

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

В. А. ЖАДАН, Д. И. САННИКОВ, М. А. САННИКОВА

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Интенсификация охлаждения электрических машин является одним из важнейших средств повышения их мощности без увеличения габаритов. Однако этот процесс обычно сопровождается удорожанием машины за счет усложнения конструкции и повышением затрат мощности на охлаждение P_v , что вызывает необходимость поиска оптимального решения.

Для асинхронных двигателей закрытого исполнения, охлаждаемых путем внешнего обдува оболочки, такой критерий оценки качества вентиляционной системы, как удельные затраты мощности на охлаждение [1]

$$P = \frac{P_v}{P_\Sigma},$$

где P_Σ — потери, отводимые воздушным потоком, не может служить основой для оптимизации, так как его зависимость от параметров вентиляционной системы не имеет экстремумов.

Об эффективности вентиляционной системы можно судить по изменению действительной или приведенной стоимости двигателя вследствие изменения параметров охлаждения [2, 3]. Поскольку в результате усовершенствования вентиляционной системы может повыситься мощность двигателя, то сравнение различных вариантов следует проводить по удельной действительной стоимости на 1 кВт номинальной мощности

$$C_y = \frac{1}{P} \left(\frac{K}{T_{co}} + C_a + C_p \right). \quad (1)$$

Здесь

K — полная стоимость двигателя,

T_{co} — срок окупаемости,

C_a и C_p — стоимость активной энергии потерь и реактивной энергии за год эксплуатации.

Улучшение теплоотдачи оболочки двигателя позволяет при неизменной температуре обмотки увеличить отводимую тепловую энергию и благодаря этому повысить удельные электромагнитные нагрузки и тем самым — полезную мощность. Это приводит к снижению удельной стоимости. Но одновременно происходит рост стоимости активных потерь

$$C_a = c_a T_\Gamma P_{\Gamma f}, \quad (2)$$

где

c_a — цена одного квт.ч электроэнергии,
 T_r — среднее число часов работы в год,
 P_{zf} — потери двигателя при неполной средней загрузке, характеризующейся коэффициентом нагрузки f .

Растет также и стоимость C_p , но поскольку она составляет не более 10 проц. от C_a , то изменение отношения C_p/P можно не учитывать.

Повышение стоимости корпуса двигателя, вентилятора и других деталей, связанное с интенсификацией вентиляции, учитывается соответствующим увеличением стоимости K .

При одновременном росте P , K и C_a выражение (1) может иметь минимум, который, очевидно, и соответствует оптимальным условиям охлаждения.

На данном этапе целесообразно рассмотреть влияние вентиляции на стоимость без учета дополнительных факторов, таких, как повышение допустимой температуры обмотки, оптимизация геометрии активной части двигателя, улучшение использования объема машины и т. д. Изменение мощности P считается непрерывным, то есть дискретность шкалы мощностей при исследовании выражения (1) на оптимум не учитывается. Исследование производится на основе сравнения с основным вариантом двигателя, которому в дальнейших выкладках присваивается индекс «О».

Необходимо отметить, что оптимизация по выражению (1) является не вполне правильной. При увеличении мощности за счет роста размеров при постоянстве удельных электромагнитных нагрузок и геометрическом подобии удельная действительная стоимость C_y уменьшается обратно пропорционально $P^{0,25}$, что подтверждается анализом двигателей существующих серий. При увеличении же мощности без увеличения размеров этот выигрыш по стоимости утрачивается, что можно учесть, введя в выражение (1) отношение $(P/P_0)^{0,25}$.

С учетом вышеизложенного удельная стоимость определяется теперь выражением

$$C = \frac{1}{P^{0,75} P_0^{0,25}} \left(\frac{K}{T_{co}} + c_a T_r P_{zf} \right). \quad (3)$$

Расчет величин, входящих в (3), основан на следующих принципах. Повышение линейной нагрузки и индукции характеризуется коэффициентом D

$$A = A_0 \sqrt{1 + D}, \quad (4)$$

$$B = B_0 \sqrt{1 + iD}. \quad (5)$$

Коэффициент i ($0 \leq i \leq 1$) учитывает, что вследствие насыщения B должна расти в меньшей пропорции, чем A .

Считаем переменные потери P_K пропорциональными квадрату линейной нагрузки, а постоянные P_X — квадрату индукции. При некоторых допущениях

$$P_K = P_{m1} + P_{m2} + P_\partial = P_{ko}(1 + D) \quad (6)$$

$$P_X = P_c + P_r = P_{xo}(1 + iD). \quad (7)$$

В (6, 7) учитываются потери в обмотках статора и ротора, потери добавочные, в стали, на трение ротора о воздух и в подшипниках.

Увеличение мощности вентилятора характеризуется коэффициентом y

$$P_b = P_{bo} \cdot y. \quad (8)$$

На основании энергетической диаграммы двигателя, учитывая, что электромагнитная мощность

$$P_3 \equiv AB \equiv \sqrt{(1+D)(1+iD)}, \quad (9)$$

и разлагая (9) в степенной ряд, можно получить выражение для полезной мощности в функции D и y .

$$P = P_o + P_{bo}(1-y) + \frac{D}{2} \left[(P_o + P_{bo})(1+i) + (P_{to} - P_{m2o})(1-i) - \frac{D^2}{8} (1-i)^2 (P_o + P_{to} + P_{m2o} + P_{bo}) \right]. \quad (10)$$

Потери в двигателе при неполной нагрузке

$$P_{\Sigma f} = i^2(1+D)P_{ko} + (1+iD)P_{xo} + yP_{bo}. \quad (11)$$

Коэффициент D для двигателя с короткозамкнутым ротором определяется из условия постоянства превышения температуры обмотки статора

$$\theta = R_b(P_k + P_x) + R_{\Sigma} [P_{m1} + k_p(P_{m2} + P_x)]. \quad (12)$$

Здесь

k_p — усредненный коэффициент влияния потерь, выделяемых вне обмотки статора, на ее перегрев над корпусом;

R_{Σ} — постоянное внутреннее тепловое сопротивление двигателя — от обмотки статора к оболочке.

Внешнее тепловое сопротивление зависит от интенсивности охлаждения оболочки; его изменение в зависимости от интенсивности охлаждения определяется коэффициентом X

$$R_b = R_{bo}X. \quad (13)$$

Значения R_{bo} , R_{Σ} и k_p определяются на основании экспериментальных исследований основного двигателя.

Из выражений (12) и (13) следует

$$D = \frac{1-X}{a+bX}, \quad (14)$$

где

$$a = \frac{R_{\Sigma}}{R_{bo}} \left[1 - \frac{(1-k_p)P_{m2o} + (1-ik_p)P_{xo}}{P_{ko} + P_{xo}} \right] \quad (15)$$

$$b = 1 - (1-i) \frac{P_{xo}}{P_{ko} + P_{xo}}. \quad (16)$$

На данном этапе рассматривается три основных фактора, влияющих на интенсивность охлаждения оболочки: поверхность охлаждения S , напор вентилятора H и гидравлическое сопротивление воздухопровода z . В качестве параметров вентиляционной системы, подлежащих оптимизации, принимаются относительные значения указанных величин:

$$\sigma = \frac{S}{S_o}, \quad (17)$$

$$h = \frac{H}{H_o}, \quad (18)$$

$$\zeta = \frac{z}{z_o}. \quad (19)$$

Расход охлаждающего воздуха

$$V = \sqrt{\frac{H}{z}} = V_0(h\zeta)^{0,5}. \quad (20)$$

Опыты показывают, что коэффициент теплоотдачи оболочки α в среднем пропорционален квадратному корню из скорости воздуха. Считая выходное сечение постоянным, можно принять такую же зависимость α и от расхода воздуха.

Тогда

$$R_b = \frac{1}{S\alpha} = \frac{R_{b0}}{\sigma h^{0,25} \zeta^{0,25}}. \quad (21)$$

Таким образом, коэффициент изменения внешнего теплового сопротивления

$$X = \frac{1}{\sigma h^{0,25} \zeta^{0,25}}. \quad (22)$$

Изменение потерь на вентиляцию при постоянстве к.п.д. вентилятора

$$y = \frac{P_b}{P_{b0}} = \frac{VH}{V_0 H_0} = h^{1,5} \zeta^{0,5}. \quad (23)$$

Стоимость двигателя при изменении вентиляционной системы можно выразить следующим образом:

$$K = K_0(1 + d) + K_\sigma + K_h + K_\zeta. \quad (24)$$

Здесь

K_0 — стоимость основного двигателя;

d — коэффициент, позволяющий учесть дополнительную экономию от снижения затрат на транспортировку и монтаж двигателя, уменьшения объема и веса производственного оборудования по месту установки двигателя и т. п. вследствие уменьшения веса и объема двигателя на единицу мощности.

$$K_\sigma = f(\sigma), K_h = f(h), K_\zeta = f(\zeta) — \quad (25)$$

повышение стоимости частей двигателя, относящихся к вентиляционной системе, в данном случае соответственно оболочки, вентилятора и направляющего кожуха.

Аналитические выражения для (25) получаем, исходя из следующего предположения: при неограниченном увеличении стоимости какой-либо детали m , например, вентилятора, соответствующий параметр вентиляционной системы h увеличивается, стремясь к некоторому максимально возможному значению h_M , причем рост происходит по экспоненте с постоянной M .

$$h = h_M \left(1 - e^{-\frac{m}{M}} \right). \quad (26)$$

При начальной стоимости, равной m_0 , $h=1$, отсюда

$$K_h = m - m_0 = m_0 \frac{\ln(h_M - 1) - \ln(h_M - h)}{\ln h_M - \ln(h_M - 1)}. \quad (27)$$

Для K_σ и K_ζ выражения аналогичны. Безусловно, выражение (27) имеет частный характер, и вопрос о действительной зависимости затрат от вентиляционных параметров требует еще дополнительного изучения.

В качестве примера рассмотрим результаты расчета удельной стоимости двигателей А02-42-4 и А02-42-2 при вариации вентиляционных

параметров. Исходные данные для расчета взяты на основе испытаний основного варианта и заводской калькуляции себестоимости.

Расчет выполнялся при крайних значениях коэффициента $i=0$ и 1 , то есть при постоянной индукции и при ее изменении в одинаковой пропорции с линейной нагрузкой. Кроме того, стоимость рассчитывалась без учета дополнительной экономии в эксплуатации ($d=0$) и с учетом ее ($d=0,5$).

Каждый из параметров σ , h и ζ изменялся в пределах от 1 до 2 при равенстве двух остальных единице.

Результаты расчета показаны на рис. 1; удельная стоимость C дана в процентах от ее значения для основного варианта ($\sigma=h=\zeta=1$), которая составляет:

для двигателя А02-42-4—2,476 руб/квт при $d=0$ и 3,191 руб/квт при $d=0,5$;

для двигателя А02-42-2 — 2,178 руб/квт при $d=0$ и 2,766 руб/квт при $d=0,5$.

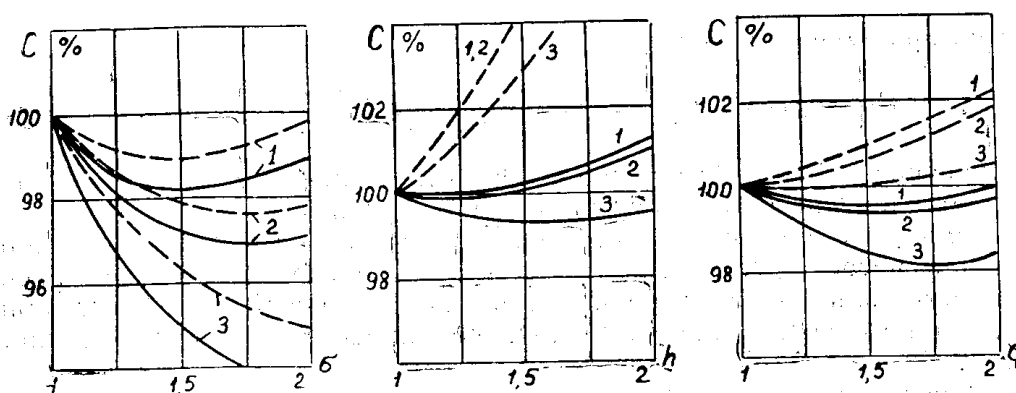


Рис. 1. Изменение удельной стоимости при раздельной вариации вентиляционных параметров:

- 1 — $i=0$, $d=0$,
- 2 — $i=1$, $d=0$,
- 3 — $i=1$, $d=0,5$.

— — — — — двигатель А02-42-4.
 - - - - - двигатель А02-42-2.

По приведенным данным видно, что увеличение поверхности охлаждения наиболее эффективно, на втором месте стоит уменьшение гидравлического сопротивления и на третьем — повышение напора вентилятора. Минимум удельной стоимости в большинстве случаев находится в рассматриваемом диапазоне изменения параметров, и для двигателя А02-42-4 на 1500 об/мин, являющегося наиболее употребительным, при $d=0$ лежит в пределах

$$\sigma=1,5-1,75; h=1,1-1,25; \zeta=1,5-1,6.$$

Таким образом, интенсификация охлаждения в данном случае экономически целесообразна, даже без учета дополнительной экономии.

Двигатель А02-42-2 на 3000 об/мин имеет такие же оптимальные значения σ , однако снижение стоимости при этом значительно меньше, увеличение h и ζ в рассматриваемом диапазоне приводит к росту стоимости в основном за счет роста вентиляционных потерь.

В целом снижение удельной стоимости незначительно и составляет при $d=0$ максимум 3,2 проц.

Учет дополнительной экономии ($d \neq 0$) увеличивает как оптимальные значения вентиляционных параметров, так и получаемый эффект.

При $i=1$ улучшение охлаждения более эффективно, чем при $i < 1$. Необходимо отметить, что в данном случае расчетные выражения существенно упрощаются:

полезная мощность

$$P = P_0 \frac{B + C(1 - X)}{1 - A(1 - X)}, \quad (28)$$

где

$$A = \frac{1}{1 + a}, \quad (29)$$

$$B = 1 + \frac{P_{bo}}{P_0}(1 - y), \quad (30)$$

$$C = A \frac{P_{bo}}{P_0} y, \quad (31)$$

потери при эксплуатации

$$P_{эj} = (fPKO + PKO) \frac{1}{1 - A(1 - X)} + P_{bo} y. \quad (32)$$

Применение аппроксимирующих формул и пренебрежение несущественно влияющими факторами позволяет привести выражение (3) к простому виду, пригодному для аналитического определения оптимальных параметров вентиляции и для качественного анализа изменения стоимости, однако это выходит за рамки настоящей статьи, поскольку в данном случае анализ достаточно провести на численных примерах.

Определение глобального оптимума выполнено в качестве примера для двигателя А02-42-4 при $i=1$ и $d=0$ путем вариации параметров. Некоторые результаты расчета показаны на рис. 2. Оптимальные значения вентиляционных параметров в данном случае составляют:

$$\sigma_0 = 1,76; h_0 = 0,88; \zeta = 1,45.$$

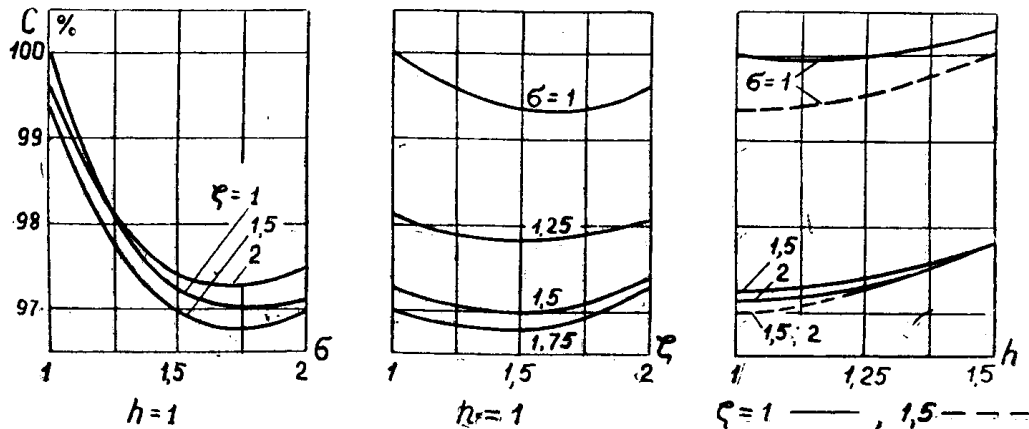


Рис. 2. Изменение удельной стоимости двигателя А02-42-4 при одновременной вариации вентиляционных параметров

Удельная стоимость в оптимальном варианте $C_{min} = 96,6\% C_0$, а мощность $P = 131\%$ от первоначальной. Таким образом, интенсификация охлаждения целесообразна. Значение C мало изменяется при довольно

значительном отклонении параметров, особенно ζ и h , от оптимальных значений.

Характерно, что частный оптимум относительной поверхности охлаждения σ практически не зависит от параметров вентилятора и кожуха ζ и h , что существенно облегчает поиск глобального оптимума.

Частные оптимумы ζ и h при увеличении поверхности охлаждения уменьшаются, также уменьшается $h_{\text{опт}}$ при увеличении ζ .

В заключение следует отметить, что при проектировании новой машины не обязательно стремиться именно к глобальному оптимуму удельной стоимости, расчет которого в силу ряда допущений не является достаточно точным. Более целесообразно увеличивать параметры σ , h и ζ в большей степени, добиваясь максимального повышения удельной мощности машины до таких пределов, при которых еще будет получаться значительный выигрыш по стоимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Ф. Филиппов. Вопросы охлаждения электрических машин, Энергия, 1964.
2. И. М. Постников. Проектирование электрических машин, Киев, 1960.
3. А. С. Консон. Экономическое обоснование проектов электрических машин, аппаратов, приборов, ГЭИ, 1963.