

## РАЗДЕЛ 2. МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.313.2

### ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ЗАПОЛНЕННЫХ ЖИДКИМИ ДИЭЛЕКТРИКАМИ

А.А. Лубсанов, А.П. Хаптаев, Л.О. Чмелева

*Статья посвящена определению предельных электромагнитных нагрузок специальных электрических двигателей постоянного тока, заполненных жидкими диэлектриками. Показано, что для максимальной загрузки двигателя по току можно ввести фактор нагрева по принципу, сходному с критерием тепловой загрузки якоря машин общего применения. Получены предельные по нагреву значения плотностей тока в обмотках из проводов различного сечения. Также рассмотрено влияние типа заполняющей жидкости на тепловые характеристики двигателей.*

*Ключевые слова:* Электродвигатели постоянного тока, токовые нагрузки, температура обмоток.

#### ВВЕДЕНИЕ

Двигатели постоянного тока, заполненные жидкими диэлектриками (ДПТД) используются в приводе различных подводных аппаратов [1]. Жидкий диэлектрик (керосин, дизельное топливо, трансформаторное масло) необходим для компенсации внешнего давления. Для таких двигателей особенно актуальными являются вопросы нагрева и допустимых электромагнитных нагрузок. Поскольку жидкий диэлектрик ведет к улучшению охлаждения активных частей электродвигателя применительно к ним можно существенно увеличить удельные электромагнитные и токовые нагрузки по сравнению с двигателями общего применения. В данной работе рассматриваются предельные границы увеличения удельных электромагнитных и токовых нагрузок.

Обычно мощность ДПТД зависит от поперечных размеров двигателя. Однако, при увеличении диаметра при одних и тех же значениях электромагнитных нагрузок, уровень нагрева обмоток повышается. Связано это с тем, что при увеличении поперечных размеров двигателя происходит опережающий рост электрических и гидродинамических потерь по сравнению с увеличением его теплоотдающей поверхности. При увеличении же продольных размеров двигателя рост потерь пропорционален увеличению теплоотдающей поверхности. Кроме того, для ДПТД с естественным внешним охлаждением при

увеличении его диаметра уменьшается коэффициент теплоотдачи корпуса [2]. Частота вращения якоря оказывает влияние на значения допустимых нагрузок потому что, с одной стороны, определяет интенсивность внутреннего охлаждения, а с другой - уровень гидродинамических потерь трения. Обмотки ДПТД, выполненные из проводов прямоугольного и круглого сечения, также допускают разные токовые нагрузки. Допустимая плотность тока для обмоток из прямоугольного провода выше, чем плотность тока обмоток из проводов круглого сечения, поскольку последние имеют более низкие значения коэффициента теплопроводности. Тип жидкого диэлектрика, основными характеристиками которого является вязкость и нагревостойкость, также влияет на допустимые нагрузки.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты тепловых расчетов двигателей показывают, что при изменении значений электромагнитных нагрузок наибольшее влияние на уровень и характер распределения температуры обмотки якоря оказывают именно потери в меди [2]. Таким образом, с точки зрения нагрева при существующих повышенных плотностях тока в обмотках якоря ДПТД, значения допустимых магнитных нагрузок в сердечнике якоря (индукций) могут не определяться по тепловому состоянию обмоток.

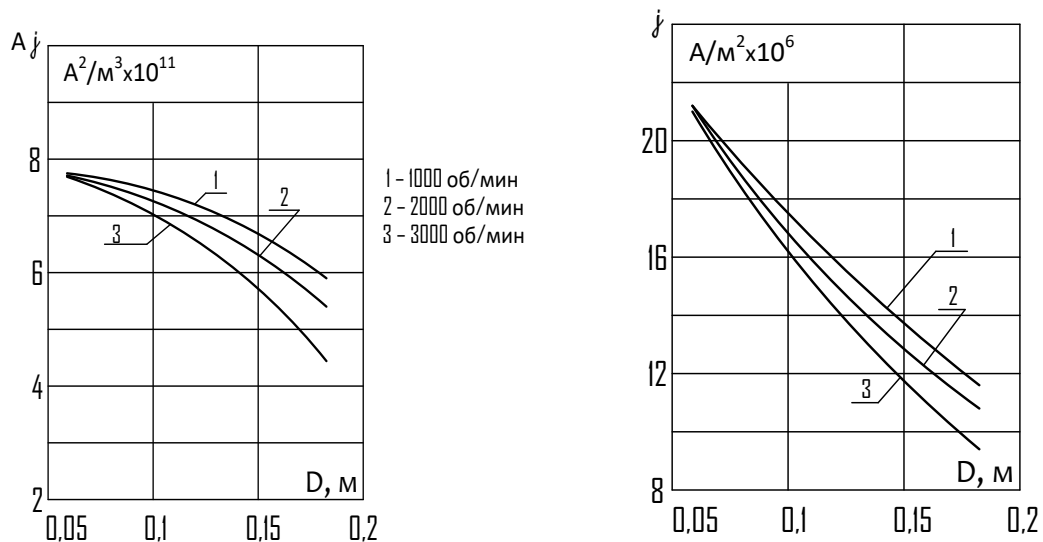


Рисунок 1 - Предельные по нагреву значения критерия  $Aj$  и плотности тока  $j$  обмотки якоря ДПТД заполненных керосином и дизельным топливом (провода прямоугольного сечения)

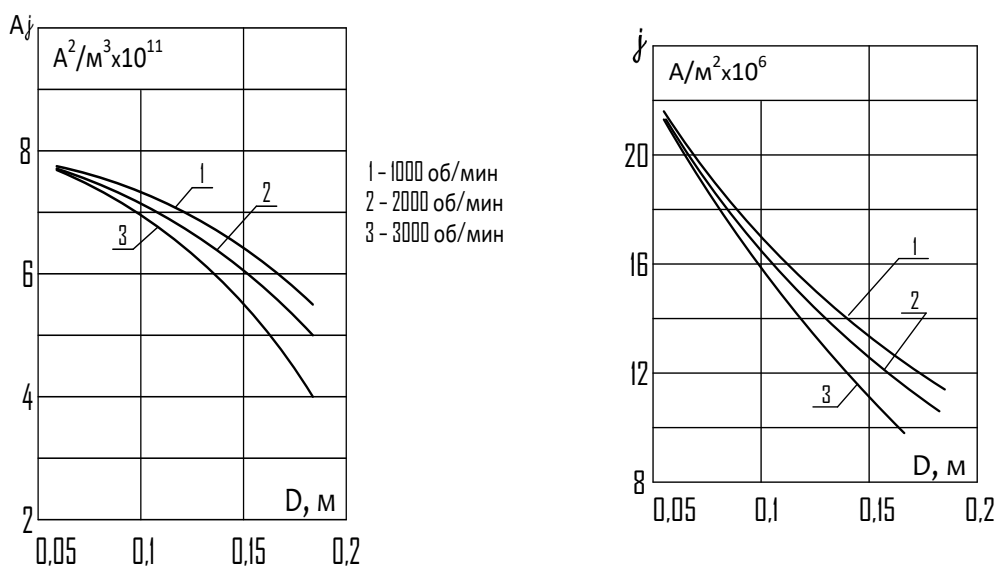


Рисунок 2 - Предельные по нагреву значения критерия  $Aj$  и плотности тока  $j$  обмотки якоря ДПТД заполненных трансформаторным маслом (провода прямоугольного сечения)

Функциональные зависимости, связывающие в явном виде токовые нагрузки с основными параметрами ДПТД, практически получить невозможно. Поэтому задача нахождения предельных токовых нагрузок в зависимости от перечисленных выше факторов решена на основании серии тепловых расчетов ДПТД разной мощности. Объектами анализа служили двигатели, заполненные керосином, ди-

зельным топливом и трансформаторным маслом.

Диапазон мощностей от 0,2-20,0 кВт, частоты вращения якоря 1000-3000 об/мин, напряжения питания 14-110 В, изоляционные материалы класса нагревостойкости В. Увеличение частоты вращения якоря в большей мере способствует

## ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ЗАПОЛНЕННЫХ ЖИДКИМИ ДИЭЛЕКТРИКАМИ

росту гидродинамических потерь трения, нежели повышению интенсивности внут-

реннего теплообмена и, поэтому, ведет к снижению допустимых значений  $A_j$  и  $j$ .

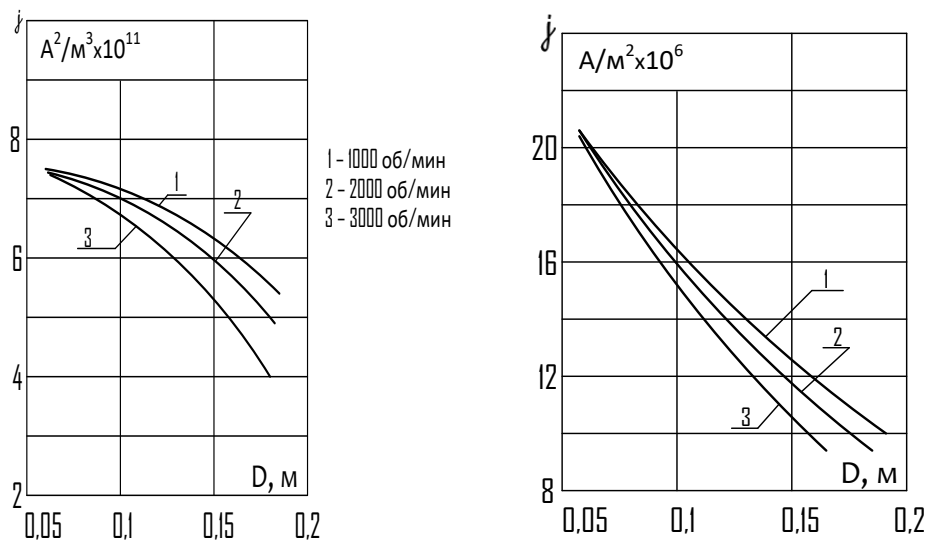


Рисунок 3 - Предельные по нагреву значения критерия  $A_j$  и плотности тока  $j$  обмотки якоря ДПТД заполненных керосином и дизельным топливом (провода круглого сечения)

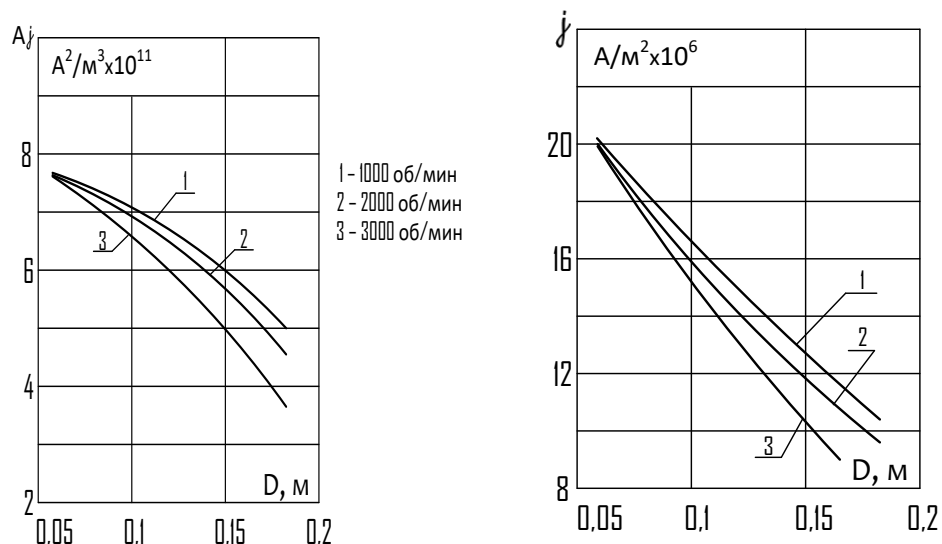


Рисунок 4 - Предельные по нагреву значения критерия  $A_j$  и плотности тока  $j$  обмотки якоря ДПТД заполненных трансформаторным маслом (провода круглого сечения)

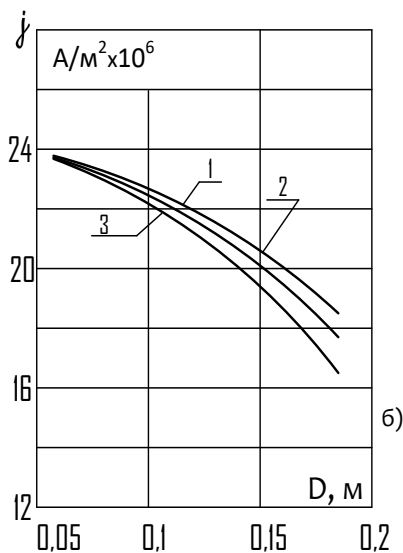
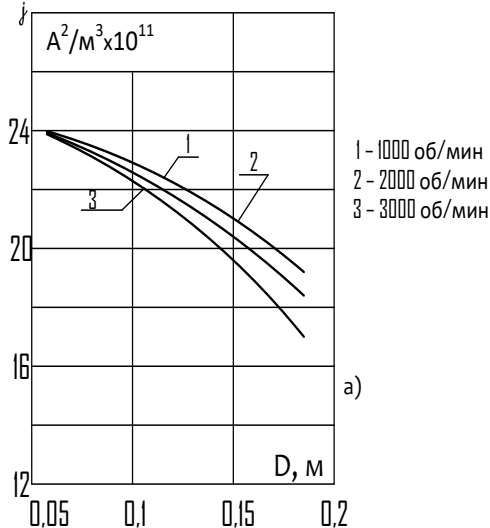
На рисунках 1-4 представлена картина изменения допустимых значений критерия тепловой загрузки якоря  $A_j$  и плотности тока  $j$  в обмотке якоря в функции диаметра якоря и других факторов.

Как следует из рисунков, увеличение диаметра якоря резко отражается на допустимых значениях  $A_j$  и  $j$ . Значения  $A_j$  и  $j$  для двигателей, заполненных керосином и дизельным топливом получились почти рав -

ными, так как их коэффициенты вязкости различаются мало.

Увеличение частоты вращения якоря в большей мере способствует росту гидродинамических потерь трения, нежели повышению интенсивности внутреннего теплообмена и, поэтому, ведет к снижению допустимых значений  $A_j$  и  $j$ .

На рис.5 приведены предельные значения плотностей тока  $j$  в полюсных обмотках из прямоугольного провода.



б

Рисунок 5 - Предельные по нагреву значения плотностей тока  $j$  в полюсных обмотках из прямоугольного провода: а) заполнение керосином; б) заполнение трансформаторным маслом

Характер изменения плотностей тока здесь примерно соответствует показанному на рисунках 1-4, однако скорость их изменения в зависимости от диаметра и частоты вращения якоря и типа жидкого диэлектрика несколько ниже; ввиду наличия непосредственной тепловой связи полюсных обмоток с заборной окружающей средой через тело полюсов и станину повышение их температуры отстает от повышения температуры якоря.

Для определения допустимых токовых нагрузок полюсных обмоток для учета их нагрева от собственных потерь (в меди) вводится фактор нагрева  $K_t$  по принципу, сходному с принятым для машин общего применения критерием тепловой загрузки якоря, который можно представить следующим образом:

$$K_t = j^2 S K_M,$$

где  $S$  – площадь сечения обмотки;  $K_M$  – коэффициент заполнения сечения обмотки медью.

На рисунке 6 приведены допустимые по нагреву значения критерия  $K_t$  полюсных обмоток ДПТД. Как видно, по аналогии с характером кривых на рисунках 1-4, наблюдается снижение значений  $K_t$  с увеличением диаметра и частоты вращения якоря и вязкости жидкого диэлектрика, однако скорость изменения также ниже. По величине  $K_t$ , найденной для ДПТД с конкретными параметрами, определяется допустимое значение плотности тока в обмотке. Размеры обмотки при этом ориентировочно выбираются в зависимости от диаметра якоря и размеров станины, а коэффициент  $K_M$  зависит от способа укладки проводов [3].

## ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ЗАПОЛНЕННЫХ ЖИДКИМИ ДИЭЛЕКТРИКАМИ

### ВЫВОДЫ

Расчеты нагрева обмоток ДПТД, плотность тока в которых была выбрана по фактору нагрева  $K_t$ , показали, что их максимальная температура не превышает допустимые значения. При этом обеспечивается максимальное использование обмоток разных размеров поперечного сечения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Токарев Б.Ф., Морозкин В.П., Тодос П.И. Двигатели постоянного тока для подводной техники. – М.: Энергия, 1977. - 184 с.
2. Лубсанов А.А. К тепловому расчету погружных двигателей постоянного тока. Электричество, 1990, №10, с.14-18.
3. Лубсанов А.А. Тепловой расчет электродвигателя постоянного тока с жидкостным заполнением. Изв.АН СССР - Энергетика и транспорт, 1990, №3, с.97-103.

**Лубсанов Александр Алексеевич**, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО ВСГУТУ, тел.: 89025642502, e-mail: [taty.lubsanova@yandex.ru](mailto:taty.lubsanova@yandex.ru).

**Хаптаев Алексей Павлович**, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО ВСГУТУ, тел.: 89503968741, e-mail: [aerp@list.ru](mailto:aerp@list.ru).

**Чмелева Лариса Олеговна**, ст.преподаватель, ФГБОУ ВО ВСГУТУ, тел.: 89516378637, e-mail: [chlari@mail.ru](mailto:chlari@mail.ru)

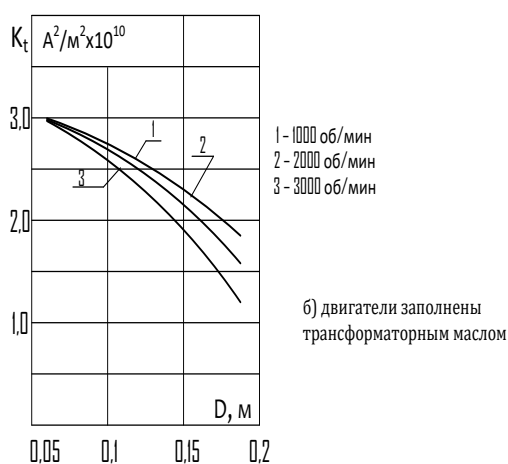
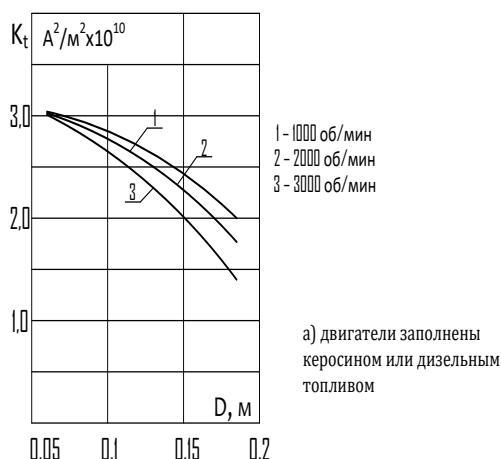


Рисунок 6 - Пределные по нагреву значения фактора нагрева  $K_t$  многослойных обмоток возбуждения из проводов круглого сечения: а) двигатели заполнены керосином или дизельным топливом; б) двигатели заполнены трансформаторным маслом