

УДК 621.3

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ОХЛАЖДЕНИЯ**  
**PERSPECTIVES FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF  
ELECTROMOTORS THROUGH NEW COOLING TECHNOLOGIES**

Э.Д. Мацулевич, А.М. Тарасова

Научный руководитель – В.П. Счастный, к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

E. Matsulevich, A. Tarasova

Supervisor – V. Schastny, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk

***Аннотация:** В статье рассматриваются традиционные методы охлаждения. Также приводятся современные технологии охлаждения электродвигателей.*

***Abstract:** The article deals with traditional cooling methods. Modern cooling technologies for electric motors are also given.*

***Ключевые слова:** электродвигатель, технологии охлаждения, испарительное охлаждение, тепловые трубы, нанотехнологии, аддитивное производство, электротранспорт.*

***Keywords:** electric motor, cooling technologies, evaporative cooling, heat pipes, nanotechnology, additive manufacturing, electric transportation.*

### **Введение**

Электродвигатели занимают важное место в современной энергетике и промышленности. Одной из ключевых проблем, влияющих на их производительность, является теплообразование, вызванное потерями энергии в виде тепла. Недостаточная система охлаждения снижает эффективность работы электродвигателей, уменьшает их срок службы и увеличивает частоту технического обслуживания. В связи с этим разработка и внедрение новых методов охлаждения становятся приоритетным направлением для повышения эффективности электродвигателей.

### **Основная часть**

Обычные электродвигатели чаще всего используют воздушное охлаждение. Этот метод предполагает циркуляцию воздуха через двигатель, что позволяет удалять излишки тепла, возникающие в процессе работы. Однако эффективность этого способа ограничена низкой теплоемкостью воздуха, что создает трудности при охлаждении мощных электродвигателей, где выделение тепла значительно превышает возможности воздушного охлаждения.

Жидкостное охлаждение представляет собой более эффективный способ отвода тепла. В отличие от воздуха, жидкость обладает высокой теплоемкостью, что позволяет более эффективно удалять тепло от горячих компонентов электродвигателя. В современных жидкостных системах охлаждения используются как вода, так и специализированные жидкости, такие как масла и диэлектрические жидкости.

Эти жидкости, например, на основе фторуглеродов, не проводят электрический ток и могут напрямую контактировать с электрическими компонентами двигателя, что позволяет улучшить теплоотвод без риска электрических повреждений. Преимущества этих жидкостей особенно проявляются в двигателях для электротранспорта, где компактные размеры и высокая производительность играют ключевую роль.

Современные научные достижения способствуют появлению инновационных методов охлаждения, которые позволяют значительно повысить эффективность электродвигателей.

Одним из таких методов является испарительное охлаждение, которое использует фазовый переход жидкости из жидкого состояния в газообразное. Это обеспечивает более эффективное удаление тепла с поверхности двигателя. Технологии испарительного охлаждения находят применение в двигателях высокой мощности и при высоких температурных нагрузках.

В системе испарительного охлаждения жидкость, поступающая из неподвижной трубки с одного конца ротора, направляется на противоположный конец с плавными контурами. Этот конец формирует тонкую пленку жидкости, движущуюся вдоль ротора под действием сил поверхностного натяжения.

Такое выполнение системы повышает интенсивность охлаждения, что особенно важно для авиационных электрических машин в связи с высотными и скоростными ограничениями воздушного охлаждения для них.

На рисунке 1 изображена схема описываемой системы.

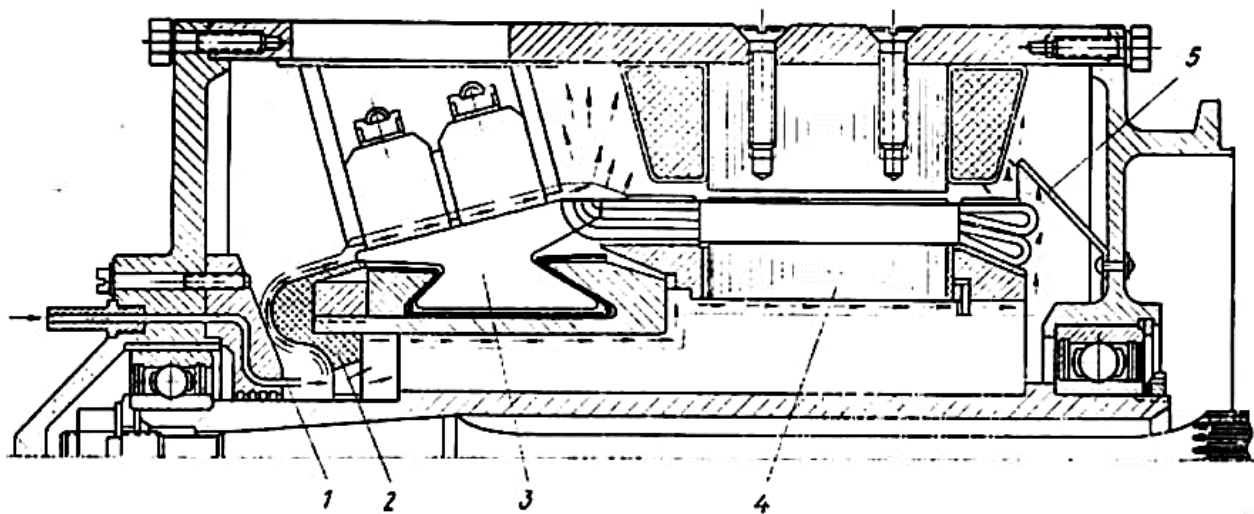


Рисунок 1 – Схема системы испарительного охлаждения

Охлаждающая жидкость вводится внутрь машины через трубку 1. С помощью распределителя 2 часть жидкости направляется на рабочую поверхность коллектора 3, а другая часть проходит внутри пакета железа якоря 4. Под действием центробежных сил и сил поверхностного натяжения введенная внутрь машины жидкость распределяется тонким равномерным слоем - пленкой по активным частям якоря и по рабочей поверхности коллектора (направление перемещения пленки показано стрелками). Во избежание срыва жидкостной пленки с начального участка коллектора его рабочая поверхность выполнена конусной. При использовании в качестве охлаждающей жидкости воды угол

наклона рабочей поверхности коллектора к оси вращения должен быть порядка  $15^\circ$ . Охлаждение лобовых частей полюсных катушек осуществляется за счет части неиспарившейся на якоре жидкости, которая сбрасывается и распыляется центробежными силами в зоне петушков коллектора 3 и отражательного диска 5.[1]

Другим перспективным направлением является использование тепловых труб. Эти устройства позволяют эффективно передавать тепло от горячих компонентов двигателя к холодным частям. Как показано на рисунке 2, тепловые трубы представляют собой герметичные конструкции, внутри которых находится жидкость, которая испаряется при нагреве и конденсируется в более холодных участках. Это способствует быстрому и эффективному отводу тепла.

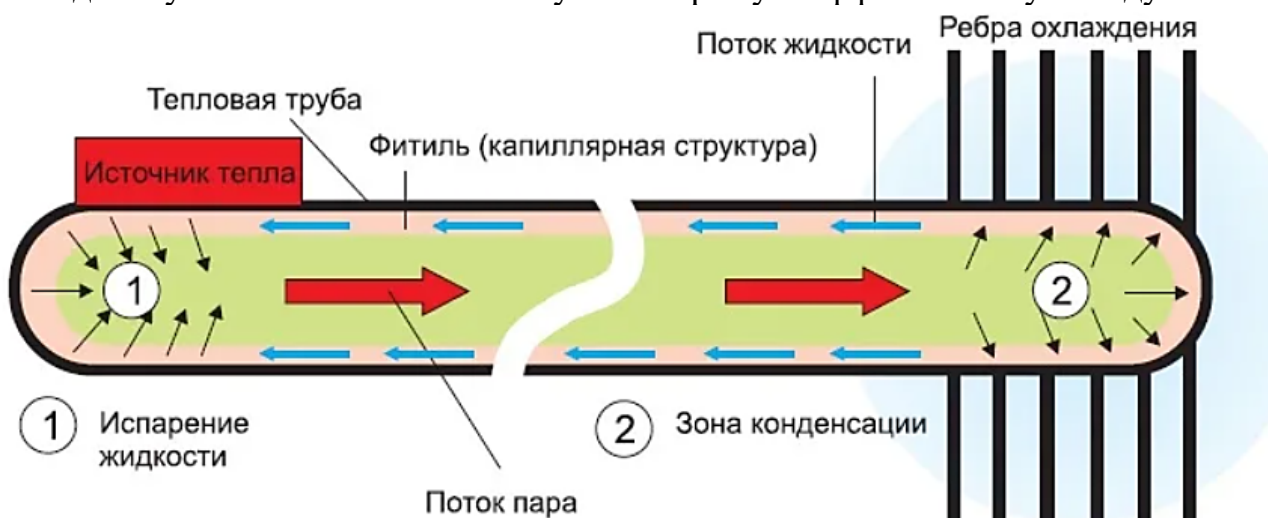


Рисунок 2 – Устройство тепловой трубы

При работе электродвигателя транспортного средства интенсивное тепловыделение происходит как в статоре двигателя, так и его роторе. Нагрев двигателя отрицательно сказывается на величине крутящего момента и на общей эффективности работы магнитов.

Система охлаждения электродвигателей с тепловыми трубами позволяет обеспечить эффективную теплопередачу. Она более надежна в эксплуатации, поскольку отсутствуют движущие компоненты, обеспечены прочная конструкция и небольшой вес. [2]

На рисунке 3 показано применение тепловых труб для охлаждения статора двигателя, где 1 – обмотка; 2 – оболочка статора; 3 – сердечник статора; 4 – охлаждающий воздух; 5 – ребра, рассеивающие тепло; 6 – плоская тепловая труба; 7 – направление теплового потока. Плоские тепловые трубы вставлены между слоями электрической обмотки статора двигателя для отвода более 300 Вт теплоты при поддержании температуры источника тепловыделения ниже его предела равного  $180^\circ\text{C}$ .

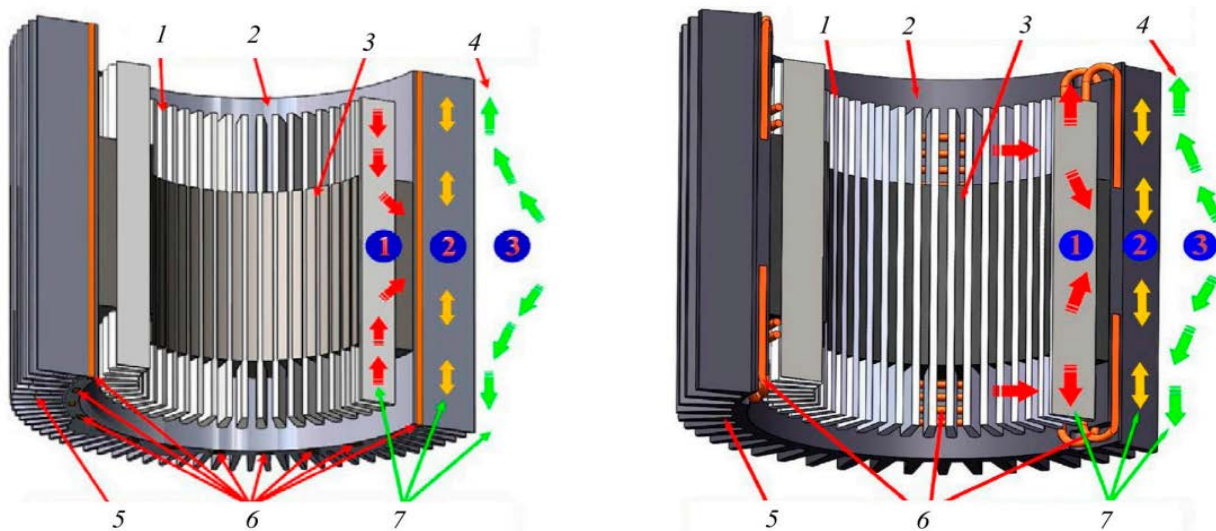


Рисунок 3 – Охлаждение статора двигателя тепловыми трубами

Тепловые трубы автономны, бесшумны, их работа не требует затрат энергии, что очень важно для беспроводного электротранспорта. С помощью тепловых труб можно осуществлять более гибкую компоновку систем охлаждения, это облегчает задачу размещения радиатора. Упрощается также выполнение герметизации охлаждаемых объектов.

Нанотехнологии играют ключевую роль в разработке новых методов охлаждения.

Например, использование наноматериалов, таких как графен и углеродные нанотрубки, позволяет значительно улучшить теплопроводность электродвигателей. Графеновые покрытия обладают высокой теплопроводностью, что способствует более эффективному рассеиванию тепла с поверхности двигателей.

Кроме того, наноматериалы могут использоваться для создания умных покрытий, которые адаптируются к изменениям температуры и автоматически регулируют отвод тепла. Это особенно актуально для высокопроизводительных двигателей, работающих в условиях интенсивных температурных нагрузок. Такие покрытия повышают эффективность охлаждения, предотвращают перегрев и способствуют увеличению срока службы двигателей.

Современные аддитивные технологии, включая 3D-печать, предоставляют новые возможности для создания интегрированных систем охлаждения. 3D-печать позволяет встроить охлаждающие каналы прямо в конструкцию двигателя, что способствует снижению веса и уменьшению объема системы охлаждения. Например, на рисунке 4 показан электродвигатель, разработанный в производственном технологическом центре Ковентри, Великобритания.[3]



Рисунок 4 – Электродвигатель, изготовленный из компонентов, напечатанных на 3D-принтере.

Увеличение популярности электромобилей ускоряет разработку более мощных и высокотехнологичных электрических двигателей. Производители электромобилей сталкиваются с необходимостью преодолеть проблемы, связанные с охлаждением, разрабатывая решения, которые обеспечивают высокую тепловую эффективность, равномерное распределение температуры, а также учитывают компактные размеры, вес и затраты.

Использование аддитивных технологий в производстве для электрических машин будет играть важную роль в обеспечении инновационного подхода к проблемам охлаждения электромобилей.

Обмотки электрических машин могут охлаждаться напрямую с использованием керамических теплообменников, созданных с помощью 3D-печати. Эти теплообменники размещаются в свободном пространстве между двухслойными сосредоточенными обмотками, что позволяет увеличить плотность мощности электрических машин без воздействия на их электромагнитную конструкцию. Например: обмотки, напечатанные на 3D-принтере показаны на рисунке 5.



Рисунок 5 – 3D-печатные обмотки

Основной вклад аддитивных технологий в сборку обмоток включают следующее:

- площадь поперечного сечения катушки обмотки может быть рассчитана с более высоким коэффициентом заполнения паза, а также с лучшими тепловыми характеристиками;
- торцевые обмотки могут быть изготовлены по индивидуальному заказу до 50% их длины. Это значительно помогает уменьшить вес и объем машины;
- некоторые технологии позволяют печатать обмотку и изоляцию одновременно;
- более высокая рабочая температура может быть достигнута за счет использования порошкообразных термостойких материалов, таких как керамика, вместо обычного покрытия (эмаль, смола, полимер и т. д.).

Обработка таких материалов, как керамика, обычными методами затруднена из-за высокой температуры плавления.

Производство электродвигателей имеет ряд проблем, включая сложную сборку, нужду в материалах, которые трудно обрабатывать и которые могут быть дорогими, а также необходимость улучшения процесса сборки. Применение технологии аддитивного производства позволяет снизить издержки, сократить отходы, повысить производительность и упростить производственные процессы.

Электротранспорт является одной из ключевых областей применения новых технологий охлаждения. Электродвигатели для электромобилей работают в условиях высоких нагрузок и требуют надежного охлаждения для поддержания производительности. Компактные и эффективные системы жидкостного и испарительного охлаждения позволяют увеличивать мощность двигателей, при этом снижая их энергопотребление и увеличивая ресурс работы. Компании, такие как Tesla, активно внедряют передовые технологии охлаждения в свои двигатели для электромобилей, что способствует повышению их КПД и надежности. Использование жидкостного охлаждения и нанотехнологий позволяет улучшить температурный режим работы двигателей, обеспечивая длительные поездки и высокие скорости без риска перегрева.

### **Заключение**

Таким образом, современные технологии охлаждения открывают значительные перспективы для повышения эффективности электродвигателей. Жидкостные и испарительные системы охлаждения, тепловые трубы, наноматериалы и аддитивные технологии предоставляют возможности для разработки более мощных, компактных и надежных двигателей. Эти инновации имеют большое значение как для промышленного применения, так и для электротранспорта, способствуя устойчивому развитию и улучшению энергетической эффективности. Внедрение новых методов охлаждения позволит электродвигателям работать с повышенной производительностью и надежностью, что играет важную роль в снижении энергопотребления и повышении экологичности технологий будущего.

### Литература

1. Система испарительного охлаждения электрических машин : пат SU 450287 А1 / В.А. Винокуров, Г.И. Данилов, А.В. Колганов, А.Б. Романов. – Оpubл. 15.11.1974.
2. Системы терморегулирования теплонагруженного оборудования электротранспорта / Л.Л. Васильев, А.С. Журавлев, С.Н. Поддубко, А.В. Белевич // Тепловые процессы в технике. –2021. – Т. 13, №7. – С. 296–307
3. Образовательный сайт Школа для электрика [Электронный ресурс]: Аддитивные технологии производства деталей электрических машин. – Режим доступа: <https://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/2768-additivnoe-proizvodstvo-elektricheskikh-mashin.html>. – Дата доступа: 15.10.2024.