

## **1.11. Потери и коэффициент полезного действия**

При работе ЭМ часть потребляемой ею энергии теряется бесполезно и рассеивается в виде тепла. Мощность потерянной энергии называют *потерями мощности* или просто *потерями*.

Потери в ЭМ подразделяются на основные и добавочные. *Основные потери* возникают в результате происходящих в ЭМ основных электромагнитных и механических процессов, а *добавочные потери* обусловлены различными вторичными явлениями.

Во вращающихся ЭМ **основные**  
**потери** подразделяются на:

1. механические потери
2. магнитные потери (потери в стали)
3. электрические потери.

К электрическим потерям относятся потери в обмотках, которые называются также потерями в меди, хотя обмотки и не всегда изготавливаются из меди; потери в регулировочных реостатах и потери в переходном сопротивлении щеточных контактов.

$$P_{\text{э}} = m \cdot I^2 \cdot r$$

Так же рассчитываются электрические потери и в МПТ, при этом  $m=1$ .

Электрические потери в скользящем контакте зависят от сорта щеток и состояния контактных поверхностей:

$$P_{\text{эл.щ.}} = m \cdot \Delta U_{\text{щ}} \cdot I$$

## **Механические потери состоят из:**

- 1) потерь в подшипниках
- 2) потерь на трение щеток о коллектор или контактные кольца
- 3) вентиляционные потери.

Механические потери зависят от частоты вращения машины и не зависят от ее нагрузки.

При проектировании ЭМ каждая составляющая механических потерь рассчитывается отдельно. Приблизительно можно считать, что механические потери пропорциональны квадрату частоты вращения.



Так потери на трение зависят от плотности и вязкости среды, в которой вращается ротор ЭМ. При заполнении ЭМ водородом механические потери уменьшаются примерно в 10 раз по сравнению с потерями в воздухе.

**Вентиляционные потери** определяются мощностью, которая расходуется на циркуляцию теплоносителя в ЭМ. Она зависит от количества воздуха, водорода или жидкости, отводящих тепло из машины, и от КПД вентилятора или насоса.

**Магнитные потери** включают в себя потери на гистерезис и вихревые токи, вызванные перемагничиванием сердечников активной стали.

К магнитным потерям относят также такие добавочные потери, которые зависят от значения основного магнитного потока и вызваны зубчатым строением сердечников. Эти потери иногда называют также добавочными потерями холостого хода, т.к. они существуют в возбужденной машине уже при х.х.

Магнитные потери зависят от марки стали , толщины листов магнитопровода, индукции и частоты перемагничивания. Значительное влияние на магнитные потери оказывают технологические факторы: штамповка листов, прессовка пакетов, механическая обработка магнитопровода.

При определении магнитных потерь пользуются приближенной формулой

$$P_m = k_{\text{обр}} \cdot \rho_{\text{уд}} \cdot (f/50)^{\beta} \cdot B_i^2 \cdot G_i$$

где  $k_{\text{обр}}$  – коэффициент обработки, зависящий от обработки стали (для АД: 1,4-1,8);

$\rho_{\text{уд}}$  - удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции 1 Тл, Вт/кг;

$f$  - частота перемагничивания, Гц;

$B_i$  - индукция в соответствующей части магнитопровода;

$G_i$  - масса части магнитопровода, где индукция магнитного потока  $B_i$ , кг;

$\beta$  - показатель степени, зависящий от марки стали.

К магнитным потерям в МПТ относятся и поверхностные потери в полюсных наконечниках, обусловленные зубчатостью якоря. Кроме того, к магнитным потерям относятся пульсационные потери в зубцах якоря. Таким образом общие магнитные потери состоят из:

- 1) потери на гистерезис
- 2) потери в стали
- 3) поверхностные потери
- 4) пульсационные потери

**Добавочные потери.** К этой группе потерь относят потери, вызванные различными вторичными явлениями при нагрузке машины. Поэтому указанные потери, зависящие от тока нагрузки, называют иногда добавочными потерями при нагрузке.

В МПТ одна часть рассматриваемых потерь возникает вследствие искажения кривой магнитного поля в воздушном зазоре при нагрузке под влиянием поперечной реакции якоря. В результате этого магнитный поток распределяется неравномерно.



Такое неравномерное распределение магнитного потока вызывает увеличение магнитных потерь. При наличии компенсационной обмотки рассмотренная часть добавочных потерь практически отсутствует.

Другая часть добавочных потерь в МПТ связана с коммутацией.

Расчет добавочных потерь производят для крупных ЭМ. Для ЭМ общепромышленной серии добавочные потери, согласно ГОСТ, принимаются равными **0,5 – 1 %** номинальной мощности.

Таким образом, суммарные или полные потери представляют собой сумму:

- 1) механических потерь
- 2) магнитных потерь
- 3) электрических потерь
- 4) добавочных потерь

**Коэффициент полезного действия** определяется как отношение полезной, или отдаваемой, мощности к потребляемой мощности

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Кривая КПД ЭМ от отдаваемой мощности приведена на рис.1.24. Из графика очевидно, что кривая КПД сначала быстро растет с увеличением нагрузки, затем КПД достигает максимума (при нагрузке близкой к номинальной) и при больших нагрузках – уменьшается.

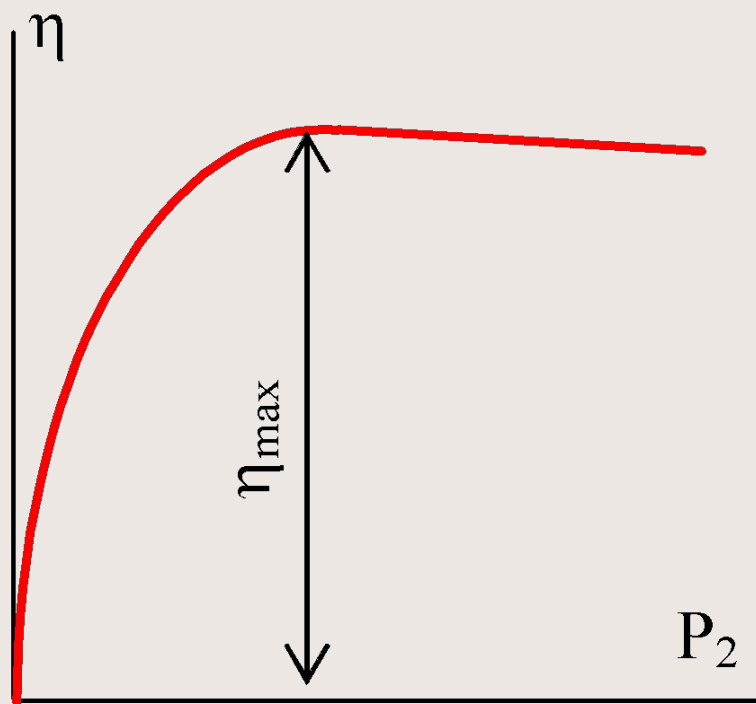


Рис. 1.24.

# 1.12. Нагрев и охлаждение ЭМ

---

## 1.12.1. Теплопередача в ЭМ

Потери энергии вызывают выделение тепла и нагревание частей ЭМ. Передача тепла от более нагретых частей ЭМ к менее нагретым и в окружающую среду происходит путем теплопроводности, лучеиспускания и конвекции.

Теплопередача путем теплопроводности в ЭМ происходит внутри твердых тел (медь, сталь, изоляция), в то время как в газах (воздух, водород) и в жидкостях (масло, вода) главное значение имеет передача тепла конвекцией. Для более интенсивного отвода тепла обычно применяют обдув внутренних, а иногда и внешних поверхностей ЭМ воздухом

## 1.12.2. Нагревание и охлаждение идеального однородного твердого тела

**Уравнение нагревания.** В основу анализа процесса нагревания ЭМ положена теория нагревания идеального однородного твердого тела, под которым понимается тело, обладающее рассеиванием тепла со всей поверхности и бесконечно большой теплопроводностью, вследствие чего все точки тела имеют одинаковую температуру.



Для составления дифференциального уравнения нагревания такого тела рассмотрим его тепловой баланс.

Пусть в единицу времени в теле выделяется количество теплоты  $Q$ . Тогда за бесконечно малый промежуток времени выделяемое количество теплоты будет равно  $Qdt$ . Эта теплота частично аккумулируется в теле при повышении температуры и частично отдается во внешнюю среду.

Если за время  $dt$  температура тела повысилась на  $d\Theta$ , то количество аккумулируемой за это время теплоты равно

$$G \cdot c \cdot d\Theta$$

где  $G$  – масса тела и  $c$  – его удельная теплоемкость.

Пусть в рассматриваемом бесконечно малом промежутке времени превышение температуры тела над температурой окружающей среды равно  $\Theta$ . Тогда количество теплоты, отдаваемое в окружающую среду за время  $dt$  вследствие лучеиспускания, конвекции и теплопроводности, будет равно  $S \cdot \lambda \cdot \Theta dt$ , где  $S$  – площадь тела и  $\lambda$  - коэффициент теплоотдачи с поверхности.

На основе закона сохранения энергии

$$Qdt = G \cdot c d\Theta + S \cdot \lambda \cdot \Theta dt$$

Преобразуя полученное уравнение и введя понятие **постоянной времени нагревания T** (время, в течение которого температура тела достигла бы установившегося значения если отсутствовала передача тепла в окружающую среду и все выделяемое тепло накапливалось в теле) найдем решение в виде

$$\Theta = \Theta_{\text{уст}} (1 - e^{-t/T})$$

Кривые нагревания и охлаждения приведены на рис.1.25.

В действительности же ЭМ не представляет собой такого тела, т.к. состоит из различных частей, обладающих конечной теплопроводностью, причем теплопроводность электрической изоляции достаточно мала. Поэтому различные части ЭМ (обмотка, сердечники и др.) имеют различные температуры. Таким образом, кривые нагревания и охлаждения не являются экспоненциальными.

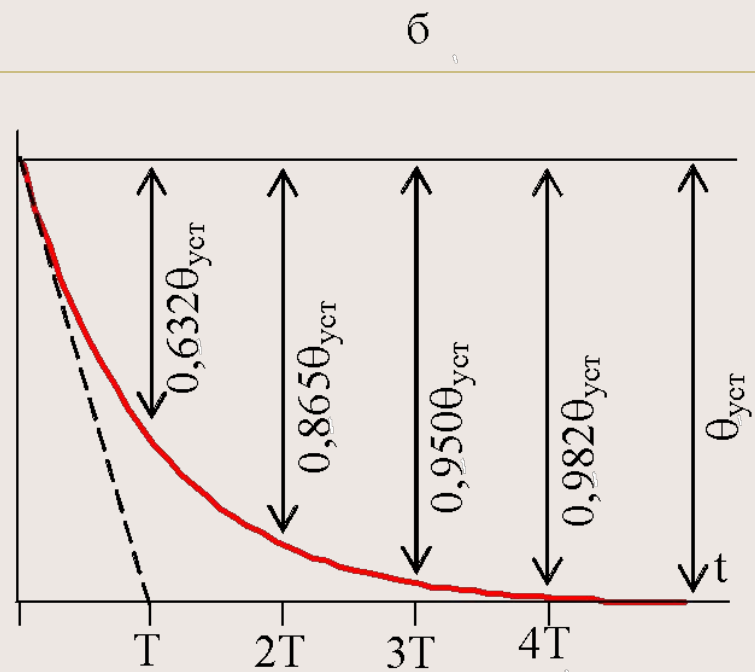
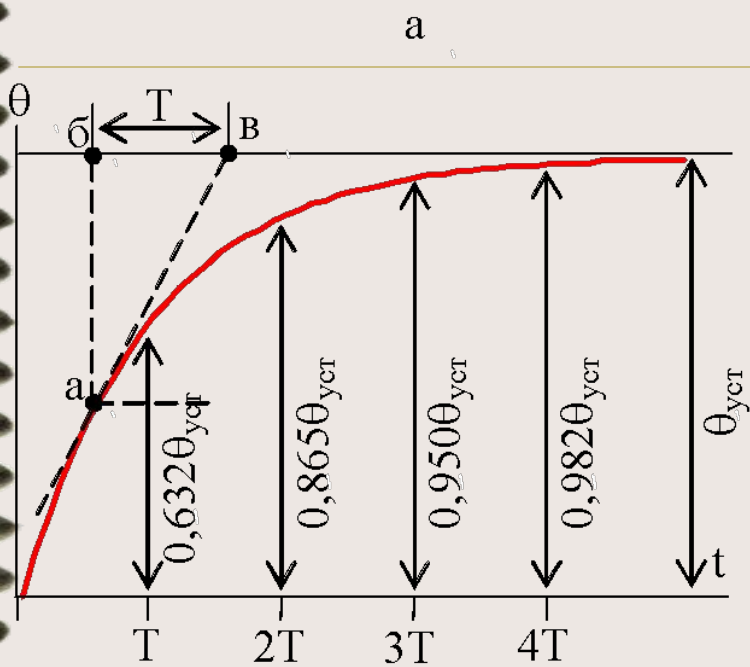


Рис. 1.25.

## 1.12.3. Основные номинальные режимы работы ЭМ

Согласно ГОСТ ЭМ изготавливаются для трех основных номинальных режимов работы.

**Продолжительный номинальный режим работы (S1)** ЭМ называется режим работы при неизменной номинальной нагрузке, продолжающейся столько времени, что превышения температуры всех частей ЭМ при неизменной температуре окружающей среды достигают практически установившихся значений.

**Кратковременным номинальным режимом работы (S2)** ЭМ называется режим работы, при котором периоды неизменной номинальной нагрузки при неизменной температуре окружающей среды чередуются с периодами отключения ЭМ: при этом периоды нагрузки не настолько длительны, чтобы превышения температуры всех частей ЭМ могли достигнуть установившихся значений, а периоды остановки ЭМ настолько длительны, что все части ее приходят в практически холодное состояние.



**Повторно-кратковременным номинальным режимом работы (S3) ЭМ** называется режим работы, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки при неизменной температуре окружающей среды чередуются с кратковременными периодами отключения ЭМ, причем как рабочие периоды, так и пауз не настолько длительны, чтобы превышения температуры отдельных частей ЭМ могли достигнуть установившихся значений.

ПКР характеризуется ПВ:

$$ПВ = t_{\text{раб}} / (t_{\text{раб}} + t_{\text{ост}})$$

Стандартные значения ПВ: 15%, 25%, 40%, 60%.

## 1.13. Материалы, применяемые в электромашиностроении

---

В ЭМ энергия магнитного поля сосредоточена в основном в воздушном зазоре. Чтобы сконцентрировать энергию в воздушном зазоре, необходимо иметь магнитопровод и обмотки, которые вместе с конструкционными материалами обеспечивают распределение электромагнитных, тепловых и механических полей в ЭМ.

Принято материалы, применяемые в ЭМ, делить на *активные* и *конструктивные*.

К **активным** относятся материалы обмоток и магнитопровода, а к **конструктивным** – изоляционные и материалы из которых выполняются станины, щиты, валы и другие части ЭМ.

Такое деление условно, т.к. во многих ЭМ совмещены активные и конструктивные функции отдельных частей ЭМ, например, в МПТ магнитный поток замыкается по станине.

Для изготовления магнитопровода ЭМ применяются листовая электротехническая сталь, стальное литье, чугун и магнитодиэлектрики.

*(Самостоятельно)*