

К. А. АЛИХАНИЯ, Ф. П. ДАДИВАНЯН

К ВОПРОСУ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
 АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Требования, предъявляемые в настоящее время к малым электрическим машинам, противоречивы. Хорошие энергетические показатели, малошумность, повышение эксплуатационной надежности и долговечности находятся в некотором противоречии с требованиями малых габаритов и веса, уменьшения трудоемкости и др. Поэтому при создании серий или отдельных машин проектировщики должны находить компромиссные решения, в которых в возможной мере оптимально сочетаются предъявляемые требования. Что же должно служить критерием оптимальности при проектировании? В зависимости от назначения двигателей и предъявляемых к ним требований критерии оптимальности могут быть различными. Например, при проектировании электрических машин для передвижных установок, летательных аппаратов или целей спецтехники, в некоторых случаях критерием оптимальности целесообразно выбрать минимальный вес или наименьшие габаритные размеры. При проектировании электрических машин общего назначения решающим обычно является требование экономичности. В этом случае в качестве критерия выбора оптимального варианта целесообразно принять минимум суммарных затрат на двигатель при его изготовлении и эксплуатации.

Полные затраты средств на двигатель складываются из затрат на его изготовление и эксплуатацию. Затраты на изготовление складываются из затрат на материалы и прямых трудовых затрат (с накладными расходами). Приведенные ниже формулы составлены для общепринятых конструкций электрических машин.

1. Затраты на материалы

Электротехническая

сталь $Z_{Fe} = (D_a + \delta)^2 \cdot l_a \cdot \gamma_{Fe} \cdot n_{Fe} \cdot 10^{-6}$ руб.

Обмоточный провод $Z_{np} = 2.57 \cdot l_a \cdot \omega \cdot d^2 \cdot \gamma_{np} \cdot n_{np} \cdot 10^{-6}$ руб.

Алюминий ротора $Z_{Al} = 1.115 \cdot 10^{-6} [\gamma_{Al} \cdot l_a \cdot q_1 + 2\pi (1+k) \times$
 $\times D_k \cdot a \cdot b]$ руб.

Алюминиевый сплав в конструкции $Z_k = 1.172 \cdot D_a \cdot 10^{-4} [\pi \cdot L_{II} \cdot \delta_1 + 2\pi (l_b + 5) \cdot \delta_1 +$
 $+ \pi/2 \cdot D_a \cdot \delta_3 + 1/2 \cdot f \cdot b_s \cdot \delta_5]$ руб.

Сталь вала	$Z_{ст. в} = \pi/4 \cdot D_v^2 (l_{l2} + 2l_v) \cdot \gamma_{ст. в} \cdot n_{ст. в} \cdot l/k_{ст. в} \cdot 10^{-6} \text{ руб.}$
Кожух вентилятора	$Z_{к. в.} = [\pi (D_a + 2 \cdot c)(l_v + 0,2 \cdot D_a) \cdot \delta_v + \pi/4 (D_a + 2 \cdot c)^2 \cdot \delta_k] \cdot \gamma_{к. в.} \cdot n_{к. в.} \cdot l/k_{к. в.} \cdot 10^{-6} \text{ руб.}$
Изоляция пазов статора	$Z_{из} = [\pi (D_l + 2 \cdot h_{п1}) - z_1 \cdot b_{z1} + 2 \cdot z_1 \cdot h_{п1}] (l_l + 10) \times \gamma_{из} \cdot n_{из} \cdot l/k_{из} \cdot 10^{-6} \text{ руб.}$
Материал клинсьев	$Z_{кл} = (\pi \cdot D_l - z_1 \cdot b_{z1}) \cdot l_l \cdot \delta_{кл} \cdot \gamma_{кл} \cdot n_{кл} \cdot l/k_{ис} \cdot 10^{-6} \text{ руб.}$

Расход материалов на остальные элементы конструкции можно принять постоянным и исключить из рассмотрения. Действительно, коробка выводов, элементы крепления двигателя, изоляция в лобовых частях, подшипниковые узлы и др. либо совершенно не должны изменяться (крепёж, коробка выводов и др.) в различных расчетных вариантах одного и того же типоразмера, либо изменения могут быть (изоляция в лобовых частях) весьма незначительными.

Таким образом, переменные затраты на материалы равны:

$$Z_{м} = Z_{Fc} + Z_{пр} + Z_{лс} + Z_{к} + Z_{ст. в.} + Z_{к. в.} + Z_{из} + Z_{кл}.$$

2. Затраты на основную зарплату и накладные расходы

Формулы по затратам на изготовление в разработанной методике составлены следующим образом. На ряде заводов, имеющих хорошо налаженное производство двигателей малой мощности, были собраны материалы по зарплате основных рабочих, систематизированы, установлены параметры, с изменением которых изменялась зарплата и строилась зависимость зарплат от этого параметра. По характеру кривой задавалась формула связи затрат и параметров и методом наименьших квадратов определялись наиболее вероятные значения неизвестных коэффициентов. Полученная зависимость проверялась построением ее совместно с заданными точками. Здесь, как и при расчете материальных затрат, из расчетов исключены постоянные составляющие.

Штамповка листа статора $Z_{шт} = 7,92 \cdot D_a \cdot l_l \cdot 10^{-4} \text{ руб.}$

вместе с листом ротора

Шихтовка листов статора $Z_{ш} = 2,364 \cdot l_l \cdot 10^{-4} \text{ руб.}$

и ротора

Механическая обработка $Z_{м1} = 0,764 \cdot D_a \cdot 10^{-4} \text{ руб.}$

статора

Механическая обработка $Z_{м2} = 0,0056 \cdot D_l \cdot l_l \cdot 10^{-4} \text{ руб.}$

ротора

Литье и механическая $Z_{лм} = 2,9 \cdot D_a \cdot 10^{-4} \text{ руб.}$

обработка щитов

Бандажировка лобовых $Z_6 = 7,126 \frac{D_a + 3D_l}{4} \cdot 10^{-4} \text{ руб.}$

частей обмотки статора

$$\begin{aligned} \text{Намотка катушек} \\ \text{статора} \quad Z_2 = d_{\text{ст}} \cdot \omega \left(0,97 - \frac{372,6}{\omega} - \frac{0,0204}{d_{\text{ст}}} - \right. \\ \left. - 0,9395 \cdot d_{\text{ст}} \right) \cdot 10^{-4} \text{ руб.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Укладка обмотки} \\ \text{статора} \quad Z_3 = \frac{m \cdot \omega \cdot 10^{-6}}{1 - d_{\text{ст}}/b_{\text{ст}}} (1,53 - 0,33 \rho) (0,835 \cdot l_1 + \\ + 0,237 \cdot D_1 + 0,00298 \cdot l_2 \cdot D_1) \text{ руб.} \end{aligned}$$

Таким образом, переменные основные трудовые затраты на один двигатель равны сумме вычисленных затрат:

$$Z_{\text{тр}}^* = Z_{\text{шт}} + Z_{\text{ог}} + Z_{\text{м1}} + Z_{\text{м2}} + Z_{\text{м}} + Z_{\text{б}} + Z_2 + Z_3.$$

Обозначив величину накладных расходов (цеховых и общезаводских) в долях зарплаты через H , для переменной части полных трудовых затрат можно записать

$$Z_{\text{тр}} = Z_{\text{тр}}^* (1 + H) \text{ руб.}$$

Обозначив процент непроизводительных расходов как $(k_k - 1) \times 100$, получим переменную часть полной себестоимости двигателя:

$$C_2 = k_k (Z_{\text{м}} + Z_{\text{тр}}) \text{ руб.}$$

Учитывая, что для двигателей рассматриваемого класса норматив рентабельности P установлен -10% от полной себестоимости, переменная часть цены двигателя выразится так:

$$\text{Ц}_2 = 1,1 \cdot C_2 = 1,1 \cdot k_k (Z_{\text{м}} + Z_{\text{тр}}) \text{ руб.}$$

3. Эксплуатационные затраты

Входящие сюда затраты на текущий ремонт, зарплату обслуживающего персонала, отчисления на соцстрах и накладные можно принять постоянными, не зависящими от изменения параметров в различных расчетных вариантах одного и того же типоразмера двигателя, и исключить из дальнейшего расчета.

$$\text{Затраты на оплату потерь} \quad Z_4 = h \cdot \frac{P_n}{\gamma} (1 + a - \eta) \cdot n_1 \cdot 10^{-3} \text{ руб.} \\ \text{активной электроэнергии}$$

$$\text{Затраты на компенсацию} \quad Z_5 = k_c \cdot h_k \cdot \frac{P_r}{\eta} (tg \varphi_2 - 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ руб.} \\ \text{потребляемой ненормативной реактивной энергии}$$

$$\text{Амортизационные отчисления} \quad Z_6 = 0,102 \cdot \text{Ц}_2 \text{ руб.} \\ \text{нормированы [1]}$$

Общие затраты на двигатель в процессе изготовления его и эксплуатации в расчете на год определяются суммированием вычисленных выше затрат с учетом одновременности части из них.

Установка двигателя и компенсационных установок являются капиталовложениями, поэтому в расчет должны быть введены нормативные сроки окупаемости для двигателя — $T_{н.д.}$ (3–5 лет) и компенсаторов — $T_{н.к.}$ (8–10 лет).

Суммарные затраты в расчете на год равны

$$\Sigma Z = \frac{C_1}{T_{н.д.}} + \frac{Z_0}{T_{н.к.}} + Z_{эм} + Z_1 \text{ руб./год. шт.} \quad (1)$$

Из рассмотренного ясно, что сумма затрат (1) на двигатель в процессе его изготовления и эксплуатации является именно тем необходимым при проектировании экономическим показателем, который, действительно, объединяет в себе экономические эквиваленты всех основных факторов, связанных с двигателем. Естественно, что при проектировании окончательный оптимальный вариант следует выбрать путем сравнения вариантов по условию $\min \Sigma Z$.

В свете изложенного критерием оптимальности при проектировании трехфазных асинхронных двигателей малой мощности общепромышленного назначения является минимум суммарных затрат на двигатель в процессе его изготовления и эксплуатации.

В случае, когда двигатель спроектирован по этому условию, можно считать, что найдено компромиссное решение, при котором оптимально учтены все слагающие суммарных затрат, правильно определены их удельный вес. В этом случае оптимальное решение отражает конкретно существующее у нас соотношение стоимостей материалов, уровня технологий, стоимости электроэнергии, стоимости компенсации реактивной энергии и др.

С использованием разработанной методики на ЭЦВМ были проведены расчеты асинхронных двигателей.

Принятые обозначения:

D_0 — внешний диаметр пакета статора (мм); D_1 — внутренний диаметр пакета статора (мм); D_2 — средний диаметр к.з. кольца (мм); D_3 — диаметр заготовки вала (мм); l_1 — длина пакета статора (мм); l_2 — длина пакета ротора (мм); l_3 — вылет лобовой части (мм); l_4 — средняя длина витка (мм); m — число фаз; w — число витков в фазе; z_1 — число пазов статора; z_2 — число пазов ротора; f — число лопастей вентилятора; $h_{с1}$ — высота паза статора (мм); $b_{з1}$ — ширина зуба статора (мм); c — высота ребер (мм); d_0 — диаметр провода без изоляции (мм); $a \times b$ — размеры к.з. кольца (мм × мм); q_r — сечение стержня ротора (мм²); δ — толщина материала (мм); n — цена материала (руб./кг); γ — удельный вес материала (г/см³).

ВНИИКЭ

Поступило 13.III.1967

Л И Т Е Р А Т У Р А

1 Нормы амортизационных отчислений по основным фондам народного хозяйства СССР, Госплан СССР, 1961.