

УДК 62-83

*Е.А. Смотров<sup>1</sup>, Д.В. Вершинин<sup>2</sup>, Д.Ю. Шейко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Государственное предприятие Научно-технический центр «Станкосерт», пер. Ониловой, 16, г. Одесса, 65011

<sup>2</sup> ОДО «Одесское специальное конструкторское бюро специальных станков», пр. Гагарина, 25, г. Одесса, 65039

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЖИДКОСТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ С ЭФФЕКТИВНЫМ РАСХОДОМ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

*Представлены результаты по исследованию вопроса жидкостного охлаждения электропривода. Произведена оценка эффективности охлаждения с точки зрения затрат. Обоснованы контуры охлаждения и режимы работы, описан узел термоконтроля.*

**Ключевые слова:** система охлаждения – электротранспорт.

*Є.О. Смотров<sup>1</sup>, Д.В. Вершинин<sup>2</sup>, Д.Ю. Шейко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Державне підприємство Науково-технічний центр «Станкосерт», пер. Онілової, 16, м. Одеса, 65011

<sup>2</sup> ТДВ «Одеське спеціальне конструкторське бюро спеціальних верстатів», пр. Гагаріна, 25, г. Одеса, 65039

## **РОЗРОБКА СИСТЕМИ РІДИННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ З ЕФЕКТИВНОЮ ВИТРАТОЮ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ**

*Представлені результати по дослідженню питання рідинного охолодження електроприводу. Зроблена оцінка ефективності охолодження з точки зору витрат. Обґрунтовані контури охолодження та режими роботи, описаний вузол термоконтролю.*

**Ключові слова:** система охолодження – электротранспорт.

*E.A. Smotrov<sup>1</sup>, D.V. Vershinin<sup>2</sup>, D.Y. Sheyko<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Scientific Research Center «Stankocert», Onilivoi str., 16, Odessa, 65011

<sup>2</sup> Odessa Special Design and Engineering Bureau of Special Tools, Gagarina str., 25, Odessa, 65039

## **LIQUID COOLING SYSTEM DEVELOPMENT WITH EFFECTIVE ENERGY USE FOR THE VEHICLE TRACTION ELECTRIC DRIVE**

*The drive liquid cooling issue research results are given. An assessment of the cooling cost effectiveness was executed. The cooling circuits and modes of operation were substantiated, temperature control unit was described.*

**Keywords:** cooling system – electric transport.

### **I. ВВЕДЕНИЕ**

Последнее десятилетие характеризуется значительным ростом работ по разработке, исследованию и внедрению систем электротранспорта на основе автономного электропривода, в том числе многодвигательного исполнения с источником питания на борту. Увеличение удельной мощности электроприводов обуславливает применение жидкостного охлаждения. В данной работе рассматриваются результаты разработки и исследования системы жидкостного охлаждения электропривода (ЭП) электротранспортного средства (ЭТС).

Источниками тепла, а значит и объектами охлаждения в разрабатываемом 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 обмотки электродвигателя от окружающей среды, поэтому было предусмотрено жидкостное охлаждение.

### **II. МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Работа ЭП неизбежно приводит к его нагреву. При увеличении температуры происходит уско-

ренное 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.  $t'_u = t_u / 2$  [3].

Традиционно перед СО сетевого электропривода 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 возможно двумя путями:

- снижением мощности СО;
- охлаждением до целесообразного значения.

Таким образом, целью работы является оптимизация затрат на охлаждение электропривода.

Применение опыта по охлаждению сетевого ЭП и автомобиля (в качестве транспортного средства) нерационально.

Для ЭП 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 предложено разделить контуры по охлаждению МК и преобразователей. Для каждого контура необходимо определить весовой вклад в процесс охлаждения и целесообразность использования максимальной мощности исполнительных механизмов (ИМ) СО (электропомпы 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 СО входит радиатор, соединительные патрубки, датчики температуры и расхода жидкости и ИМ.

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 электропомпа.

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 практически 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 Нм 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 электропомпе (6, 9, 12 В). Каждый эксперимент состоял из 4 этапов, в которых также увеличивалось подаваемое напряжение на электровентиляторе (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 определялся КПД СТР. При повышении температуры обмоток на 1°C за счет увеличения электрического сопротивления потери возрастают на 18,6 Вт. Мощность системы охлаждения позволяет варьировать 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 охлаждать 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 электроклапане при фиксированном напряжении на электропомпе.

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

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

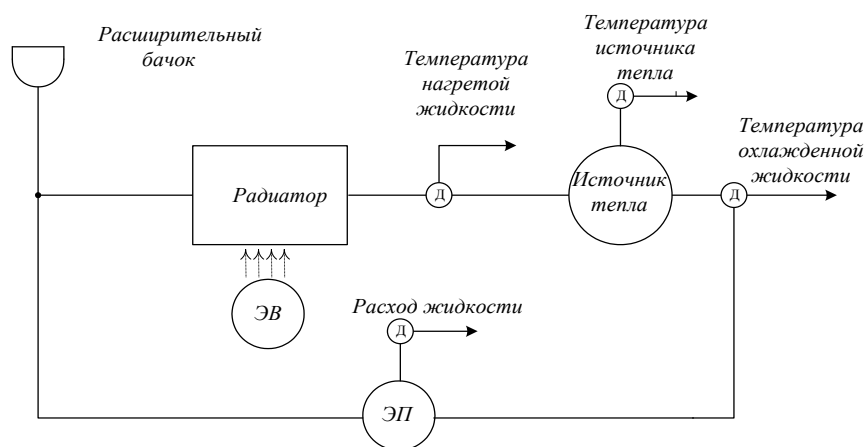


Рисунок 1 – Схема экспериментального контура охлаждения

Основываясь на полученных результатах, в качестве алгоритма регулирования было предложено фиксировать напряжение на электроклапане 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 за счет преобразователя в системе СТР.

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

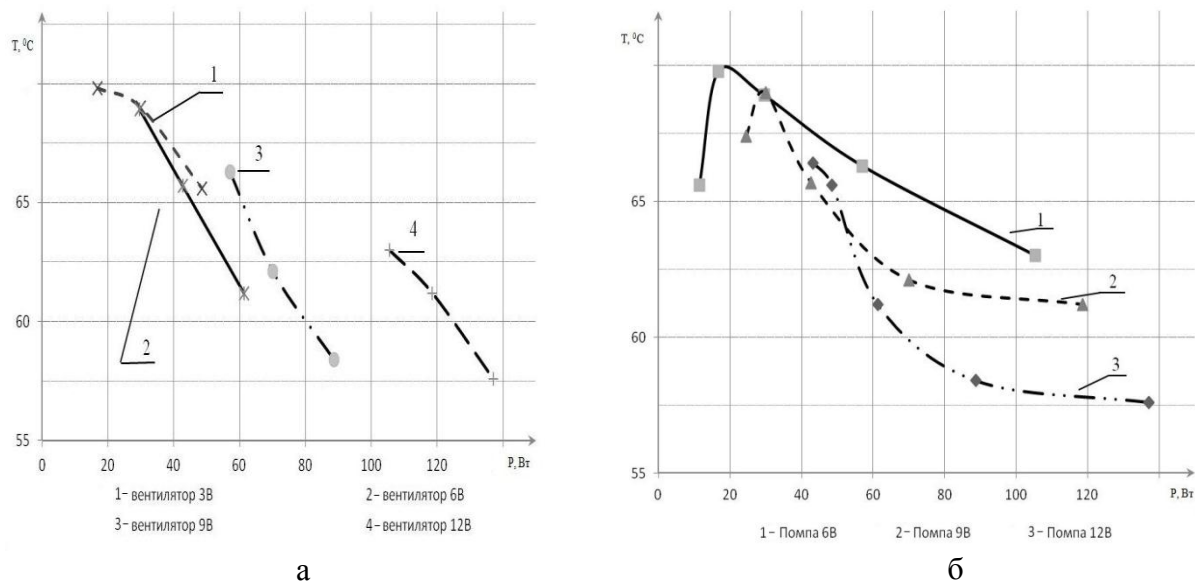
В виду того, что тепловые пределы инвертора и МК значительно различаются – 70 и 120 °C соответственно, на практике было заложено два контура охлаждения – структура представлена на рисунке 4.

Датчики расхода жидкости были заложены для реализации защиты от воздушной пробки и нарушения герметичности контура. Температур-

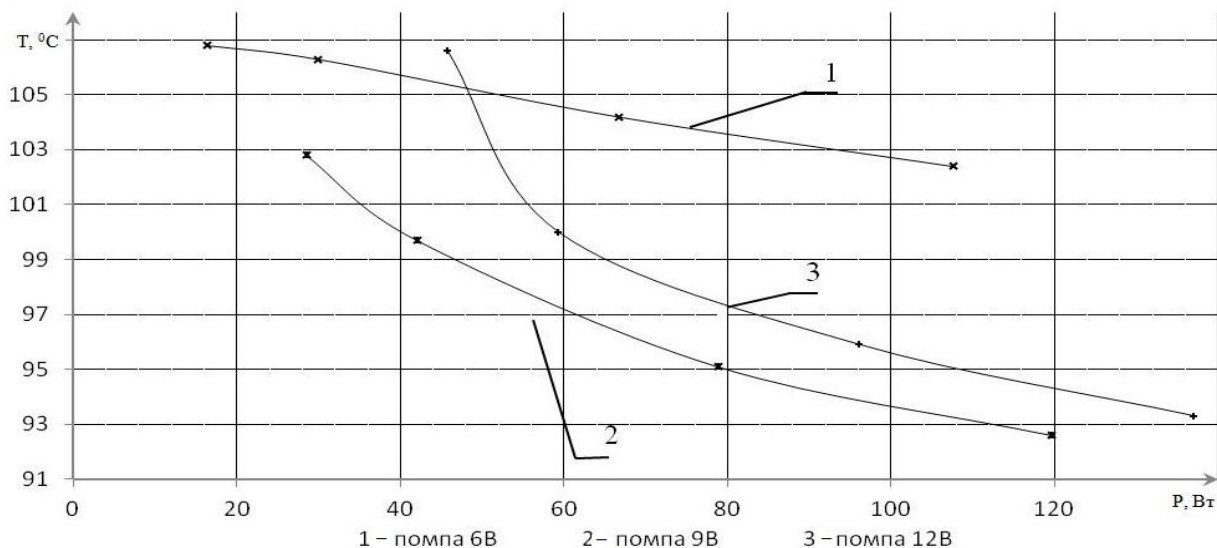
ные датчики в основном несут дублирующую функцию, так как температурные показания МК и инверторов система терморегулирования (СТР) получает через интерфейс связи узлов ТС. Данная избыточность добавляет СТР автономности, а также позволяет обеспечивать тепловую защиту несмотря на нештатные ситуации (повреждение линий связи, отключение инверторов и т.д.).

При расположении ИМ возникли следующие особенности. Помпы МК должны располагаться на одинаковом расстоянии до МК, в противном случае возникает не равномерное распределение жидкостного потока, а значит и нагрев.

Воздушный поток, создаваемый вентилятором, эффективней направлять согласно направлению воздушного потока, создаваемого при движении ТС. Расположение вентилятора за радиатором позволяет избавиться от набегающего потока, который может перевести электроклапан в генераторный режим, поскольку радиаторный узор его эффективно разбивает.



**Рисунок 2** – Графики эффективности энергозатрат для режимов вентилятора (а) и помпы (б)



**Рисунок 3** – Графики эффективности энергетических затрат на охлаждение мотор-колеса

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, ее структурная схема представлена на рисунке 5.

Отметим, что ШИМ позволяет «плавно» управлять ИМ, тем самым в точности реализовывать заложенные алгоритмы. Результаты и режимы проведенных экспериментов, приведенные вначале статьи, служат лишь для синтеза алгоритмов, закладываемых в СТР.

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 датчиков тока для реализации защитных функций и ограничения пусковых токов. Блок драйверов содержит микросхемы предназначен для управления транзисторами. Блок ключей включает силовые транзисторы, управляя которыми регулируют прикладываемое к исполнительным механизмам напряжение.

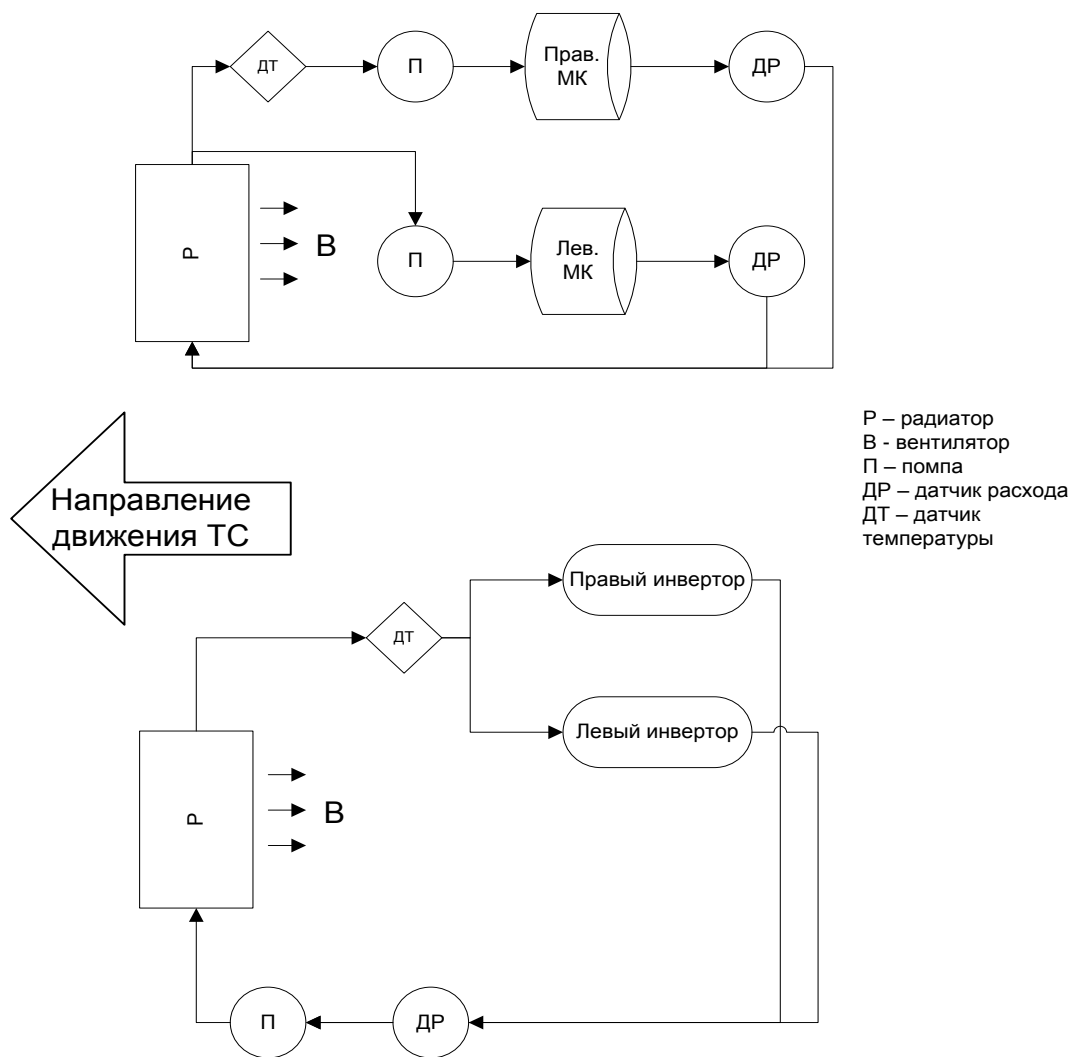


Рисунок 4 – Структура системы охлаждения

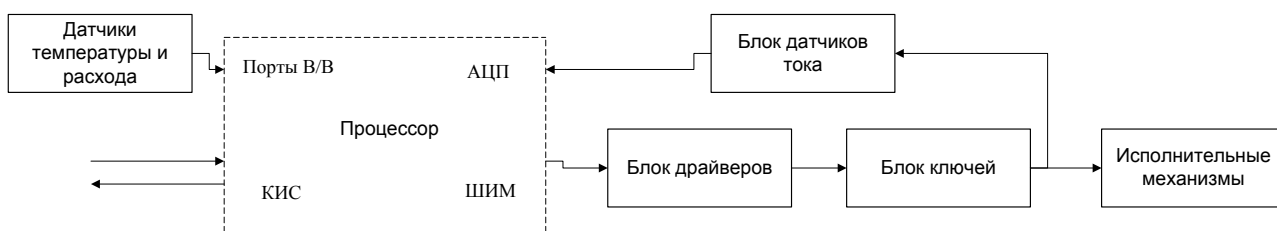


Рисунок 5 – Структурная схема системы терморегулирования

### III. ВЫВОДЫ

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

В сравнении с режимом работы СО, при котором на все исполнительные механизмы подавалось по 12 В, затраты на охлаждение преобразова-

теля 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.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Вершинин Д.В., Войтенко В.А., Смотров Е.А.** Электропривод мотор-колеса электротранспортного средства. *Электромашинобуд. та електрообл.* – 2009. – Вип. 74. – С. 25–30.
2. **Вершинин Д.В., Войтенко В.А., Смотров Е.А.** Определение параметров основных узлов электрической схемы электроавтобуса. *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. – М.: Энергия, 1975, С. 27–28.

## REFERENCES

1. **Vershinin D.V., Voitenko V.A., Smotrov E.A.** Elektroprivod motor-kolesa elektrotransportnogo sredstva. *Elektromashinobud. ta elektroobl.* – 2009. – Vip. 74. – S. 25–30.
2. **Vershinin D.V., Voitenko V.A., Smotrov E.A.** Opredelenie parametrov osnovnyh uzlov elektricheskoy shemy elektroavtobusa. *Elektromashinobud. ta elektroobl.* – 2009. – Vip. 74. – S. 10–17.
3. **Chunihin A.A.** Elektricheskie apparaty (obshchij kurs). Uchebnik dlja energeticheskikh i elektrotehnicheskikh institutov i fakul'tetov. Izd. 2-e, pererab. i dop. – M.: Energija, 1975, S. 27–28.

---

Получена в редакции 18.07.2013, принята к печати 04.09.2013