

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

В.Н. Забоин

**РАСЧЕТ ПОТЕРЬ И К.П.Д. МАШИН
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Учебное пособие

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2006**

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

В.Н.Забоин

**РАСЧЕТ ПОТЕРЬ И К.П.Д. МАШИН
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Учебное пособие

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕСТОР»
2006

УДК 621.313.2.001.12

Забойн В.Н. Расчет потерь и к.п.д. машин постоянного тока. СПб.: Изд-во «НЕСТОР», 2006. 28 с.

В пособии рассмотрены вопросы расчетного определения составляющих электрических, магнитных, механических и добавочных потерь в машинах постоянного тока мощностью до 1000 кВт на стадии их проектирования.

Учебное пособие предназначено для студентов электротехнических специальностей, изучающих курс «Электрические машины» в рамках подготовки бакалавров по направлению 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

Табл. 1. . Библиогр.: 3 назв.

© Забойн В.Н., 2006

© Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2006

1. ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

1.1 Составляющие потерь.

При работе электромеханического преобразователя энергии часть подводимой к нему мощности P_1 теряется в самом преобразователе – электрической машине, выделяясь в виде тепла. Определение этой мощности, которую называют потерями, необходимо как с точки зрения нахождения к.п.д. $\eta = P_2/P_1$, так и для последующего расчета нагревания машины.

Полные потери $\sum P = P_2/P_1$ принято делить [1] на основные и добавочные потери. Основные потери связаны с основными электромагнитными и механическими процессами, определяющими работу машины. Добавочные потери обусловлены вторичными явлениями, главным образом, электромагнитного характера.

К основным потерям в машинах постоянного тока относят:

- электрические потери (потери в меди) в обмотках якорной цепи (якоря, добавочных полюсов, компенсационной, последовательного возбуждения), потери на возбуждение в обмотках независимого или параллельного возбуждения, потери в щеточных контактах;
- магнитные потери (потери в стали) на гистерезис и вихревые токи в ферромагнитных элементах конструкции машины;
- механические потери на трение в подшипниках, трение щеток о коллектор, трение ротора о воздух и потери на вентиляцию.

Добавочные потери возникают вследствие большого числа причин сложной физической природы. Наиболее значительными из них являются потери в обмотке якоря на вихревые токи от поперечной составляющей магнитного поля в пазах, коммутационные потери от добавочных токов в коммутируемых секциях, потери в стали якоря из-за искажения распределения результирующего магнитного поля под нагрузкой в некомпенсированных машинах, пульсацион-

ные потери на поверхности полюсных наконечников, вызванные зубчатостью якоря и самих наконечников в компенсированных машинах [1].

1.2. Потери в обмотках якорной цепи.

Основные потери в обмотках якорной цепи рассчитываются как

$$P_{ма} = I_a^2 \cdot (r_a + r_d + r_k + r_{nc}) \cdot \kappa_{\theta_c} = I_a^2 \cdot r_{ац} \cdot \kappa_{\theta_c}, \quad (1.1)$$

где r_a – сопротивление обмотки якоря, r_d – добавочных полюсов, r_k – компенсационной обмотки, r_{nc} – последовательной (серийной) обмотки возбуждения при температуре $\theta = 20^\circ C$.

Поскольку температуры отдельных обмоток в номинальном режиме заранее неизвестны, то сопротивления, входящие в (1.1), приводятся, в зависимости от класса нагревостойкости изоляции обмоток, к соответствующей стандартной температуре путем умножения на температурный коэффициент κ_{θ_c} . Для класса нагревостойкости В κ_{θ_c} принимается равным 1.22 при стандартной рабочей температуре $\theta_c = 75^\circ C$, а для классов F и H $\kappa_{\theta_c} = 1.38$ при $\theta_c = 115^\circ C$. Такое приведение сопротивления якорной цепи $r_{ац}$ к температуре θ_c делается как при расчете потерь и к.п.д., так и при расчете падения напряжения $I_a \cdot r_{ац\theta}$ и рабочих характеристик машины.

1.3. Потери в цепях обмоток независимого или параллельного возбуждения.

В цепях обмоток независимого или параллельного возбуждения, как правило, имеются внешние дополнительные сопротивления, служащие для регулирования тока возбуждения. Поэтому при расчете потерь на возбуждение и к.п.д. машин учитываются электрические потери и в этих сопротивлениях. Тогда

$$P_{\epsilon} = U_{\epsilon} \cdot i_{\epsilon}, \quad (1.2.a)$$

где U_{ϵ} – напряжение питания цепи возбуждения.

Для расчета нагревания обмоток возбуждения интерес представляют потери только в самих обмотках возбуждения

$$P_{\epsilon 0} = i_{\epsilon}^2 \cdot r_{\epsilon} \cdot \kappa_{\theta_c}, \quad (1.2.б)$$

где r_{θ} – сопротивление обмоток при 20°C , а $\kappa_{\theta c}$ – температурный коэффициент приведения (увеличения сопротивления), рассмотренный выше в 1.2.

1.4. Электрические потери в щеточном контакте.

Падение напряжения в щеточном контакте $U_{щ}$, особенно для графитных и электрографитированных щеток, в широком диапазоне рабочих (расчетных) плотностей тока $j_{щ}$ изменяется незначительно [1]. При этом электрические потери в щеточном контакте рассчитываются как

$$P_{щк} = 2 \cdot U_{щ} \cdot I_a, \quad (1.3)$$

где $2 \cdot U_{щ}$ – падение напряжения в контакте щеток на обе полярности. Величина $2 \cdot U_{щ}$ может быть принята для выбранной марки щеток по табл. П-24 [2]. При расчете $P_{щк}$ допускается приближенно считать $2 \cdot U_{щ} = 2\text{В}$ для электрографитированных и 0.6 В для металлографитных щеток.

1.5. Основные потери в стали якоря.

Основные потери в стали якоря возникают в его зубцах и сердечнике. Они состоят из потерь на гистерезис, пропорциональных первой степени частоты перемагничивания $f = p \cdot n$ (где n – в об/с), и потерь на вихревые токи, пропорциональных f^2 . Таким образом, суммарные потери в стали зависят от f^{β} , где $1 < \beta < 2$. Как известно, обе составляющие потерь на перемагничивание можно считать пропорциональными B^2 . Удельные магнитные потери на единицу массы (Вт/кг), например $p_{1.0/50}$ при $B = 1\text{ Тл}$ и $f = 50\text{ Гц}$, устанавливаются государственными и отраслевыми стандартами для разных марок стали и толщин листов (см. табл. П-11 [2]).

В процессе изготовления якоря сталь подвергается резке, штамповке, прессовке, опиловке, обточке и другим технологическим операциям, что приводит к увеличению потерь в стали. Кроме того, вращательное перемагничивание стали происходит в магнитном поле с несинусоидальной формой изменения индук-

ции. Строго учесть влияние всех этих факторов принципиально невозможно. Поэтому увеличение потерь в стали якоря из-за указанных причин обычно производится путем введения поправочного (технологического) коэффициента k_{cm} , установленного на основе большого опыта производства машин подобного типа. Среднее значение k_{cm} для якорей машин постоянного тока составляет 2.3.

С учетом изложенного, общее выражение для расчета потерь в стали i -ой части якоря имеет следующий вид:

$$p_{ci} = k_{cm} \cdot p_{1.0/50} \cdot (f/50)^\beta \cdot B_i^2 \cdot m_{ci}, \quad (1.4)$$

где m_{ci} – масса рассматриваемой части якоря в кг.

Для зубцового слоя якоря

$$p_{cz} = 2.3 \cdot p_{1.0/50} \cdot (f/50)^\beta \cdot B_{zcp}^2 \cdot m_{cz}, \quad (1.4.a)$$

для сердечника якоря

$$p_{ca} = 2.3 \cdot p_{1.0/50} \cdot (f/50)^\beta \cdot B_a^2 \cdot m_{ca}. \quad (1.4.б)$$

Здесь массы зубцов и сердечника якоря могут быть рассчитаны по формулам:

– при прямоугольных пазах

$$m_{cz} = g_{Fe} \cdot z_a \cdot b_{z2} \cdot h_n \cdot l_a \cdot k_{Fea} \cdot 10^{-6}, \quad (1.5.a)$$

– при овальных пазах

$$m_{cz} = g_{Fe} \cdot z_a \cdot b_z \cdot \left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2} \right) \cdot l_a \cdot k_{Fea} \cdot 10^{-6}, \quad (1.5.б)$$

$$m_{ca} = g_{Fe} \cdot \frac{\pi}{4} \left[(D_a - 2 \cdot h_n)^2 - D_i^2 - n_k \cdot d_{вк}^2 \right] \cdot l_a \cdot k_{Fea} \cdot 10^{-6}, \quad (1.6)$$

где плотность стали $g_{Fe} = 7,8$ кг/дм³. При подстановке всех линейных размеров в мм массы по (1.5.а,б и 1.6) получаются в кг, а потери по (1.4.а,б) – в Вт.

Очевидно, что суммарные потери в стали якоря

$$P_c = P_{cz} + P_{ca}.$$

1.6. Механические потери.

1.6.1. Потери на трение щеток о коллектор.

Потери на трение между движущимися друг относительно друга поверхностями могут быть рассчитаны по выражению

$$P_m = \kappa_m \cdot F_n \cdot V, \quad (1.8)$$

где κ_m – коэффициент трения, F_n – нормальная сила давления между поверхностями, V – скорость относительного перемещения трущихся поверхностей. Применительно к расчету потерь на трение щеток о коллектор выражению (1.8) можно придать следующий вид:

$$P_{mщ} = \kappa_{mщ} \cdot \sigma_{щ} \cdot S_{щ} \cdot n_{щ} \cdot V_k \cdot 10^{-1}, \quad (1.9)$$

в котором коэффициент трения в скользящем контакте щеток о коллектор $\kappa_{mщ} \approx 0.1 - 0.25$ для разных марок щеток, удельное давление щеток на единицу контактной поверхности $\sigma_{щ} \approx (20 - 35)$ кПа (см. табл. П-24 [2]), $S_{щ}$ – контактная поверхность щетки, $n_{щ}$ – число щеток, а V_k – линейная скорость на поверхности коллектора. При подстановке в (1.9) $\sigma_{щ}$ в кПа, $S_{щ}$ в см² и V_k в м/с потери $P_{mщ}$ получаются в Вт. При средних значениях $\kappa_{mщ}$ и $\sigma_{щ}$

$$P_{mщ} \approx 5 \cdot S_{щ\Sigma} \cdot V_k \cdot 10^{-1}. \quad (1.9.a)$$

1.6.2. Потери на трение в подшипниках.

Расчет потерь на трение в подшипниках принципиально может быть выполнен по выражению (1.8). При этом под F_n здесь следует понимать суммарную силу реакции в опорах (подшипниках) от веса ротора и других, действующих на него радиально направленных сил – реакции привода, сил одностороннего магнитного тяжения и т.п. В условиях наиболее частого сейчас сочленения машины с приводом с помощью упругих втулочно-пальцевых муфт радиальная реакция привода относительно мала, а при достаточной жесткости ротора и тщательном симметрировании зазоров под полюсами при сборке машины сила

одностороннего тяжения относительно невелика и трудно поддается определению на первом этапе расчета машины. Тогда F_n можно считать равной весу ротора $G_{mp} = g \cdot m_{p\Sigma}$, где g – ускорение силы тяжести и $m_{p\Sigma}$ – суммарная масса всех основных элементов ротора.

Приближенно массы основных деталей ротора можно определить следующим образом:

- Масса стали сердечника якоря m_{ca} по (1.6).
- Масса стали зубцового слоя якоря по (1.5).
- Масса меди обмотки якоря

$$m_{ma} = g_{Cu} \cdot N_a \cdot q_{np} \cdot l_{np} \cdot 1.1 \cdot 10^{-6}, \quad (1.10)$$

где N_a – число проводников обмотки якоря, q_{np} – сечение проводника, $l_{np} = l_a + l_{лб}$ – его длина, $g_{Cu} = 8.9$ кг/дм³ – плотность меди, а коэффициент 1.1 приближенно учитывает массу изоляции и уравнивательных соединений.

- Масса коллектора

$$m_k = g_{Cu} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [D_k^2 - (D_k - 2 \cdot h_k)^2] \cdot l_k \cdot 1.2 \cdot 10^{-6}, \quad (1.11)$$

где высота коллекторных пластин

$$h_k \approx 12.5 \cdot \sqrt[4]{D_k} - 10, \quad (1.12)$$

при D_k в мм, а коэффициент 1.2 приближенно учитывает массу стальной арматуры коллектора (конических шайб, втулки, стяжной гайки или шпилек). При прессованном на пластмассе коллекторе этот коэффициент нужно принимать несколько меньшим, порядка 1.1.

- Масса вала может быть приближенно оценена как

$$m_{вл} = g_{Fe} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{вл.ср.} \cdot l_{вл} \cdot 10^{-6}, \quad (1.13)$$

а его средний диаметр

$$D_{вл.ср.} = 0.5 \cdot (D_i + d_{1вл}), \quad (1.14)$$

где D_i – диаметр в месте посадки стали якоря на вал и $d_{1вл}$ – диаметр цилинд-

рического рабочего конца вала, зависящий от номинального момента на валу машины (см. табл. П-2 [2]).

Длина вала $l_{\text{вл}}$ в (1.13) может быть приближенно принята равной

$$l_{\text{вл}} = l_a + \tau + l_k + l_{1\text{вл}} + (100 - 300), \quad (1.15)$$

где $l_{1\text{вл}}$ – длина выступающего рабочего конца вала, а увеличение на (100-300) мм необходимо для учета пространства для размещения подшипников, щеточной траверсы, вентилятора и необходимых зазоров по длине машины, причем меньший размер соответствует меньшим D_a и наоборот.

Очевидно, что

$$m_{p\Sigma} = (m_{ca} + m_{cz} + m_{ма} + m_k + m_{\text{вл}}) \cdot (1.1 - 1.2), \quad (1.16)$$

где коэффициент (1.1 – 1.2) учитывает массы дополнительных деталей на роторе – пресующих колец и обмоткодержателей, вентиляторов, балансировочных колец, муфт и т.п.

В машинах рассматриваемого класса, как правило, применяются подшипники качения (шариковые или роликовые). Предварительный выбор подшипников производится по диаметру рабочего конца вала $d_{1\text{вл}}$. При этом внутренний диаметр подшипника d_n должен быть несколько большим диаметра выступающего конца вала $d_{1\text{вл}}$. Рекомендации по выбору диаметров вала в месте посадки подшипников качения приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1.

$d_{1\text{вл}}$	24	28	32	38	42	48	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110	120
d_n	25	30	35	40	45	50	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	120	138
D_n	32	37	44	49	54	60	72	77	82	87	92	99	104	109	114	119	134	148

Наибольшие трудности при расчете потерь в подшипниках качения возни-

кают в связи с определением коэффициента трения κ_{mn} в (1.8). Согласно существующим теоретическим представлениям κ_{mn} не должен зависеть от F_{nn} и V_n (закон Кулона - Амонтона). Однако опыт эксплуатации показывает, что на κ_{mn} все-таки влияют тип подшипника (шариковый или роликовый, радиальный или радиально-упорный и т.д.), размеры подшипника, условия смазки, температура, наличие перекосов при установке и т.п.

В соответствии с основами теории трения качения безразмерный коэффициент трения качения κ_{mn} определяется отношением величины λ_{mn} , измеряемой в см и зависящей от материалов пары качения, условий смазки и т.п., к диаметру тела качения d_{uu} (шарика или ролика). С учетом распределения нагрузок в цилиндрических подшипниках, выполненных из стали, в средних условиях смазки и установки, а также при приведении V_n к диаметру цапфы (внутреннему диаметру подшипника d_n), для ориентировочных расчетов потерь можно принимать $\lambda_{mn} = (0.01 - 0.02)$ см для шариковых и $\lambda_{mn} = (0.02 - 0.03)$ см для роликовых подшипников.

Тогда, согласно (1.8),

$$P_{mn} = \kappa_{mn} \cdot F_{nn} \cdot V_n = \frac{\lambda_{mn}}{d_{uu}} \cdot F_{nn} \cdot V_n, \quad (1.17)$$

где F_{nn} – нормальная сила реакции в подшипнике в H , а $V_n = \pi \cdot d_n \cdot n$ в м/с. Поскольку в сортаменте на подшипники d_{uu} обычно не указывается, его приближенно можно определять как

$$d_{uu} = 0.25 \cdot (D_n - d_n), \quad (1.18)$$

где D_n и d_n – внешний и внутренний диаметры подшипника в см.

Если с целью унификации передний и задний подшипники принимаются одинаковыми, то за F_{nn} можно считать суммарную силу реакции в опорах, равную

$$F_{nn} = g \cdot m_{p\Sigma}. \quad (1.19)$$

Если же, по тем или иным соображениям, подшипники со стороны привода (I) и со стороны коллектора (II) выбираются разного типа (например, роли-

ковый и шариковый) или размера (часто $d_{n2} \cong (0.8 - 0.9) \cdot d_{n1}$), то силы реакции в них F_{nn1} и F_{nn2} и соответствующие потери p_{mn1} и p_{mn2} естественно нужно определять отдельно.

В некоторых случаях в машинах рассматриваемого диапазона моментов могут использоваться подшипники скольжения. Такая необходимость возникает, например, при $M_n > 5000 - 7000 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и сильных толчках нагрузки, при частотах вращения n_{max} больших допустимых для подшипников качения, а также для машин с пониженным уровнем шумности.

Согласно общему закону трения скольжения

$$p_{mn} = \kappa_{mn} \cdot F_{nn} \cdot V_n = \kappa_{mn} \cdot \sigma_n \cdot d_n \cdot l_n \cdot V_n, \quad (1.20)$$

где κ_{mn} – безразмерный коэффициент трения, σ_n – удельное давление в цапфе, равное $F_{nn} / (d_n \cdot l_n)$, d_n и l_n – диаметр и длина цапфы, а V_n – скорость на окружности цапфы.

В неподвижном подшипнике или при $V_n < 0.4$ м/с масло из него выдавливается, металл цапфы касается металла вкладыша и κ_{mn} резко увеличивается (сухое или полусухое трение). При вращении вала с $V > 0.5$ м/с масло увлекается цапфой и в клиновом промежутке образуется масляная пленка с повышенным давлением, на которой вал как бы «всплывает». Если толщина пленки оказывается большей неровностей на поверхностях цапфы и вкладыша, трение называют чисто жидкостным и κ_{mn} значительно уменьшается. При $V_n > 15 \div 20$ м/с κ_{mn} начинает вновь возрастать, что связано с возникновением турбулентности в течении в масляном клине.

Строго говоря, коэффициент жидкостного трения κ_{mn} достаточно сложно зависит от целого ряда определяющих величин, в частности, от конструкции подшипника, размеров d_n и l_n , удельного давления σ_n , зазора между цапфой и вкладышем, скорости V_n , вязкости масла, его температуры θ_m , возможных перекосов при установке и т.п. Поэтому расчет потерь p_{mn} оказывается весьма трудоемким и требует использования специальных графиков или номограмм.

Для приближенного определения потерь в подшипниках скольжения можно воспользоваться широко известным [3] выражением

$$k_{mn} = \frac{C_n \cdot V_n^\delta}{\sigma_n \cdot \theta_n}, \quad (1.21)$$

где C_n – коэффициент пропорциональности, а θ_n – температура масла в подшипнике. При $\sigma_n < 1$ МПа, $V > 0.5$ м/с и средних условиях смазки минеральным маслом $C_n = 26$ при расчете потерь на пару одинаковых подшипников.

Подставляя (1.21) в (1.20) легко получить

$$p_{mn} = \frac{C_n}{\theta_n} \cdot d_n \cdot l_n \cdot V_n^{1+\delta}. \quad (1.22)$$

Показатель степени δ в (1.22) зависит от V_n – при V_n от 0.5 м/с до, примерно, 4 м/с он равен 0.5, а затем уменьшается до нуля при $V_n \geq 10$ м/с.

За среднюю температуру θ_n обычно принимают 500°C . Для обеспечения лучшей несущей способности подшипников скольжения рекомендуется принимать $l_n = (1 - 1.2) \cdot d_n$.

С учетом изложенного, при одинаковых подшипниках

$$p_{mn} = 0.52 \cdot d_n \cdot l_n \cdot V_n^{1+\delta} \cdot 10^{-2}, \quad (1.23)$$

где d_n и l_n подставляются в мм, V_n в м/с, а p_{mn} получается в Вт. При применении разных подшипников со стороны привода и со стороны коллектора, для расчета потерь в каждом из них в (1.22) вместо 0.52 следует брать 0.26, а полученные потери p_{mn1} и p_{mn2} сложить.

1.6.3. Потери на трение ротора о воздух.

При вращении ротора его поверхности испытывают трение об окружающую среду внутри машины. Такой средой в машинах постоянного тока, как правило, является воздух.

Согласно основным теоретическим положениям и опытным данным потери на трение при вращении гладкой цилиндрической поверхности о внешнюю газообразную среду пропорциональны плотности среды, площади трения и

третьей степени скорости на поверхности вращения, то есть

$$p_{mв} = C_{mв} \cdot \pi \cdot D_i \cdot l_i \cdot V_i^3. \quad (1.24)$$

В машинах постоянного тока при расчете $p_{mв}$, как правило, достаточно учитывать поверхности якоря, включая длину вылета лобовых частей обмотки, и коллектора. Тогда

$$p_{mв} = C_{mв} \cdot \pi \cdot \left[D_a \cdot (l_a + \tau) \cdot V_a^3 + D_k \cdot l_k \cdot V_k^3 \right]. \quad (1.25)$$

В соответствии с опытными данными, учитывающими негладкость поверхностей якоря и коллектора, для приближенного определения этих потерь можно пользоваться следующим расчетным выражением –

$$p_{mв} \approx 0.0148 \cdot \left[D_a \cdot (l_a + \tau) \cdot V_a^3 + D_k \cdot l_k \cdot V_k^3 \right], \quad (1.26)$$

где диаметры D и длины l (включая полюсное деление τ) следует подставлять в м, а скорости V – в м/с. При этом потери получаются в Вт. Выражение (1.26) еще удобнее преобразовать к виду

$$p_{mв} \approx 0.0148 \cdot V_a^3 \cdot D_a \cdot (l_a + \tau + l_k \cdot k_k^4), \quad (1.27)$$

в котором $k_k = D_k / D_a$.

1.7. Потери на вентиляцию.

1.7.1. Общие положения.

Для уменьшения перегревов активных частей машин ниже допустимых значений, определяемых классом нагревостойкости применяемой в них изоляции, используются те или иные способы их интенсивного охлаждения. В машинах постоянного тока охлаждающей средой, как правило, является воздух. Очевидно, что во всех случаях принудительной вентиляции на нее затрачивается некоторая мощность $p_{вм}$, которая относится к потерям в машине и тем самым влияет на ее к.п.д. Эту мощность и называют потерями на вентиляцию или вентиляционными потерями.

Достаточно строгий расчет $p_{вт}$, особенно на начальной стадии проектирования машины, оказывается практически невозможным, так как требует детального конструирования всей вентиляционной системы и расчета ее аэродинамического сопротивления $z_{вт}$, которое, как известно, сам не отличается точностью. Поэтому ниже рассматривается лишь приближенный способ оценки величины вентиляционных потерь $p_{вт}$.

Согласно общим положениям, мощность, расходуемая на принудительную вентиляцию, –

$$P_{вт} = \frac{H \cdot V}{\eta_{вт}}, \quad (1.28)$$

где H – полный рабочий напор воздуха в вентиляционной цепи в Па, V – рабочий расход охлаждающего воздуха в м³/с и $\eta_{вт}$ – энергетический к.п.д. вентилятора в данном рабочем режиме. С другой стороны, между H и V существует непосредственная связь

$$H = z_{вт} \cdot V^2. \quad (1.29)$$

Во всех случаях принудительной вентиляции необходимый расход воздуха может определяться из следующего условия

$$V = \frac{\Sigma p'}{C_v \cdot \Delta\theta_v}, \quad (1.30)$$

где $\Sigma p'$ – суммарная мощность потерь, уносимых охлаждающим воздухом в Вт, C_v – теплоемкость воздуха в среднем 1100 Дж/°С·м³ и $\Delta\theta_v$ – допустимый перегрев воздуха в вентиляционной системе в °С, то есть разность температур выходящего «горячего» воздуха $\theta_{вгор}$ и входящего «холодного» воздуха $\theta_{вхол}$. Допустимая величина $\Delta\theta_v$ определяется классом нагревостойкости применяемой изоляции и условиями теплообмена на нагретых поверхностях машины (системой вентиляции).

В машинах постоянного тока рассматриваемого класса, как правило, применяются вентиляторы центробежного типа с прямыми лопатками (особенно

для реверсивных машин). Для таких вентиляторов с радиальными лопатками существует жесткая зависимость

$$H = H_0 \cdot \left[1 - (V/V_0)^2 \right], \quad (1.30a)$$

в которой H_0 – максимальный напор при $V = 0$, то есть при закрытых выходных отверстиях машины (холостой ход вентилятора), а V_0 – максимальный расход при $H = 0$, то есть при работе непосредственно в окружающую среду (короткое замыкание вентилятора).

Для радиальных вентиляторов, согласно существующим данным, можно считать:

$$H_0 = \eta_{ав} \cdot \gamma_{возд} \cdot (V_{ем1}^2 - V_{ем2}^2), \quad (1.31)$$

$$V_0 \approx 0.42 \cdot V_{ем1} \cdot S_{ем1}, \quad (1.32)$$

где: $\eta_{ав} = 0.6$ – аэродинамический к.п.д. вентилятора при холостом ходе, $\gamma_{возд} \approx 1.23 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха при средних значениях давления и температуры, $V_{ем1}$ и $V_{ем2}$ – соответственно скорости на внешнем $d_{ем1}$ и внутреннем $d_{ем2}$ диаметрах лопаток вентилятора при заданной частоте его вращения $n_{ем}$ ($V_{ем1} = \pi \cdot d_{ем1} \cdot n_{ем}$ и $V_{ем2} = \pi \cdot d_{ем2} \cdot n_{ем}$), а выходное сечение вентилятора

$$S_{ем1} = 0.92 \cdot \pi \cdot d_{ем1} \cdot b_{ем}, \quad (1.33)$$

где $b_{ем}$ – ширина лопаток вентилятора, а 0.92 учитывает толщину лопаток. При подстановке в (1.31) и (1.32) $V_{ем}$ в м/с и $S_{ем1}$ в м² напор H_0 получается в Па, а расход V_0 в м³/с.

Рабочий режим вентилятора по H и V может быть найден по (1.29), если известно $z_{ем}$, как точка пересечения кривой $z_{ем} \cdot V^2 = f(V)$ с зависимостью $H = f(V)$. Согласно (1.29) и (1.30) этот режим может быть найден и математически как

$$H = \frac{H_0 \cdot V_0^2 \cdot z_{ем}}{H_0 + z_{ем} \cdot V_0^2} \quad \text{и} \quad V = V_0 \cdot \sqrt{\frac{H_0}{H_0 + z_{ем} \cdot V_0^2}}, \quad (1.34.a, б)$$

С другой стороны, более детальный анализ условий работы радиальных вентиляторов показывает, что максимальный энергетический к.п.д. η_{em} в (1.28) достигается при

$$V = 0.5 \cdot V_0 \text{ и } H = 0.5 \cdot H_0 \quad (1.35.а,б)$$

и составляет в хорошо выполненных вентиляторах $\eta_{em \max} \approx 0.25$. В диапазоне изменения расхода от $V \approx 0.3 \cdot V_0$ до $V \approx 0.7 \cdot V_0$ $\eta_{em} \approx 0.2$. При прочих равных условиях, такой диапазон изменения \underline{V} соответствует 10-ти кратному изменению \underline{z}_{em} , а, следовательно, значительная ошибка в z_{em} сравнительно мало влияет на величину $\underline{H} \cdot \underline{V} / \eta_{em}$, пропорциональную потерям на вентиляцию p_{em} . Поэтому для приближенной оценки величины p_{em} с учетом оптимальных условий (1.35.а,б) можно воспользоваться простейшими соотношениями

$$p_{em} \approx 1.5 \cdot V_0 \cdot H_0 = 4 \cdot V \cdot H, \quad (1.36)$$

где H в Па, V в м³/с, а p_{em} получается в Вт. При этом V и H определяются величиной отводимых потерь $\Sigma p'$, частотой вращения вентилятора n_{em} и его размерами d_{em1} , d_{em2} и b_{em} , зависящими от принятой системы вентиляции.

Число лопаток радиального вентилятора N_{em} может приниматься в соответствии с выражением

$$N_{em} \approx \pi \cdot \frac{d_{em1} + d_{em2}}{d_{em1} - d_{em2}} = \text{ц.ч.}, \quad (1.37)$$

причем, с целью уменьшения шума, желательно, чтобы N_{em} было простым числом – 7, 11, 13, 17, 19, 21, 23 и т.д.

1.7.2. Расчет потерь при встроенных вентиляторах.

В большинстве современных машин постоянного тока малой и средней мощности вентиляторы встраиваются непосредственно внутрь корпуса самой машины. При этом радиальные размеры вентилятора d_{em1} и d_{em2} оказываются достаточно жестко ограниченными внутренними размерами машины.

В машинах защищенного исполнения (IP22, IP23) широко применяется протяжная самовентиляция со способом охлаждения IC01 – с вентилятором на

валу машины (зависимая вентиляция).

Необходимый расход охлаждающего воздуха V при этом может быть рассчитан приближенно по (1.30), принимая за $\Sigma p'$ полные потери $\Sigma p = P_{2н} \cdot (1 - \eta) / \eta$ по предварительно выбранному к.п.д.з и $\Delta\theta_\epsilon$ в зависимости от назначенного класса нагревостойкости изоляции машины. Обычно для классов изоляции Е, А, В берут $\Delta\theta_\epsilon = 20^\circ\text{C}$, а для F и H – $\Delta\theta_\epsilon = 30^\circ\text{C}$.

Для получения большего напора вентилятора H его внешний диаметр $d_{\epsilon m1}$ желательно выбрать максимально возможным. С учетом необходимого зазора между внутренним диаметром щита или корпуса величина $d_{\epsilon m1}$ на $2 \cdot \Delta_\epsilon \approx (3 - 4)\delta_\epsilon$ должна быть сделана меньшей. В наиболее часто применяемых сейчас конструкциях машин постоянного тока рассматриваемого типа с плоскими щитами $d_{\epsilon m1} \approx D_a + 2(h_m - \delta)$. При этом $d_{\epsilon m1} \approx (1,6 - 1,5) \cdot D_a$, где меньшая величина соответствует $p > 2$.

Внутренний диаметр лопаток вентилятора $d_{\epsilon m2}$, в основном, определяется диаметром D_a и должно быть больше него для обеспечения прохода воздуха с поверхности лобовых частей под вентилятор. Обычно $d_{\epsilon m2} \approx (1,1 - 1,2) \cdot D_a$, где меньшая величина относится к машинам с большим D_a .

По выбранным $d_{\epsilon m1}$ и $d_{\epsilon m2}$ из совместного решения (1.31) – (1.33) можно определить напор вентилятора H_0 при холостом ходе –

$$H_0 = 0.738 \cdot V_a^2 \cdot \left[\left(\frac{d_{\epsilon m1}}{D_a} \right)^2 - \left(\frac{d_{\epsilon m2}}{D_a} \right)^2 \right]. \quad (1.38)$$

Для рассчитанного по (1.30) требуемого расхода воздуха V , принимая во внимание условия (1.35.а, б), легко найти максимальный расход вентилятора V_0 при «коротком замыкании», как $V_0 = 2 \cdot V$, и вентиляционные потери $p_{\epsilon m}$ по (1.36).

Из совместного решения (1.32) и (1.33), зная V_0 , можно получить выражение для необходимой ширины лопаток вентилятора в виде

$$b_{em} = \frac{V_0}{0.42 \cdot V_{em1} \cdot 0.92 \cdot \pi \cdot d_{em1}} = \frac{V_0}{3.8 \cdot d_{em1}^2 \cdot n_{em}}, \quad (1.39)$$

в которое необходимо подставлять V_0 в м³/с, d_{em1} в м и n_{em} в об/с. При этом b_{em} получается в м.

Величину z_{em} при осевой протяжной системе вентиляции IC01 в значительной мере определяют площади поперечного сечения отверстий для входа S_{ex} и выхода $S_{вых}$ воздуха из машины. Согласно существующим практическим данным их следует выбирать по условиям:

$$S_{ex} \geq 3.3 \cdot D_a^{1.65} \text{ и } S_{вых} \geq 0.55 \cdot D_a^{1.9}. \quad (1.40.а,б)$$

Необходимо подчеркнуть, что в машинах с зависимой вентиляцией потери на вентиляцию меняются пропорционально n^3 .

В машинах защищенного исполнения IP22, IP23 с широким регулированием частоты вращения n , особенно вниз от номинальной n_n , с успехом может применяться система независимой вентиляции IC05 с помощью встроенного вентилятора с приводным электродвигателем (обычно асинхронным), установленным в машине и питаемым независимо от охлаждаемой машины. Расчет размеров вентилятора и вентиляционных потерь, который, как правило, проводится для номинального режима работы машины, принципиально не отличается от такового для IC01, но при $n_{em} \neq n$ машины. Обычно n_{em} выбирается больше n и составляет 1000 или 1500 об/мин. Так как n_{em} не зависит от n машины, то p_{em} остаются постоянными при изменении (регулировании) частоты вращения машины. Согласно действующим стандартам, при определении к.п.д. проектируемой машины должны учитываться полные потери на ее вентиляцию, включая и потери в двигателе вентилятора, то есть $p_{em}' = p_{em} / \eta_{дв}$, где к.п.д. двигателя вентилятора $\eta_{дв} \approx 0.7 - 0.8$ в зависимости от его мощности.

В закрытых машинах IP44, с охлаждением с наружной поверхности корпуса, для улучшения теплопередачи внутренним воздухом потерь к внутренней поверхности корпуса, часто используются укрепленные на валу машины встроенные вентиляторы – «мешалки», например, в системах охлаждения IC0041 и

IC0141. Достаточно строгий расчет потерь на внутреннее перемешивание воздуха весьма сложен и ненадежен. Для приближенной оценки величины этих потерь $p_{вм}$ можно воспользоваться методикой, изложенной выше для встроенных зависимых вентиляторов. При этом, с целью лучшего перемешивания воздуха внутри машины, внешний диаметр «мешалки» обычно принимается $d_{вм1.м} \approx (1.5 - 1.4) \cdot D_a$, а внутренний $d_{вм2.м} \approx (1.2 - 1.25) \cdot D_a$. Максимальный напор «мешалки» $H_{ом}$ тогда может быть рассчитан по (1.38). Ширина лопаток «мешалки» делается $b_{вм.м} \approx (0.08 - 0.1) \cdot D_a$. Величина максимального расхода $V_{ом}$ в этом случае, в соответствии с (1.39), находится как

$$V_{ом} = 0.42 \cdot V_{вм1.м} \cdot b_{вм.м} \cdot 0.92 \cdot \pi \cdot d_{вм1.м} \approx (0.1 - 0.12) \cdot d_{вм1.м}^2 \cdot V_a, \quad (1.41),$$

где $d_{вм1.м}$ в м, V_a в м/с, а $V_{ом}$ получается в м³/с.

Учитывая весьма малую вероятность создания оптимального режима (1.35.а, б) для этой вентиляционной цепи, с некоторым запасом следует считать

$$p_{вм.м} \approx 1.8 \cdot V_{ом} \cdot H_{ом}. \quad (1.42)$$

1.7.3. Расчет потерь при пристроенных вентиляторах.

Характерным примером здесь для закрытой машины с IP44 может служить система охлаждения IC0141 с обдуванием наружной поверхности корпуса машины внешним вентилятором, расположенным на валу машины (зависимым вентилятором). При этом вентилятор крепится на валу за задним подшипниковым щитом и закрывается специальным кожухом, исключая прикосновение к нему персонала и направляющим охлаждающий воздух вдоль поверхности корпуса машины. Расчет вентиляционных потерь в этом случае также является приближенным и основывается на общих положениях, изложенных в п.1.7.1.

Необходимый расход охлаждающего воздуха для внешнего обдува корпуса машины V может быть найден также по (1.30), при этом только, с учетом худших условий теплоотдачи с поверхности к охлаждающему воздуху, расчетный перегрев воздуха $\Delta\theta_g$ обычно принимается при классах нагревостойкости изо-

ляции Е, А, В – $\Delta\theta_e \approx 10^\circ\text{C}$, а для F и Н – $\Delta\theta_e \approx 15^\circ\text{C}$.

Радиальные размеры пристроенного вентилятора, в основном, определяются диаметром корпуса машины и величиной площади отверстия для входа воздуха под вентилятор. Как правило, $d_{em1} \approx (1.7 - 1.6) \cdot D_a$ и $d_{em2} \approx (1.15 - 1.25) \cdot D_a$. Для зависимого вентилятора $n_{em} = n$ машины и H_0 рассчитывается по (1.38).

Принимая $V_0 = 2 \cdot V$ и полагая, что вентилятор работает вблизи оптимальной точки (см.(1.35.а,б)), потери на внешний обдув p_{em0} определяются по (1.36), а необходимая ширина лопаток находится по (1.39).

При наличии внутри машины «мешалки» полные потери на вентиляцию очевидно равны

$$p_{em} = p_{em0} + p_{emm} \quad (1.43)$$

и меняются пропорционально n^3 .

При независимой вентиляции машин защищенного исполнения (IP22, IP23) с помощью пристроенного двигателя - вентилятора, питаемого независимо от охлаждаемой машины (IC06), необходимый расход охлаждающего воздуха находится так же, как и для систем IC01 и IC05. Размеры вентилятора здесь принципиально не зависят от размеров самой машины и выбираются, главным образом, из конструктивных соображений, принимая $n_{em} = 1500$ или 3000 об/мин. Как правило, d_{em1} и d_{em2} делаются меньшими, чем для встроенных вентиляторов. Расчет H_0 , V_0 и потерь p_{em} аналогичен случаю IC05.

1.7.4. Расчетно потерь на вентиляцию с помощью отдельного и независимого устройства.

К таким системам охлаждения относятся системы вентиляции защищенных машин (IP22, IP23) с подводом воздуха с помощью подводящих труб и выбросом нагретого воздуха в окружающее пространство (IC17) и закрытых машин (IP44) с подводом и отводом воздуха через трубы (IC37). В обоих случаях потери на вентиляцию ряда машин покрываются за счет мощности независимой воздухоподводящей установки и потери p_{em} для каждой машины трудно подда-

ются учету. В связи с этим $p_{вт}$ для таких машин обычно не рассчитываются и не принимаются во внимание при определении их к.п.д.

1.8. Добавочные потери.

1.8.1. Учет добавочных потерь при определении к.п.д.

Как было указано в п. 1.1, физические явления, определяющие добавочные потери в машинах постоянного тока, отличаются большим разнообразием и сложностью. В связи с этим более или менее строгий и полный их расчет при проектировании машин оказывается практически невозможным. Поэтому действующие стандарты предписывают при определении к.п.д. для номинальной нагрузке учитывать добавочные потери $p_{дн}$ приближенно в процентах от номинальной электрической мощности машины, то есть для генераторов от P_{2H} , а для двигателей от $P_{1H} = P_{2H}/\eta_H$, где η_H – предварительно выбранное значение к.п.д. Для некомпенсированных машин постоянного тока добавочные потери принимаются равными 1%, а для компенсированных машин – 0.5%.

При нагрузках, отличающихся от номинальной, добавочные потери пересчитываются пропорционально квадрату тока якоря –

$$p_{\partial} = p_{дн} \cdot (I_a / I_{ан})^2. \quad (1.44)$$

В случаях широкого регулирования частоты вращения n вверх от номинальной n_n ослаблением потока добавочные потери увеличиваются пропорционально коэффициенту $\kappa_{дн}$, зависящему от n/n_n :

n/n_n	1.5	2.0	3.0	4.0
$\kappa_{дн}$	1.4	1.7	2.5	3.2

1.8.2. Добавочные потери в обмотке якоря из-за вихревых токов.

Как известно, при работе машин постоянного тока по проводникам их якорных обмоток протекают переменные токи частотой $f = n \cdot p$. Вызванные

ими магнитные потоки пазового рассеяния индуцируют э.д.с. и создают вихревые токи в проводниках обмотки, приводящие к неравномерному распределению плотности тока по их высоте. В рассматриваемых условиях проявление поверхностного эффекта в прямоугольных проводниках при синусоидальном токе характеризуется так называемой эквивалентной глубиной проникновения электромагнитного поля в проводник

$$h_{эн} = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{[15]} \cdot \kappa_{\theta}}{\omega \cdot \mu_0} \cdot \frac{b_n}{u_n \cdot a_{np}}} = 66.7 \cdot \sqrt{\frac{\kappa_{\theta} \cdot b_n}{f \cdot u_n \cdot a_{np}}}, \quad (1.45)$$

где: $\rho_{[15]} = 17.5 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление меди при $\theta = 15^{\circ}\text{C}$, ω – частота перемагничивания, равная $2 \cdot \pi f$, κ_{θ} – температурный коэффициент меди для заданной температуры обмотки, b_n – ширина паза, a_{np} – ширина проводника и u_n – число проводников по ширине паза. Значение $h_{эн}$ по формуле (1.45) получается в мм.

Распределение вихревых токов и возникновение добавочных потерь определяется зависимостями от безразмерного параметра

$$\xi = b_{np\Sigma} / h_{эн} = n_s \cdot b_{np} / h_{эн}, \quad (1.46)$$

который обычно называют приведенной высотой проводника. Здесь b_{np} – высота элементарного проводника в мм, а n_s – число проводников по высоте в слое обмотки. При числе витков в секции $w_c > 1$ n_s численно равно w_c , а при $w_c = 1$ величина n_s представляет собою число параллельных элементарных проводников, на которое подразделяется эффективный проводник для уменьшения добавочных потерь.

При прямолинейной коммутации кривая изменения тока в проводниках во времени имеет характер трапеции. Раскладывая ее на гармонические составляющие можно найти приближенные формулы для расчета добавочных потерь. Для двухслойных обмоток коэффициент добавочных потерь в меди пазовой части обмотки при неподразделенных по высоте проводниках ($n_s = 1$)

$$\kappa_{\partial mn} = \frac{3.04 \cdot \xi^2}{2 + \nu}, \quad (1.47)$$

где

$$\nu = \frac{31 \cdot p}{\xi^2} \cdot \frac{u_n + \kappa_{\text{щ}} - 1}{\kappa} \quad (1.48)$$

учитывает влияние периода коммутации на $\kappa_{\partial mn}$. В (1.48) $\kappa_{\text{щ}} = b_{\text{щ}} / t_{\kappa}$ – коэффициент щеточного перекрытия, а κ – число коллекторных пластин

При подразделенных по высоте проводниках ($n_{\text{э}} > 1$) и секциях с гнутой головкой

$$\kappa'_{\partial mn} = \frac{\kappa_{\partial mn}}{n_{\text{э}}^2} + \frac{\kappa_{\partial mn}}{5} \cdot \frac{n_{\text{э}}^2 - 1}{n_{\text{э}}^2} \cdot \frac{l_a}{l_a + l_l}, \quad (1.49.a)$$

а в секциях с паяной головкой со стороны противоположной коллектору,

$$\kappa'_{\partial mn} = \frac{\kappa_{\partial mn}}{n_{\text{э}}^2} + \kappa_{\partial mn} \cdot \frac{n_{\text{э}}^2 - 1}{n_{\text{э}}^2} \cdot \frac{l_a}{l_a + l_l}, \quad (1.49.б)$$

где l_a – геометрическая длина стали якоря и l_l – длина лобовой части обмотки.

Поскольку в лобовых частях обмотки поверхностный эффект проявляется в очень слабой степени, добавочные потери в обмотке якоря из-за вихревых токов

$$p_{\partial m} = p_{ma} \cdot \kappa'_{\partial mn} \cdot \frac{l_a}{l_a + l_l}, \quad (1.50)$$

где $p_{ma} = I_a^2 \cdot r_{a\theta}$ – основные потери в меди обмотки якоря. Очевидно, что при $n_{\text{э}} = 1$ коэффициент $\kappa'_{\partial mn} = \kappa_{\partial mn}$. Увеличение потерь в меди обмотки якоря из-за вихревых токов часто характеризуют коэффициентом

$$\kappa_f = 1 + \kappa_{\partial mn} \cdot \frac{l_a}{l_a + l_l},$$

приведенным ко всей обмотке. Практически он не должен превосходить (1,3 – 1,4), но чаще всего бывает меньше 1,1.

В машинах с якорными обмотками, выполненными из круглого провода с $d_{\text{пр}} < 2 - 2,5$ мм и овальными пазами, поверхностный эффект практически не проявляется и $p_{\partial m} \approx 0$.

Потери $p_{\partial m}$ входят составляющей в полные добавочные потери p_{∂} и при расчетах к.п.д. отдельно не учитываются. Однако $p_{\partial m}$ или коэффициент κ_f принимаются во внимание при оценке нагревания якоря.

1.8.3. Добавочные потери в стали из-за пульсаций магнитного потока.

В машинах постоянного тока из-за зубчатости якоря возникают пульсации магнитного потока с повышенной частотой $f_z = z_a \cdot n$, являющиеся причиной появления добавочных потерь в магнитной системе машины.

При холостом ходе одной из составляющих этих потерь оказываются потери, выделяющиеся в поверхностном слое полюсных наконечников от вихревых токов, проникающих в сталь при значительной f_z на небольшую глубину и пропорциональные $f_z^{1.5}$. Достаточно строгий расчет этой составляющей потерь $p_{\partial ca}$ в машинах постоянного тока весьма сложен, так как они зависят от амплитуды переменной составляющей магнитной индукции, материала и толщины листов стали полюсов Δ_m , а также от технологии изготовления полюсов. Приближенная оценка этой составляющей потерь в усредненных условиях обычно выполняется по полуэмпирической формуле

$$p_{\partial co} \approx 2 \cdot \Delta_m \cdot [(\kappa_{\delta} - 1) \cdot B_{\delta} \cdot t_{z1}]^2 \cdot \left(\frac{z_a \cdot n}{10000} \right)^{1.5} \cdot S_p, \quad (1.51)$$

где поверхность полюсных наконечников

$$S_p = 2 \cdot p \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot l_p \cdot \kappa_{cm} \cdot 10^{-6}. \quad (1.52)$$

В (1.51) и (1.52) Δ_m, t_{z1}, τ и $l_p \approx l_a$ подставляются в мм, а n в об/мин. Величина $p_{\partial co}$ по (1.51) получается в Вт.

При нагрузке, когда по якорю протекает ток I_a , поверхностные потери в стали наконечников главных полюсов увеличиваются на $p_{\partial ca}$ – потери, вызванные зубцовыми гармониками н.с. якоря. Величина их находится из выражения

$$P_{\delta ca} \approx P_{\delta co} \cdot \left(\frac{A_a \cdot \tau}{F_{\delta}} \cdot \frac{2 \cdot p}{z_a} \cdot \frac{1}{\kappa_{\delta} - 1} \right)^2. \quad (1.53).$$

Потери $P_{\delta co}$ и $P_{\delta ca}$ также входят в общие добавочные потери P_{δ} и отдельно не учитываются при расчете к.п.д. машины.

Кроме рассмотренных, при нагрузке машин постоянного тока возникают еще добавочные потери из-за искажения распределения магнитной индукции в воздушном зазоре под действием поперечной н.с. якоря (в некомпенсированных машинах), из-за поперечной составляющей поля в пазах якоря, вихревых токов в проволочных бандажах на якоре (если они имеются). Расчет всех этих составляющих добавочных потерь крайне сложен и неточен, а величины их, как правило, невелики. Поэтому ими обычно пренебрегают.

1.9. Суммарные потери и расчет коэффициента полезного действия в номинальном режиме.

Рассмотренный выше расчет составляющих потерь мощности позволяет найти суммарные потери Σp для любого режима работы машины и, в частности, для номинального режима. В этом случае, очевидно, что $U = U_n$, $n = n_n$, $I_a = I_{ан}$ и $i_{вн} = i_{вн}$.

$$\Sigma p_n = P_{ман} + P_{вн} + P_{щкн} + P_{сн} + P_{тпн} + P_{твн} + P_{втн} + P_{дн}, \quad (1.54)$$

где отдельные составляющие потерь рассчитываются соответственно по (1.1), (1.2.а), (1.3), (1.7), (1.17), или по (1.23), (1.27), (1.36), или по (1.42), (1.36) и (1.44) в зависимости от принятой системы вентиляции машины.

Тогда коэффициент полезного действия при условиях нагрузки, принятых за номинальные, η_n находится по общему выражению

$$\eta_n = 1 - \frac{\Sigma p_H}{P_{2H} + \Sigma p_H}, \quad (1.55)$$

в котором:

для генераторов независимого возбуждения

$$P_{2H} = U_n \cdot I_{ан}, \quad (1.56.a);$$

для генераторов параллельного возбуждения

$$P_{2H} = U_n \cdot (I_{ан} - i_{вн}), \quad (1.56.б);$$

для двигателей независимого возбуждения

$$P_{2H} = U_n \cdot I_{ан} - \Sigma p_n + p_{вн}, \quad (1.56.в);$$

для двигателей параллельного возбуждения

$$P_{2H} = U_n \cdot (I_{ан} + i_{вн}) - \Sigma p_n, \quad (1.56.г);$$

для двигателей последовательного возбуждения

$$P_{2H} = U_n \cdot I_{ан} - \Sigma p_n. \quad (1.56.д).$$

Необходимо указать, что полученная величина P_{2H} может не совпадать с требуемым техническим заданием на проектируемую машину значением номинальной полезной мощности. Если отличие составляет не более 2 – 3%, то дополнительной корректировки величин $I_{ан}$ и $i_{вн}$ обычно не требуется. В случаях больших расхождений такая корректировка должна быть выполнена при расчете рабочих характеристик проектируемой машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. –832 с.
2. Забоин В.Н., Прусс-Жуковский В.В., Сарычев Г.М. Оптимизация электромагнитных параметров коллекторных электрических машин / Учебное пособие. – Л.: изд. ЛПИ, 1988. –98 с.
3. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. – М.: Энергия, 1964. –544 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Потери и коэффициент полезного действия.....	3
1.1 Составляющие потерь.....	3
1.2. Потери в обмотках якорной цепи.....	4
1.3. Потери в цепях обмоток независимого или параллельного возбуждения.....	4
1.4. Электрические потери в щеточном контакте.....	5
1.5. Основные потери в стали якоря.....	5
1.6. Механические потери.....	7
1.6.1. Потери на трение щеток о коллектор.....	7
1.6.2. Потери на трение в подшипниках.....	7
1.6.3. Потери на трение ротора о воздух.....	12
1.7. Потери на вентиляцию.....	13
1.7.1. Общие положения.....	13
1.7.2. Расчет потерь при встроенных вентиляторах.....	16
1.7.4. Расчетно потерь на вентиляцию с помощью отдельного и независимого устройства.....	20
1.8. Добавочные потери.....	21
1.8.1. Учет добавочных потерь при определении к.п.д.....	21
1.8.2. Добавочные потери в обмотке якоря из-за вихревых токов.....	21
1.8.3. Добавочные потери в стали из-за пульсаций магнитного потока.....	24
1.9. Суммарные потери и расчет коэффициента полезного действия в номинальном режиме.....	25
Список литературы.....	26

Лицензия ЛР №065394 от 08.09.97

Подписано в печать 8.12.06 Формат 60x84 ¹/₁₆
Объем 1.75 п.л Тираж 50 Заказ №276

Отпечатано с готового оригинал макета,
предоставленного автором,
в издательстве «НЕСТОР»
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 11