 об/мин.

Схема контура охлаждения представлена на рис. 1. На схеме продемонстрированы снимаемые показания, последовательность отвода и рассеивания тепла.

Было проведено по три тепловых эксперимента для преобразователя и МК. Для каждого последующего эксперимента увеличивалось подаваемое напряжение на электронасосе (6; 9; 12 В). Каждый эксперимент состоял из 4 этапов, в которых также увеличивалось подаваемое напряжение на элект-

тровентиляторе (3; 6; 9; 12 В). Условием перехода к следующему этапу является установление температуры объекта охлаждения.

В случае охлаждения преобразователя было установлено, что минимальные затраты на ограничение температуры вблизи критического значения составляют 29,5 – 30 Вт и в каждом случае необходимо использовать вентилятор. После прекращения роста температуры максимальные возможности каждого режима (увеличение прикладываемого напряжения к помпе на 3В) позволили снизить ее на 6,7; 6,8 и 8,8°C соответственно. Хорошо заметна обратная связь между затратами на охлаждение преобразователя и его температурой.

Абсолютно иная ситуация наблюдалась по результатам охлаждения МК. Второй режим (расход жидкости – 2,65 л/мин) после прекращения роста температуры позволил снизить ее всего на 4°C, в среднем по 1,3°C на каждом этапе. Затраты на второй режим можно считать минимальными для защиты от перегрева. Анализируя третий и четвертый (5 – 7,9 л/мин) режимы, получили верхний предел затрат, так как результаты четвертого режима оказались хуже, чем предыдущего.

В ходе экспериментов по охлаждению МК также снимались показания КПД. При повышении температуры обмоток на 1°C за счет увеличения электрического сопротивления потери возрастают на 18,6 Вт. Мощность системы охлаждения позволяет варьи-

ровать значением температуры мотор–колеса между 93 и 105°C. Проанализировав потери при 105°C вместе с затратами на охлаждение – это значение было принято за точку отсчета – определили, что целесообразно охладить электродвигатель до 95°C, при этом выигрыш составляет 110 Вт.

Для определения алгоритма терморегулирования с точки зрения эффективного расхода заряда аккумулятора построены графики зависимости температуры от затрат энергии (рис. 2).

Каждый график на рис. 2, а соответствует установлению температуры преобразователя при различных напряжениях на электропомпе. Тогда как на рис. 2, б указаны графики для различных напряжениях на электровентиляторе при фиксированном напряжении на электропомпе.

На графиках хорошо видна перспектива использования электропомпы большей мощности, рис. 2, а.

Влияние режима работы электровентилятора на температуру преобразователя представлено на рис. 2, б. Отметим, что при зафиксированных напряжениях на электропомпах повышение напряжение на электровентиляторе с 9 В до 12 В не приводит к ощутимому результату.

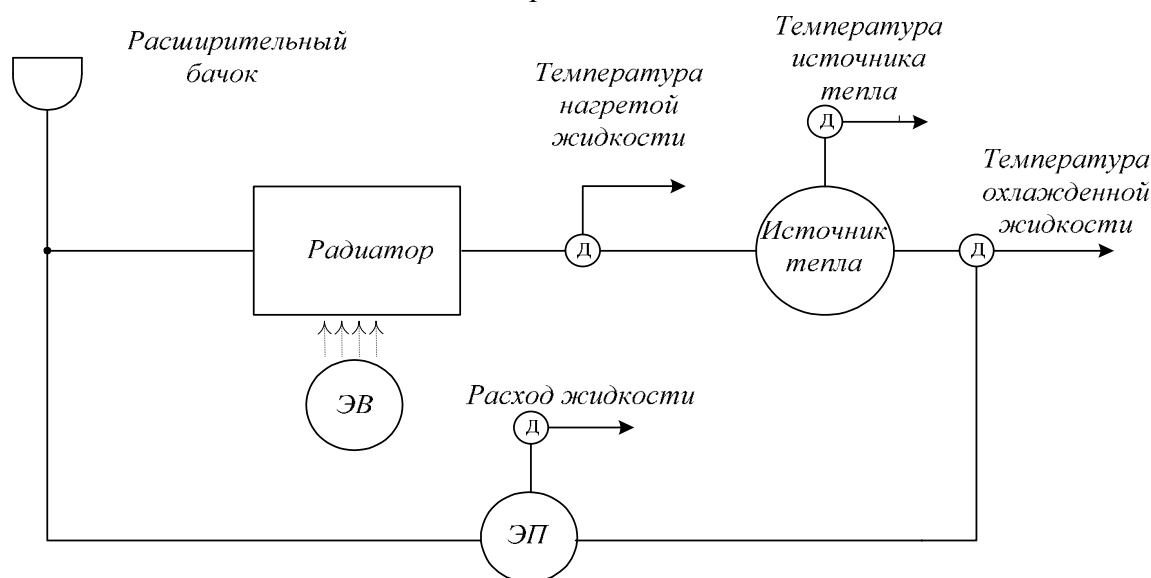


Рис. 1. Схема экспериментального контура охлаждения

Основываясь на полученных результатах, в качестве алгоритма регулирования было предложено фиксировать напряжение на электроventилиляторе на уровне 6 В (при стоячем ТС), а удержания объекта охлаждения в определенном температурном интервале добиваться за счет варьирования режимами работы помпы между 6 и 12 В.

На рис. 3 представлен график эффективности затрат мощности на охлаждение МК. Основываясь на полученных данных, был предложен режим функционирования, при котором напряжение на электропомпе и электроventилиляторе фиксируется на уровне 9 и 12 В соответственно.

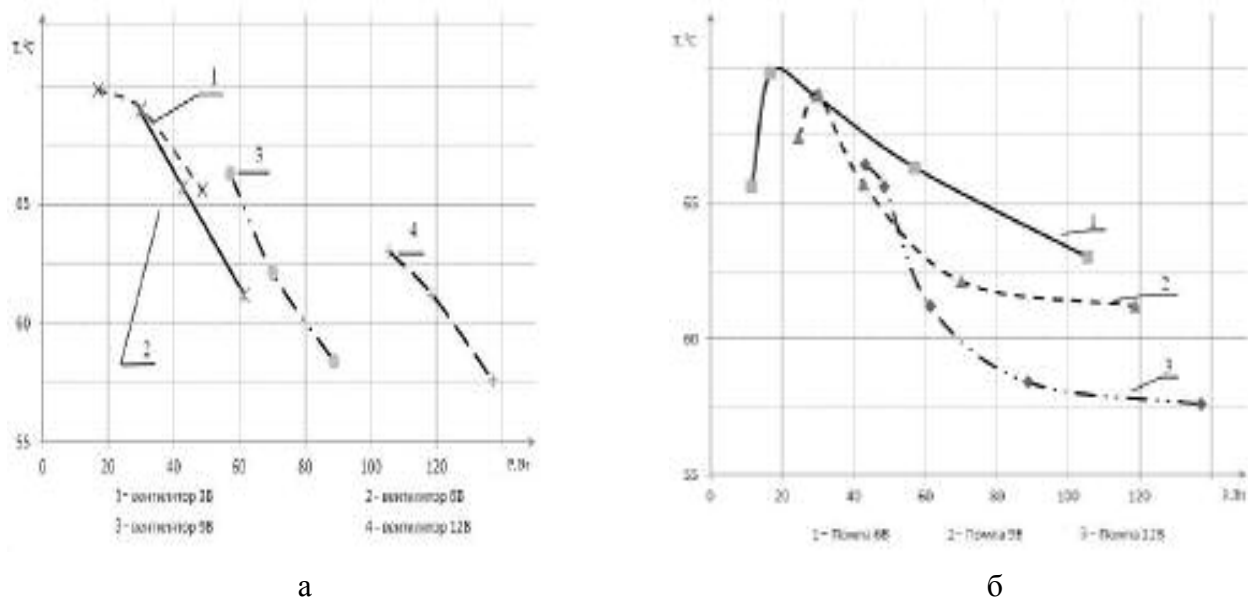


Рис. 2. Графики эффективности энергозатрат для режимов вентилятора (а) и помпы (б)

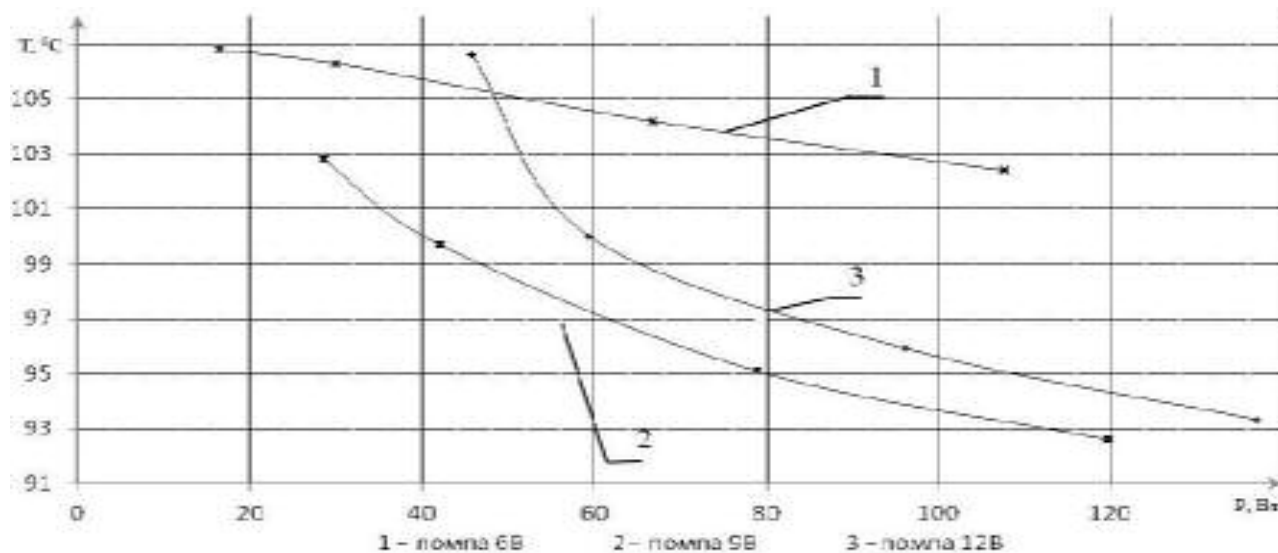


Рис. 3. Графики эффективности энергетических затрат на охлаждение мотор-колеса

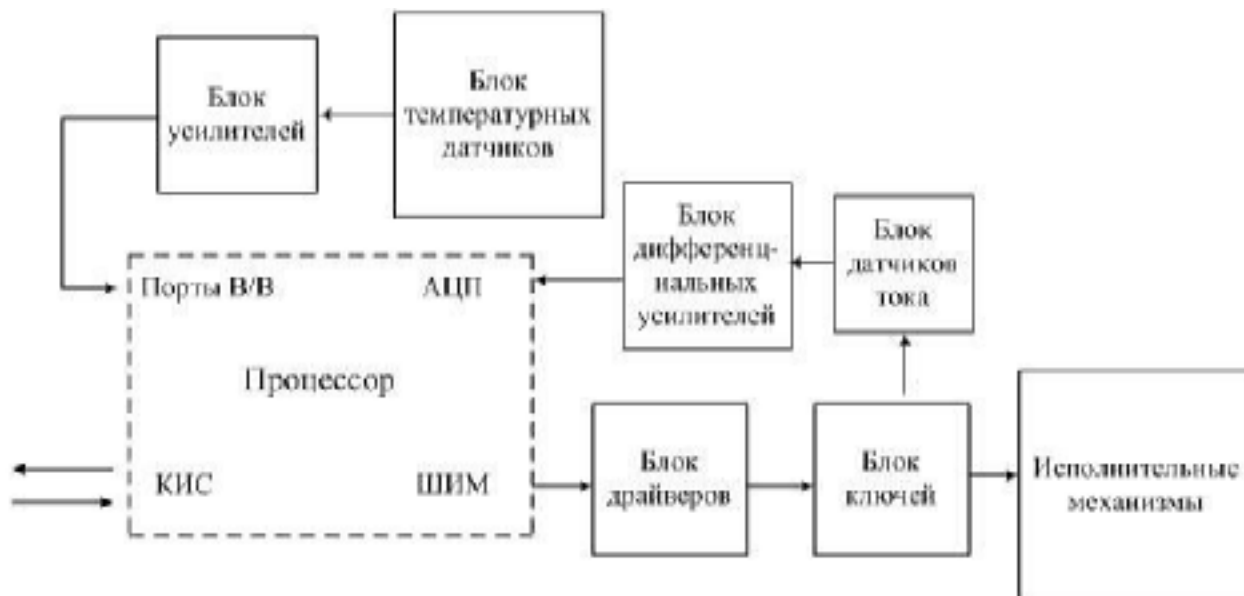


Рис. 4. Структурная схема системы терморегулирования

Полученные результаты характерны для статического режима работы ЭП. На практике мы имеем дело с динамическим режимом. Снижение напряжений на ИМ или использование ИМ меньшей мощности уменьшает устойчивость системы, т.е. небольшое превышение выделяемого тепла относительно режима, использованного в эксперименте, приведет к перегреву ЭП.

Для реализации алгоритмов разработана система терморегулирования (СТР), ее структурная схема представлена на рис.4.

Система терморегулирования реализуется на базе микропроцессорной техники, так как обязательной периферией являются устройства ввода/вывода, контроллеры интерфейсов связи, АЦП и таймеры для реализации широтно-импульсной модуляции. Необходимость наличия интерфейса обусловлена тем обстоятельством, что СТР получает данные о температуре привода от модуля управления транспортным средством. АЦП измеряют показания шунтовых датчиков тока для реализации защитных функций и ограничения пусковых токов. Блок драйверов содержит четыре микросхемы – по одной на каждый исполнительный механизм – и предназначен для управления транзисторами. Блок ключей включает силовые транзисторы,

управляя которыми регулируют прикладываемое к исполнительным механизмам напряжение. Блоки усилителей и дифференциальных усилителей предназначены для согласования уровней сигналов с параметрами АЦП.

#### Выводы

Были проведены исследования по оценке эффективности затрат на охлаждение привода, определена целесообразность охлаждения МК и предложена структура СТР для реализации закладываемых алгоритмов.

В сравнении с режимом работы СО, при котором на все исполнительные механизмы подавалось по 12 В, затраты на охлаждение преобразователя были снижены на 55 и 42,6 % при охлаждении преобразователя и МК соответственно. Предложенный метод оценки эффективности позволил исключить нерациональное использование энергии и сформировать алгоритм терморегулирования.

В дальнейшем планируется исследование процесса охлаждения ЭП в условиях динамической нагрузки и составление математической модели процесса теплообмена.

### Список использованной литературы

1. Вершинин Д. В. Электропривод мотор-колеса электротранспортного средства / Д. В. Вершинин, В. А. Войтенко, Е. А. Смотров // *Электромашинобудування та електрооблажнання* – 2009. – Вип. 74. – С. 25 – 30.

2. Вершинин Д. В. Определение параметров основных узлов электрической схемы электроавтобуса / Д. В. Вершинин, В. А. Войтенко, Е. А. Смотров // *Электромашинобуд. та електрообл.* – 2009. – Вип. 74. – С. 10 – 17.

3. Чунихин А. А. Электрические аппараты (общий курс). Учебник для энергетических и электротехнических институтов и факультетов. Изд. 2-е, перераб. и доп. / А. А. Чунихин. – М. : Энергия, 1975, С. 27 – 28.

Получено 08.02.2012

### References

1. Vershinin D.V., Voitenko V.A., Smotrov E.A., (2009), Electric drive motor–wheel of electric transport / *Electromashinobuduvannya and electroleading supplier.* – VIP. 74. – Pp. – 25–30 [in Ukrainian].

2. Vershinin D.V., Voitenko V.A., Smotrov E.A., (2009), Some aspects of the autonomous power source vehicles / *Electromashinobuduvannya and electroleading supplier.* – Vip. 74. – Pp. 10 – 17 [in Ukrainian].

3. Chunihin A.A., (1975), Electric devices (general course). A textbook for energy and electric institutions and faculty. Issue 2, complete, Moscow: *Energiya*, Pp. 27 – 28 [in Russian].



Смотров  
Евгений Александрович,  
канд. тех. наук,  
ведущий инженер ГП НТЦ  
«Станкосерт»,  
тел. 048-728-85-05



Вершинин  
Дмитрий Вениаминович,  
инженер-исследователь  
Одесского спец. конструкторского бюро специальных станков,  
тел. 048-728-85-05



Шейко  
Дмитрий Юрьевич,  
Научный сотрудник Одесского спец. конструкторского бюро специальных станков,  
E-mail: sheyko.dima@gmail.com