

1. Выбор основных параметров и размеров гидродвигателя

1.1 Отношение внутреннего диаметра маховика к наружному d/D

Для миниатюрных ГД наиболее рациональным является следующее соотношение $d/D = 0,8 - 0,85$. Примем $d/D = 0,8$.

1.2 Отношение длины к внешнему диаметру маховика L/D

Для одностаторных следует выбирать $L/D \approx 0,4 - 0,8$. Примем $L/D = 0,7$.

1.3 Отношение длины статора к внутреннему диаметру маховика L_1/d

$L_1/d \approx 0,55 - 1,0$. Выберем $L_1/d = 0,85$.

1.4 Отношение длины ротора к внутреннему диаметру маховика

Для двигателей обращенного исполнения составляет $L_2/d \approx 0,35 - 0,7$ выберем $L_2/d = 0,45$.

1.5 Внутренний диаметр статора к внутреннему диаметру маховика

$d_0/d \approx 0,2 - 0,3$, примем $d_0/d = 0,27$.

1.6 Исходя из требуемого момента двигателя, выберем следующие геометрические размеры:

$D = 4,1$ см, тогда $d = 3,28$ см, $d_0 = 0,9$ см, $L = 2,05$ см, $L_1 = 2,75$ см, $L_2 = 1,5$ см.

1.7 Предварительно масса вращающихся частей ГД

$$m_M = \frac{\pi}{4} D^3 \frac{L}{D} \left\{ \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right] \cdot Q_M + \left(\frac{d}{D} \right)^2 \left[\frac{L_2}{L} \left(1 - \frac{1}{k_d^2} \right) \cdot Q_2 + \frac{2b_d}{L} Q_K \right] \right\} =$$
$$= \frac{3,14}{4} 4,1^3 \cdot 0,5 \left\{ \left[1 - (0,8)^2 \right] \cdot 1,85 + (0,8)^2 \left[\frac{1,5}{2,05} \left(1 - \frac{1}{1,075^2} \right) \cdot 9,68 + \frac{2 \cdot 0,11}{2,05} 2,8 \right] \right\} =$$
$$= 39,6 \text{ г,}$$

где b_d – толщина крышки;

k_d^2 – относительная толщина ротора;

Q_M, Q_K, Q_2 – соответственно плотности материала маховика, крышек и ротора электродвигателя.

1.8 Определение кинетического момента цилиндрического маховика

Оценим кинетический момент, имея в виду упрощённую их форму по рисунку из [1, рис 6.9а]:

$$\begin{aligned}
 H &= 1,025 \cdot 10^{-2} \cdot D^5 n_c \frac{L}{D} \left\{ \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] \cdot Q_m + \left(\frac{d}{D} \right)^4 \left[\frac{L_2}{L} \cdot \left(1 - \frac{1}{k_d^4} \right) Q_2 + \frac{2b_d}{L} Q_k \right] \right\} = \\
 &= 1,025 \cdot 10^{-2} \cdot 4,1^5 \cdot 24000 \cdot 0,5 \cdot \\
 &\quad \cdot \left\{ \left[1 - (0,8)^4 \right] \cdot 1,85 + (0,8)^4 \left[\frac{1,5}{2,05} \cdot \left(1 - \frac{1}{1,075^4} \right) 9,68 + \frac{2 \cdot 0,11}{2,05} 2,8 \right] \right\} = \\
 &= 2,74 \cdot 10^5 \text{ г} \cdot \text{см}^2 / \text{сек} .
 \end{aligned}$$

2. Исходные данные для электромагнитного расчета гидродвигателя

2.1 Номинальный момент двигателя M_H представляет собой момент собственных механических потерь:

$$M_H = M_A + M_{T.П} = 0,017 + 0,062 = 0,079 \text{ Н} \cdot \text{см}.$$

2.2 Для ГД работающего в гелии, аэродинамический момент может быть определен по формуле [1, 4.17]

$$M_A = 1,36 \cdot 10^{-6} \mu^{0,5} \cdot \rho^{0,5} \cdot n^{1,5} \cdot \oint_L r^3 dl .$$

Параметры среды при давлении 200 мм.рт.ст. и ожидаемой температуре -50°C получим по данным пособия [1, табл. 4.1]:

$$\checkmark \text{ плотность } \rho = 0,165 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{293 \cdot 200}{223 \cdot 760} = 0,57 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3 ;$$

$$\checkmark \text{ динамическая вязкость } \mu = 1,97 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{223}{293} \right)^{0,68} = 1,63 \cdot 10^{-4} \text{ г/см} \cdot \text{сек};$$

тогда $\rho^{0,5} \cdot \mu^{0,5} = 0,96 \cdot 10^{-4}$.

Для внешней поверхности, $\oint_L r^3 dl$ контурный интеграл раскрывается в виде:

$$\begin{aligned}
 A &= \oint_L r^3 dl = \int_0^{1,5} r^3 dr + \int_{1,5}^2 r^3 \frac{dr}{\cos \alpha} + \int_0^2 \left(\frac{D}{2} \right)^3 dl + \int_{1,5}^2 r^3 \frac{dr}{\cos \beta} + \int_0^{1,5} r^3 dr = \\
 &= \frac{1}{4} \cdot 1,5^4 + \frac{1}{4} \frac{(2,05^4 + 1,5^4)}{\cos 50^\circ} + 2,1^3 \cdot 2,05 + \frac{1}{4} \frac{(2,05^4 + 1,5^4)}{\cos 50^\circ} + \frac{1}{4} \cdot 1,5^4 = 26,6 \text{ см}^4,
 \end{aligned}$$

где α, β – углы скоса наружной поверхности крышек гидродвигателя (см. рис.1).

Для внутренней поверхности маховика:

$$B = \oint_L r^3 dl = \int_{0,6}^{1,4} r^3 dr + \int_0^{1,48} \left(\frac{d_3}{2} \right)^3 dl + \int_{0,5}^{1,4} r^3 dr =$$

$$= \frac{1}{4} \cdot (1,4^4 - 0,6^4) + \frac{3,065^3}{2} \cdot 1,48 + \frac{1}{4} \cdot (1,4^4 - 0,5^4) = 7,64 \text{ см}^4.$$

Тогда для внешней и внутренней поверхности маховика аэродинамический момент равен:

$$M_A = M_{a1} + M_{a2} = 1,36 \cdot 10^{-6} \mu^{0,5} \cdot \rho^{0,5} \cdot n^{1,5} (A + B) = \\ = 1,36 \cdot 10^{-6} \cdot 0,96 \cdot 10^{-4} \cdot 24000^{1,5} (26,6 + 7,64) = 0,017 \text{ Н} \cdot \text{см}.$$

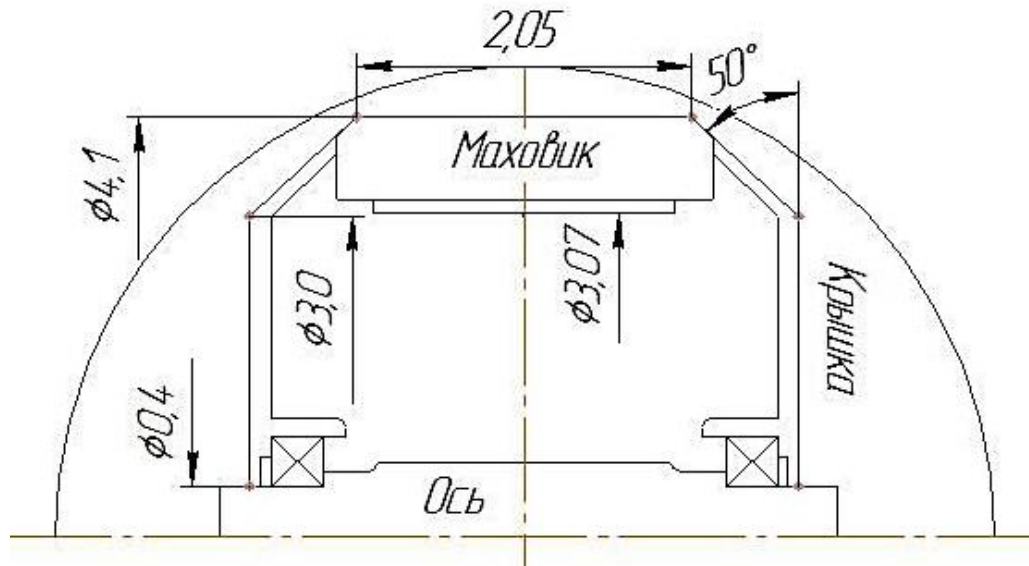


Рисунок 1 – Эскиз гидродвигателя без статора

2.3 Момент трения в подшипниках $M_{т.п}$, Н·см.

Выберем подшипник удовлетворяющий следующему выражению [1, 3.2]:

$$z_{ш} d_{ш}^2 \geq k \frac{m_M}{10^5 \sin \beta_0} = 20 \frac{39,6}{10^5 \sin 35^\circ} = 0,014,$$

где k – максимальная кратность внешних перегрузок;

β_0 – начальный угол контакта;

m_M – масса вращающихся частей;

По таблице [1, табл. 3.4] выбираем подшипник С1006094Е, у которого $z_{ш} d_{ш}^2 = 6 \cdot 0,2^2 = 0,24$.

Число шариков $z_{ш} = 6$, диаметр шариков $d_{ш} = 0,2$, а внутренний и наружный диаметры подшипника соответственно равны $d_{вн.} = 0,4$; $d_{вн.} = 1,1$ см.

По формуле [1, 3.13] радиус на беговой дорожке внутреннего кольца $r_o = 0,263$ см, а диаметр по центрам шариков $D_o = 2 \cdot r_o + d_{ш} = 2 \cdot 0,263 + 0,2 = 0,726$ см. Предварительная осевая нагрузка на подшипники составляет $A_{z0} = 10$ Н.

Для пары подшипников приближенно по формуле [1, 3.14]

$$M_{т.п} = 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot A_{z_0} \cdot \frac{D_0}{d_{ш}} \frac{1}{\sqrt[3]{z_{ш} \cdot d_{ш}}} + 4,4 \cdot 10^{-6} D_0^3 n =$$

$$= 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot \frac{0,726}{0,2} \frac{1}{\sqrt[3]{6 \cdot 0,2}} + 4,4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,726^3 \cdot 24000 = 0,062 \text{ Н} \cdot \text{см}.$$

Оценим срок службы до разрушения подшипника по причине усталостных деформаций. Долговечность рассчитывается по коэффициенту работоспособности [1, 3.1]:

$$h = \frac{1}{n} \left(\frac{C}{Q} \right)^{3,3} = \frac{1}{24000} \left(\frac{0,48 \cdot 10^4}{20} \right)^{3,3} = 3100 \text{ час},$$

где Q – эквивалентная нагрузка в Н;

C – коэффициент работоспособности, соответствующий стандартам 90% надежности,

$$C = 4,1 \cdot 10^4 \frac{d_{ш}^2 \cdot z_{ш}^{2,3} \cdot \cos \beta_0}{1 + 0,2 \cdot d_{ш}} = 4,1 \cdot 10^4 \frac{0,2^2 \cdot 6^{2,3} \cdot \cos 20^\circ}{1 + 0,2 \cdot 0,2} = 0,48 \cdot 10^4 \text{ Н},$$

где β_0 – первоначальный угол контакта.

2.4 Требуемая при данной кратности электромагнитная мощность при пуске определяется как

$$P_{э.п.} = \frac{1,045 \cdot 10^{-3} \cdot n_c \cdot M_H \cdot k_M}{\eta_{2п}} = \frac{1,045 \cdot 10^{-3} \cdot 24 \cdot 10^3 \cdot 0,079 \cdot 1,5}{0,9} = 3,3 \text{ Вт},$$

где $\eta_{2п}$ – к.п.д. выхода СГД в пуске;

k_M – кратность максимального момента из условия надежной работы.

2.5 Число пар полюсов

$$p = \frac{60f}{n_c} = \frac{60 \cdot 400}{24000} = 1$$

2.6 Распределение объема двигателя на ротор и статор

При обращенном исполнении ГД величина k_a непосредственно равна относительной толщине ротора $\beta = \frac{d_2}{d_3} \approx \frac{d_2}{d_1}$. Это накладывает особые условия на выбор k_a для гистерезисного ГД. В [1, рис. 7.3, а] приведены рекомендуемые значения $k_a = \beta$. В соответствии с величиной момента и наружного диаметра ротора, примем $k_a = 1,075$

$$d_1 = \frac{d}{k_a} = \frac{3,28}{1,075} = 3,05$$

3. Электромагнитный расчет двигателя

3.1 Выбор обмотки статора

Обмотка статора ГД – это обычно двухслойная петлевая обмотка. Двухслойные обмотки в сравнении с однослойными дают возможность любого укорочения, меньший вылет лобовых частей, а следовательно, большую длину пакета статора при постоянной полной его длине [1].

Из-за относительно малых размеров ГД величина q_1 числа зубцов на полюс и фазу ограничена обычно 2 – 3. Примем $q_1 = 2$.

3.1.1 Число зубцов статора

$$Z_1 = 2p \cdot m_1 \cdot q_1 = 2 \cdot 3 \cdot 2 = 12$$

3.1.2 Шаг обмотки статора

$$y = \frac{y_z}{m_1 \cdot q_1} = \frac{5}{3 \cdot 2} = 0,833,$$

где y_z – зубцовый шаг для $p = 1$ и $Z_1 = 12$ равен пяти пазам.

3.2 Рациональный штамп статора

Величиной, характеризующей распределение объема статора на «медь» и «сталь», является относительная площадь пазов статора $\xi_{ш1}$.

Рекомендуемые значения $\xi_{ш1}$ приведены в [1, рис. 7.5, а], примем $\xi_{ш1} = 0,42$. Рассмотренный выбор $\xi_{ш1}$ и k_d позволяет далее произвести однозначный расчет электродвигателя в данных габаритах на заданный момент нагрузки.

Пакет статора выполняется из электротехнической стали Э44 (ГОСТ 802-58). Плотность стали $Q_{cm} = 7,55 \text{ г/см}^3$, удельное сопротивление $0,57 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, кривая намагничивания представлена в [1, рис. 8.2].

Коэффициент заполнения сталью пакета статора при толщине листа и его изоляции 0,2 мм равен $k_{cm1} = 0,91$.

3.2.1 Отношение индукций

$$\frac{B_\delta}{B_1} = k_{cm1} \left[\left(1 - \frac{2h_{ш1}}{d_1} \right) - \sqrt{\left(\frac{d_0}{d_1} \right)^2 + \frac{\xi_{ш1}}{\varepsilon_{ш}} \left(1 - \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^2 \right)} \right]$$
$$\frac{B_\delta}{B_1} = 0,91 \left[\left(1 - \frac{2 \cdot 0,05}{3,05} \right) - \sqrt{\left(\frac{0,9}{3,05} \right)^2 + \frac{0,42}{0,9} \left(1 - \left(\frac{0,9}{3,05} \right)^2 \right)} \right] = 0,228,$$

где k_{cm1} – коэффициент заполнения сталью пакета статора из [1, табл. 8.2];

$h_{ш1}$ – высота шлица паза из [1, табл. 8.3];

ε_{II} – коэффициент, учитывающий отличие реального паза от расчетного.

3.2.2 Технологическая выполняемость статора

Возможность выполнения статора при выбранных сочетания ξ_{m1} и k_d может быть сразу же проверена. Должны выполняться следующие условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{B_\delta}{B_1} \geq \frac{Z_1 k_{cm1} k_d}{\pi d} b_{z1min} \\ \frac{B_\delta}{B_1} \geq 2 p k_{cm1} \frac{k_d}{d} h_{a1min} \end{array} \right\},$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,228 \geq 0,12 \\ 0,228 \geq 0,1 \end{array} \right\}.$$

Условие технологичности выполнения статора приданных размерах выполняется

3.2.3 Ширина зубца статора

$$b_{z1} = \frac{t_{z1}}{k_{cm1}} \left(\frac{B_\delta}{B_1} \right) = \frac{0,798}{0,91} \cdot 0,228 = 0,2 \text{ см},$$

где зубцовое деление статора $t_{z1} = \frac{\pi \cdot d_1}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 3,05}{12} = 0,798 \text{ см}.$

3.2.4 Площадь паза

$$Q_{m1} = \frac{\pi}{4Z_1} d_1^2 \left(1 - \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^2 \right) \xi_{m1} = \frac{\pi}{4 \cdot 12} 3,05^2 \left(1 - \left(\frac{0,9}{3,05} \right)^2 \right) 0,42 = 0,233 \text{ см}^2$$

3.2.5 Геометрия паза

Диаметр большей окружности

$$d_{m1} = \frac{\pi(d_1 - 2h_{u1}) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 + \pi} = \frac{\pi(3,05 - 2 \cdot 0,05) - 12 \cdot 0,2}{12 + \pi} = 0,453 \text{ см};$$

Диаметр меньшей окружности

$$d_{m0} = \sqrt{\frac{d_{m1}^2 (Z_1 + 5) - 4\pi Q_1}{Z_1 - 5}} = \sqrt{\frac{0,453^2 (12 + 5) - 4\pi \cdot 0,233}{12 - 5}} = 0,283 \text{ см};$$

Расстояние между центрами окружностей

$$h = \frac{d_{m1} - d_{m0}}{2\pi} Z_1 = \frac{0,45 - 0,28}{2\pi} 12 = 0,326 \text{ см}.$$

Высота паза

$$h_{z1} = h + h_{m1} + \frac{d_{m1} + d_{m0}}{2} = 0,326 + 0,05 + 0,368 = 0,744 \text{ см}.$$

Высота спинки статора

$$h_{a1} = \frac{d_1}{2} \left(1 - \frac{d_0}{d_1}\right) - h_{z1} = \frac{3,05}{2} \left(1 - \frac{0,9}{3,05}\right) - 0,744 = 0,331 \text{ см.}$$

При равенстве индукций в зубце и спинке статора их размеры связаны вполне определенно:

$$\frac{h_{a1}}{b_{z1}} \approx \frac{Z_1}{2\pi p}, \quad \frac{0,33}{0,2} \approx \frac{12}{2\pi \cdot 1} = 1,8$$

Условие размещения лобовых частей обмотки статора:

$$d_1 - 2h_{z1} \geq d_n, \\ 1,56 \geq 1,4$$

Величина относительной площади пазов ξ_{m1} выбрана корректно, все пазы размещаются по ободу статора с требуемым зазором b_{z1} . Лобовые части свободно размещаются в требуемом промежутке.

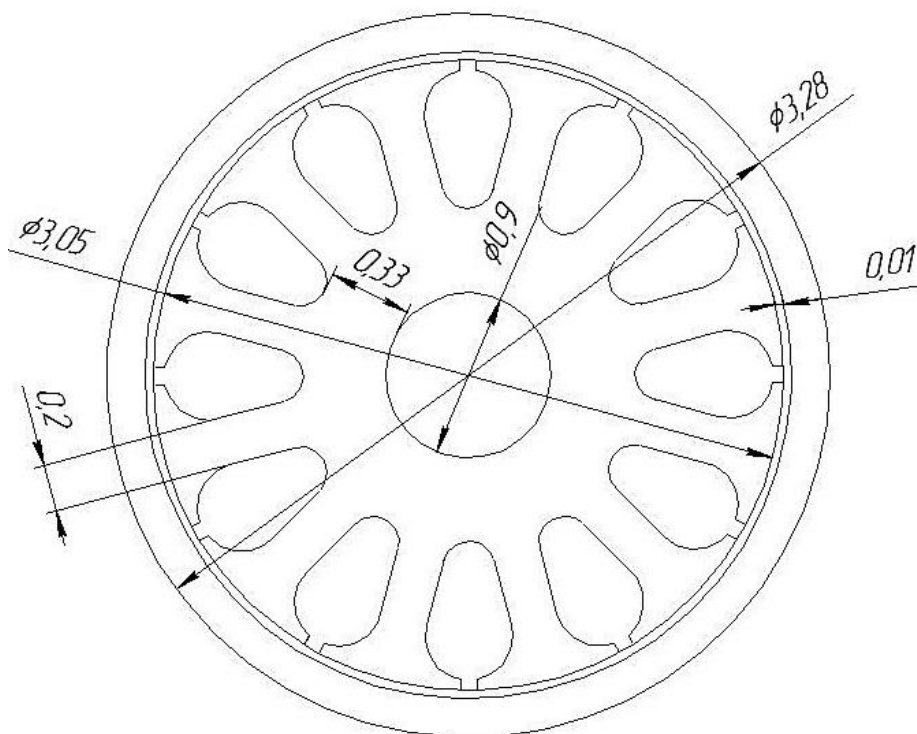


Рисунок 2 – Эскиз листов статора вместе с ротором

3.3 Определение размеров статора

3.3.1 Полусное деление

$$\tau = \frac{\pi d_1}{2p} = \frac{3,14 \cdot 3,05}{2} = 4,79 \text{ см.}$$

3.3.2 Высота лобовых частей

$$b_{a1} = \frac{1}{2} [(d_1 - 2h_{m1}) - d_n] = \frac{1}{2} [(3,05 - 0,1) - 1,4] = 0,77 \text{ см.}$$

3.3.3 Вылет лобовых частей

$$2f_{л1} = \frac{\pi k_{3.л.}}{4 k_{3.л.}} \cdot \frac{y}{p} \frac{d_1^2 (1 - d_0/d_1)}{d_1 (1 - 2h_{ш1}/d_1) - d_{п}} \cdot \xi_{л1} =$$
$$= \frac{\pi 0,32}{4 0,38} \cdot \frac{0,833}{1} \frac{3,05^2 (1 - 0,9/3,05)}{3,05 (1 - 0,1/3,05) - 1,4} \cdot 0,42 = 1,26 \text{ см,}$$

где $k_{3.л.}$ – коэффициент заполнения паза голым проводом по [1, рис. 8.5];

$k_{3.л.}$ – коэффициент заполнения лобовых частей, учитывающий изоляцию провода, выбирается от 0,3 до 0,45.

3.3.4 Длина пакета статора

$$l_1 = L_1 - 2f_{л1} = 2,75 - 1,26 = 1,48 \text{ см.}$$

3.4 Воздушный зазор

Воздушный зазор выбирается минимальным для уменьшения тока, улучшения $\cos \varphi$ и η . Ограничения по снижению зазора в основном связаны с технологическими и механическими причинами. Кроме того, при уменьшении зазора δ из-за роста амплитуды зубцовых гармоник и относительно эксцентриситета увеличиваются дополнительные потери и искажения механической характеристики ГД.

Для миниатюрных (при $d_1 < 3,5$ см) выбирается δ от 0,01 до 0,015 см. Примем $\delta = 0,01$ см.

3.5 Выбор материала ротора и определение основных величин

3.5.1 Гистерезисный материал

Свойства магнитных материалов, применяемых для роторов СГД, в значительной степени определяют все его характеристики. Семейство петель гистерезиса или хотя бы построенные на основании их зависимости $B_m = f(H_m)$ и $P_{Г0} = f(B_m)$, представленные в [1, рис. 5.9, б] характеризуют материал при его использовании в СГД.

Петля гистерезиса не только дает величины удельных потерь на гистерезис $P_{Г0}$ и напряженности поля H_m , но и позволяет получить магнитное состояние ротора и характеристики СГД при изменении нагрузки, действии высших гармоник, несимметрии напряжения и при перевозбуждении двигателя.

Необходимое условие оптимального проектирования СГД является обеспечение работы его материала на определенной петле гистерезиса с

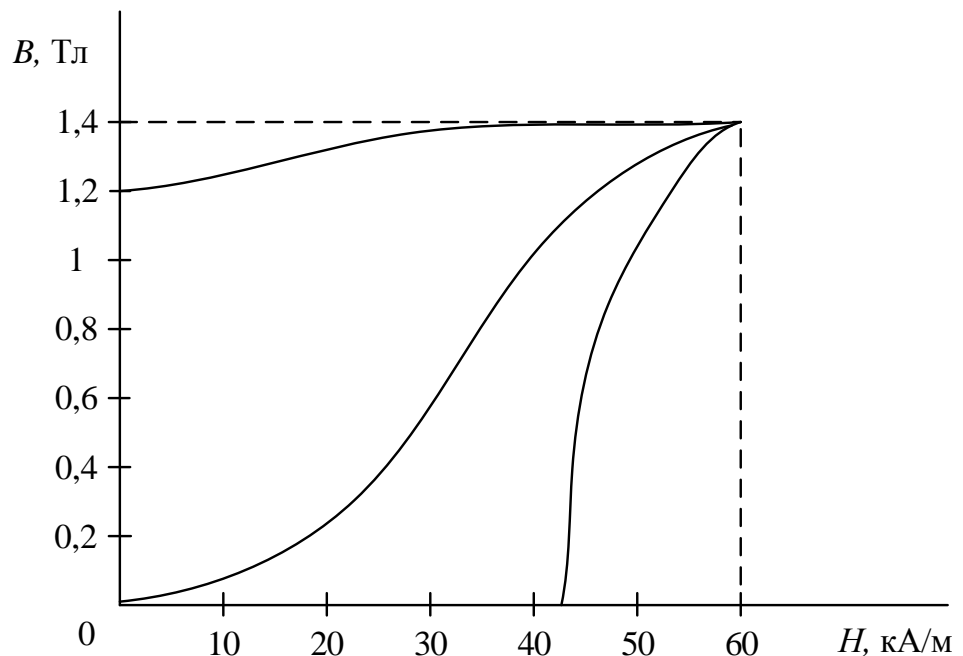


Рисунок 3 – Зависимость $B = f(H)$ для сплава Fe–Cr–Co

максимальным значением коэффициента выпуклости $k_B = k_{em}$. Для этого необходимо получить в роторе соответствующую индукцию $B_p = B_{my}$

До недавнего времени в качестве гистерезисного материала использовали сплав Fe – Co – V (викаллой). В настоящее время разработан сплав Fe – Cr – Co обладающий лучшими магнитными свойствами: остаточной индукцией $B_r = 1,15 \div 1,38$ Тл, коэрцитивной силой $H_c = 160 \div 460$ А/см, и энергией магнитного поля $(BH)_{max} = 29 \div 48$ кДж/м³. Для получения более высоких показателей в данный сплав добавляют другие компоненты (Ni, Mo, C, W) изменяют их содержание, а также регулируют условия термообработки и скорость охлаждения.

Помимо этого данный сплав не боится механической и термической обработок. Поэтому его можно с уверенностью устанавливать во внутреннюю поверхность маховика при помощи горячей посадки.

На основании характеристики материала Fe–Cr–Co. (рис. 3), находим значение рабочей индукции $B_{my} = 1,25$ Тл, напряженности поля $H_{my} = 500$ А/см, коэрцитивной силы $H_c = 420$ А/см, а также $B_m = 1,4$ Тл и $H_m = 600$ А/см. Максимальный коэффициент выпуклости в среднем $k_{em} = 0,62$ [3].

3.5.2 Влияние механических напряжений на магнитные свойства материала

При посадке втулки ротора в маховик магнитные характеристики материала под действием сжимающих напряжений изменяются. При

сжимающих напряжениях, когда активная часть ротора запрессовывается в маховик, при неизменной индукции напряженность поля возрастает, а удельные потери и k_B уменьшаются. Величина натяга при посадочном диаметре 3,2 см и глухой посадке по 1 классу точности может составлять от 1 до 33 мк. В расчет должен быть введен максимально возможный натяг $\Delta_{п.н.} = 30 \cdot 10^{-4}$ см.

Изменение магнитных свойств учтем по формулам [1, 10.1 – 10.3]:
 увеличение напряженности поля – через $k_{\Delta H} = 1 + \alpha_{\Delta H} \cdot \frac{\Delta_{п.н.}}{d_2} =$
 $= 1 + 2 \cdot 10^2 \cdot \frac{30 \cdot 10^{-4}}{3,2} = 1,187$; уменьшение удельных потерь – через
 $k_{\Delta P} = 1 - \alpha_{\Delta P} \cdot \frac{\Delta_{п.н.}}{d_2} = 1 - 1,5 \cdot 10^2 \cdot \frac{30 \cdot 10^{-4}}{3,2} = 0,86$, где принято $\alpha_{\Delta H} = 2 \cdot 10^2$ и
 $\alpha_{\Delta P} = 1,5 \cdot 10^2$.

3.5.3 Расчет требуемой индукции в воздушном зазоре

Величину индукции в воздушном зазоре, требуемой для обеспечения нужной мощности при условии максимального к.п.д. в номинальном режиме, определим по формуле [1, 10.28]. Для этого найдем входящие сюда коэффициенты.

Приведенный воздушный зазор $\delta^* = k_\delta \cdot \delta \cdot k_\mu = 1,05 \cdot 0,01 \cdot 1,1 = 0,012$ см, где коэффициент воздушного зазора находится по [1, 8.54] $k_\delta = k_{\delta 1} = 1,05$, а коэффициент насыщения предварительно зададим $k_\mu \approx 1,1$ (уточнение его произведем в дальнейшем после расчета магнитной цепи).

Коэффициент рассеяния потока в роторе выбираем $\sigma = 1,05$, так как магнитная жесткость материала ротора невелика, и вблизи ротора нет элементов из магнитомягких материалов.

Синус гистерезисного угла сдвига первых гармоник индукции и напряженности поля в роторе при номинальном режиме работы $\sin \gamma_{1H}$ определим из [1, рис. 10.3а]. Здесь расчетный коэффициент выпуклости рабочей петли распределения – по [1, 10.6]

$$k_B^* = \frac{1}{k_M} \frac{k_{\Delta P}}{k_{\Delta H}} \frac{\eta_{2П}}{\eta_{2H}} \cdot k_B = \frac{1}{1,5} \frac{0,86}{1,18} \frac{0,9}{0,87} \cdot 0,62 = 0,31,$$

а расчетная относительная коэрцитивная сила – по [1, 10.7]

$$h_C^* = \frac{1}{k_M \cdot k_{\Delta H}} \frac{H_C}{H_m} \frac{\eta_{2П}}{\eta_{2H}} = \frac{1}{1,5 \cdot 1,18} \frac{420}{600} \frac{0,9}{0,87} = 0,4$$

где k_M – кратность пускового момента.

«к.п.д. выхода» для нормального режима

$$\eta_{2H} = \frac{1}{C_M} = \frac{1}{1,15} = 0,87.$$

Коэффициент механической характеристики

$$C_M = 1 + 0,04 \cdot \frac{\left(\frac{b_{ш1}}{\delta}\right)^2}{2,5 + \left(\frac{b_{ш1}}{\delta}\right)} = 1 + 0,04 \cdot \frac{\left(\frac{0,08}{0,01}\right)^2}{2,5 + \left(\frac{0,08}{0,01}\right)} = 1,15.$$

Тогда из рисунка [1, рис.10.3] $\sin \gamma_{1H} = 0,5$, а относительная амплитуда первой гармоники напряженности поля для нормального режима

$$\left(\frac{H_1}{H_m}\right)_H = 0,9.$$

По формуле [1, 10.22] находим

$$\zeta = 26 \cdot 10^6 \frac{Q_{r1} l_{\omega 1}}{k_{\omega 1}^2 k_3 \xi_{n1} (1 - \alpha_0^2)} = 26 \cdot 10^6 \frac{2,06 \cdot 10^{-6} \cdot 4,67}{0,934^2 \cdot 0,32 \cdot 0,42 \cdot (1 - 0,29^2)} = 2339,$$

где при ожидаемом перегреве обмотки статора в 60°C (температура примерно 75°C) по формуле [1, 8.32] удельное сопротивление $Q_{r1} = 2,06 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, а по [1, 8.33] и [1, 8.34] общая длина полувитка обмотки $l_{\omega 1} = l_1 + l_{r1} = 1,48 + 3,18 = 4,67$ см.

Из выражений [1, 10.24] и [1, 10.11б]:

$$\theta = 15,8 \cdot p \frac{\delta}{d_1} \zeta = 15,8 \cdot 1 \frac{0,012}{3,05} \cdot 2339 = 145,4$$

$$\psi_1 = \pi^2 d_1^2 l_1 v_{cn} = 3,14^2 \cdot 3,05^2 \cdot 1,48 \cdot 0,157 = 21,35$$

$$\begin{aligned} \text{где } v_{cn} &= \frac{k_{об} \cdot p_0 \cdot Q_{cm}}{k_{cm} \cdot Z_1} \left[\frac{h_{z1}}{b_{z1}} + \frac{Z_1}{4\pi \cdot p^2} \cdot \frac{(d_1 - 2h_{z1}) + d_0}{(d_1 - 2h_{z1}) - d_0} \right] = \\ &= \frac{2,5 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3} \cdot 7,5}{0,91 \cdot 12} \left[\frac{0,744}{0,2} + \frac{12}{4\pi \cdot 1^2} \cdot \frac{(3,05 - 2 \cdot 0,744) + 0,9}{(3,05 - 2 \cdot 0,744) - 0,9} \right] = 0,157; \end{aligned}$$

p_0 – удельные потери данной марки стали при рабочей частоте 400 Гц и толщине листа 0,2 мм из [1, табл. 8.6], а плотность стали – $Q_{cm} = 7,55 \text{ г/см}^3$.

По формуле [1, 10.23]

$$\psi = \psi_1 + 0,25 \frac{\theta^2}{\zeta} = 21,35 + 0,25 \frac{145,4^2}{2339} = 23,6$$

Находим индукцию в воздушном зазоре из [1, 10.28]

$$B_{\delta} \approx \frac{\sqrt{\frac{p \cdot \sigma}{d_2^2 \cdot l_1 \cdot f \cdot \sin \gamma_{1H}} \cdot P_{\text{э.н}} \cdot \sqrt{\frac{\zeta}{\psi}}}}{1 - \sqrt{\frac{P_{\text{э.н}}}{d_2^2 \cdot l_1 \cdot f \cdot p \cdot \sigma \cdot \sin \gamma_{1H} \cdot B_{\text{мг}}^2} \cdot \sqrt{\frac{\zeta}{\psi}}}} =$$

$$= \frac{\sqrt{\frac{1 \cdot 1,05}{3,28^2 \cdot 1,48 \cdot 400 \cdot 0,5} \cdot 2,3 \cdot \sqrt{\frac{2339}{23,6}}}}{1 - \sqrt{\frac{2,3}{3,28^2 \cdot 1,48 \cdot 400 \cdot 1 \cdot 1,05 \cdot 0,5 \cdot 1,25^2} \cdot \sqrt{\frac{2339}{23,6}}}} = 0,09 \text{ Тл}$$

где по [1, 10.9] требуемая электромагнитная мощность $P_{\text{э.н}} = 2,3$ Вт.

Чтобы обеспечить при данной индукции $B_{\delta} = 0,09$ Тл требуемую рабочую индукцию в роторе $B_{\text{мг}} = 1,25$ Тл, по [1, 10.27] необходимо иметь относительную толщину ротора $\beta = 1,071$ ($\beta \approx k_a$). При выбранном $k_a = 1,075$ внутренний диаметр ротора $d_3 = d_1 + 2\delta = 3,07$ и его относительная толщина $\beta = \frac{d_2}{d_3} = \frac{3,28}{3,07} = 1,068$.

При данной $\beta = 1,068$ по [1, 10.26] индукция в роторе составляет

$$B_p = \frac{B_{\delta}}{(\beta - 1) \cdot \sigma \cdot p} = \frac{0,09}{(1,068 - 1) \cdot 1,05 \cdot 1} = 1,29 \text{ Тл,}$$

и отличается от 1,25 Тл менее чем на 5%.

3.5.4 Определение характеристик ротора

Для того, чтобы в данных размерах при найденной индукции B_{δ} была бы обеспечена требуемая мощность, в материале активной части ротора должна быть создана определенная величина напряженности поля, амплитуду которой определим через [1, 10.29]

$$H_{\text{р.м}} = 3,2 \cdot 10^3 \frac{p \cdot \sigma \cdot P_{\text{э.л.}}}{d_1^2 l_1 (1 + \beta) \cdot f \cdot k_{\Delta k} \cdot k_{\Delta H} \cdot k_B \cdot B_{\delta}} =$$

$$= 3,2 \cdot 10^3 \frac{1 \cdot 1,05 \cdot 10,3}{3,05^2 \cdot 1,48 \cdot (1 + 1,068) \cdot 400 \cdot 0,73 \cdot 1,18 \cdot 0,62 \cdot 0,05} = 55,1 \text{ А/см}$$

где расчетная электромагнитная мощность при пуске $P_{\text{э.л}}$ определяется по [1, 7.5].

Требуемое сочетание нужных магнитных свойств сплава – Fe–Cr–Co напряженность 55,1 А/см и коэффициент выпуклости не менее 0,62 при индукции в 1,29 Тл – должны быть обеспечены выбором режима термообработки.

Размеры активной части ротора определены $d_2 = 3,28$ см и $d_3 = 3,07$ см, а её толщина $h_p = 0,105$ см.

Проверим предварительно по формуле [1, 10.32] величину развиваемой двигателем при пуске электромагнитной мощности

$$P_{\text{э}} = P_{\Gamma_0} \cdot f \cdot V_{2a} = 0,018 \cdot 400 \cdot 1,53 = 10,9 \text{ Вт},$$

где удельные потери на гистерезис при рабочей индукции в 1,29 Тл по выражению [1, 10.33]

$$P_{\Gamma_0} = 4 \cdot B_m H_m \cdot k_B k_{\Delta k} k_{\Delta H} \cdot 10^{-4} = 4 \cdot 1,4 \cdot 60 \cdot 0,62 \cdot 0,73 \cdot 1,18 \cdot 10^{-4} = 0,018 \text{ Дж/см}^3,$$

а из [1, 10.31] полезный объем активной части ротора

$$V_{2a} = \frac{\pi}{4} d_1^2 l_1 (\beta^2 - 1) = \frac{\pi}{4} 3,05^2 \cdot 1,48 \cdot (1,068^2 - 1) = 1,53 \text{ см}^3.$$

Полученное значение мощности не отличается от ранее найденной требуемой величины. Однако реально при пуске СГД может иметь несколько меньшую мощность из-за меньшей, чем при номинальном режиме, индукции, B_{δ} .

3.6 Расчет обмоточных данных и сопротивления обмотки статора

3.6.1 Число витков фазы обмотки статора

$$\varpi_{\phi 1} = \frac{k_E U}{4 k_B f \Phi_{\delta} k_{\omega 1}} = \frac{0,7 \cdot \frac{36}{\sqrt{3}}}{4 \cdot 1,11 \cdot 400 \cdot 4,19 \cdot 10^{-4} \cdot 0,934} = 208,$$

где k_B – коэффициент формы поля;

k_E – коэффициент ЭДС.

Поток в воздушном зазоре равен

$$\Phi_{\delta} = \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_1 \cdot B_{\delta} \cdot 10^{-4} = 0,636 \cdot 4,79 \cdot 1,48 \cdot 0,09 \cdot 10^{-4} = 4,19 \cdot 10^{-4} \text{ Вб},$$

где α_{δ} – расчетный коэффициент полюсного перекрытия.

3.6.2 Число проводников в пазу

$$u_{\text{п1}} = \frac{\varpi_{\phi 1} \cdot a_1}{p \cdot q_1} = \frac{208 \cdot 1}{1 \cdot 2} = 104$$

3.6.3 Сечение провода

$$S_{a1} = \frac{Q_{\text{п1}} \cdot k_{3.п.}}{u_{\text{п1}}} = \frac{0,233 \cdot 0,32}{104} = 7,15 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2.$$

В соответствии с найденным сечением подбираем ближайшее стандартное сечение и диаметры – голого и изолированного проводов из по

[1, табл. 8.4 и табл. 8.5]; Марка провода ПЭТВ с сечением $s_{a1} = 7,55 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$, $d_r = 0,031 \text{ см}$, $d_{из} = 0,036$.

3.6.4 Активное сопротивление фазы обмотки статора

$$r_1 = Q_{t1} \frac{2\varpi_{\phi1} \cdot l_{\omega1}}{s_{a1} \cdot a_1} = 2,06 \cdot 10^{-6} \frac{2 \cdot 208 \cdot 4,67}{7,55 \cdot 10^{-4}} = 5,32 \text{ Ом},$$

Удельное сопротивление материала обмотки Q_{t1} для медных проводников при рабочей температуре t_1 :

$$Q_{t1} = 1,75 \cdot 10^{-6} [1 + 0,004(t_1 - 15^\circ)] = 1,75 \cdot 10^{-6} [1 + 0,004(60^\circ - 15^\circ)] = 2,06 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

Средняя длина полувитка обмотки статора

$$l_{\omega1} = l_1 + l_{л1} = 1,48 + 3,18 = 4,67,$$

где средняя длина лобовой части витка $l_{л1}$ может быть приближенно определена как

$$l_{л1} = k_{л1} y \tau = 0,8 \cdot 0,833 \cdot 4,78 = 3,18,$$

а коэффициент $k_{л1}$ для внутреннего статора при $p = 1$ равен 0,8.

3.6.5 Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

Учитывает рассеяние в пазах и лобовых частях обмотки и так называемое дифференциальное рассеяние, обусловленное высшими гармониками

$$\begin{aligned} x_1 &= 15,8 \cdot 10^{-8} \cdot f \varpi_{\phi1}^2 \frac{l_1}{p \cdot q_1} \Sigma \lambda_1 = \\ &= 15,8 \cdot 10^{-8} \cdot 400 \cdot 208^2 \cdot \frac{1,48}{1 \cdot 2} \cdot (1,66 + 5,57 + 2,76) = 20,45 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

где суммарный коэффициент магнитной проводимости рассеяния

$$\Sigma \lambda_1 = \lambda_{л1} + \lambda_{л1} + \lambda_{л1}.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния $\lambda_{л1}$ определяется формой и размерами паза и типом обмотки. За счет укорочения двухслойной обмотки уменьшается общее потокоцепление и проводимость рассеяния паза. Это учитывается с помощью коэффициентов $k_{\lambda1}$ и $k_{\lambda2}$, определяемых в зависимости от шага обмотки y .

$$k_{\lambda1} = \frac{7 + 9y}{16} = \frac{7 + 9 \cdot 0,833}{16} = 0,906;$$

$$k_{\lambda2} = \frac{1 + 3y}{4} = \frac{1 + 3 \cdot 0,833}{4} = 0,875;$$

$$\lambda_{\mu 1} = \left[\frac{h_1}{3d_{n1}} \cdot k_{\lambda 1} + \left(0,785 - \frac{b_{u1}}{2d_{n1}} + \frac{h_2}{d_{n1}} + \frac{h_{u1}}{b_{u1}} \right) \cdot k_{\lambda 2} \right] =$$

$$= \left[\frac{0,45}{3 \cdot 0,45} \cdot 0,906 + \left(0,785 - \frac{0,08}{2 \cdot 0,45} + \frac{0,11}{0,45} + \frac{0,05}{0,08} \right) \cdot 0,875 \right] = 1,66.$$

Размеры h_1 и h_2 определяются из эскиза паза рис.5

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния может быть приближенно подсчитан по формуле [1, 8.40], рекомендуемой для корзиночной двухслойной обмотки:

$$\lambda_{\mu 1} = 0,57 \cdot \frac{\tau}{l_1} \cdot q_1 \frac{3y-1}{2} = 0,57 \cdot \frac{4,78}{1,48} \cdot 2 \frac{3 \cdot 0,833 - 1}{2} = 2,76.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния с некоторым приближением определяется как:

$$\lambda_{\mu 1} = \frac{t_{z1} \cdot k_{\omega 1}^2}{11,9 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} = \frac{0,798 \cdot 0,934^2}{11,9 \cdot 0,01 \cdot 1,06} = 5,57,$$

где коэффициент воздушного зазора k_{δ} находится по формуле [1, 8.53]:

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} = k_{\delta 1} \cdot 1 = \frac{5 + \frac{b_{u1}}{\delta}}{5 + \frac{b_{u1}}{\delta} \left(1 - \frac{b_{u1}}{t_{z1}}\right)} = \frac{5 + \frac{0,08}{0,01}}{5 + \frac{0,08}{0,01} \left(1 - \frac{0,08}{0,794}\right)} = 1,06.$$

3.7 Расчет магнитной цепи и параметров намагничивающего контура

Расчет магнитной цепи сводится к определению намагничивающей силы $F_{\delta \mu}$.

Н.с. магнитной цепи статора $F_{\mu 1}$ затрачивается на проведение потока через зубцы F_{z1} и спинку F_{a1} статора.

3.7.1 Индукции в зубцах и спинке статора соответственно равны

$$B_{z1} = B_{\delta} \frac{t_{z1}}{b_{z1} \cdot k_{cm1}} = 0,09 \frac{0,798}{0,2 \cdot 0,91} = 0,4 \text{ Тл};$$

$$B_{a1} = B_{\delta} \frac{d_1}{2p \cdot h_{a1} \cdot k_{cm1}} = 0,05 \frac{3,05}{2 \cdot 0,33 \cdot 0,91} = 0,47 \text{ Тл.}$$

Индукции определены верно, что следует из условия

$$B_{z1} \approx B_{a1} = B_1 = B_{\delta} / \left(\frac{B_{\delta}}{B_1} \right) = 0,09 / 0,228 = 0,4 \text{ Тл.}$$

3.7.2 Определяем напряженность поля на данном участке магнитопровода – H_{z1} и H_{a1} из кривых намагничивания [1, рис. 8.2].

$$H_{z1} = 0,98 \text{ А/см}; H_{a1} = 0,85 \text{ А/см}.$$

3.7.3 Средняя длина силовых линий в спинке статора

$$L_{a1} = \frac{\pi(d_0 + h_{a1})}{2p} = \frac{\pi(0,9 + 0,33)}{2} = 1,93 \text{ см}.$$

3.7.4 Падения н.с. в зубцах и спинке статора (на пару полюсов) соответственно равны

$$F_{z1} = 2h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,744 \cdot 0,85 = 1,26 \text{ А};$$

$$F_{a1} = \xi_l \cdot L_{a1} \cdot H_{a1} = 0,64 \cdot 1,93 \cdot 0,85 = 1,17 \text{ А},$$

где ξ_l - коэффициент учитывающий неравномерность распределения индукции в ярме, определяется по индукции B_{a1} из [1, рис. 8.6].

3.7.5 Приведенный воздушный зазор δ^* представляет собой эквивалентную величину зазора, падение н.с. в котором равно действительной полной затрате н.с. на проведение потока через всю машину

$$\delta^* = k_\delta \cdot \delta \cdot k_\mu = 1,06 \cdot 0,01 \cdot 1,15 = 0,012 \text{ см},$$

где для СГД k_μ учитывает лишь насыщение статора:

$$k_\mu = 1 + \frac{F_{z1} + F_{a1}}{1,6 \cdot \delta \cdot k_\delta \cdot B_\delta \cdot 10^4} = 1 + \frac{1,26 + 1,17}{1,6 \cdot 0,01 \cdot 1,06 \cdot 0,09 \cdot 10^4} = 1,15.$$

3.7.6 Полная н.с. затрачиваемая на проведение потока через магнитную цепь, равна:

$$F_{\delta\mu} = 1,6 \cdot \delta^* \cdot B_\delta \cdot 10^4 = 1,6 \cdot 0,012 \cdot 0,09 \cdot 10^4 = 18,3 \text{ А}.$$

3.7.7 Намагничивающий ток

$$I_{\delta\mu} = \frac{p \cdot F_{\delta\mu}}{0,9 \cdot m_1 k_{\omega 1} \varpi_{\phi 1}} = \frac{1 \cdot 18,3}{0,9 \cdot 3 \cdot 0,934 \cdot 208} = 0,035 \text{ А}.$$

3.7.8 Потери в стали

Потери в стали представляют собой сумму потерь в стали зубцов и ярма. Потери в стали статора

$$\Delta P_{cm1} = \pi^2 \cdot d_1^2 l_1 \cdot v_{cm} B_\delta^2 = 9,85 \cdot 3,05^2 \cdot 1,48 \cdot 0,157 \cdot 0,09^2 = 0,185 \text{ Вт},$$

$$\text{где } v_{cm} = \frac{k_{об} \cdot p_0 \cdot Q_{cm}}{k_{cm} \cdot Z_1} \left[\frac{h_{z1}}{b_{z1}} + \frac{Z_1}{4\pi \cdot p^2} \cdot \frac{(d_1 - 2h_{z1}) + d_0}{(d_1 - 2h_{z1}) - d_0} \right] =$$

$$= \frac{2,5 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3} \cdot 7,5}{0,91 \cdot 12} \left[\frac{0,744}{0,2} + \frac{12}{4\pi \cdot 1^2} \cdot \frac{(3,05 - 2 \cdot 0,744) + 0,9}{(3,05 - 2 \cdot 0,744) - 0,9} \right] = 0,157;$$

p_0 – удельные потери данной марки стали при рабочей частоте 400 Гц и толщине листа 0,2 мм из [1, табл. 8.6];

3.8 Расчет характеристик

3.8.1 Механическая характеристика

Расчет механической характеристики $M = f(n)$ СГД в асинхронном режиме ($n < n_c$) вызывает в общем случае большие затруднения из-за искажения ее, связанного с влиянием высших гармонических.

Пусковой момент определяется по мощности, найденной из [1, 10.32]:

$$M_{II} = 955 \frac{P_{\Sigma}}{n_c} \eta_{2II} = 955 \frac{10,9}{24000} 0,9 = 0,39 \text{ Н}\cdot\text{см}.$$

Максимальный синхронный момент может быть определен как

$$M_{с.м} = \frac{M_{II}}{c_M} = \frac{0,39}{1,15} = 0,34 \text{ Н}\cdot\text{см}.$$

Коэффициент формы механической характеристики $c_M = 1,15$ является показателем совершенства характеристики.

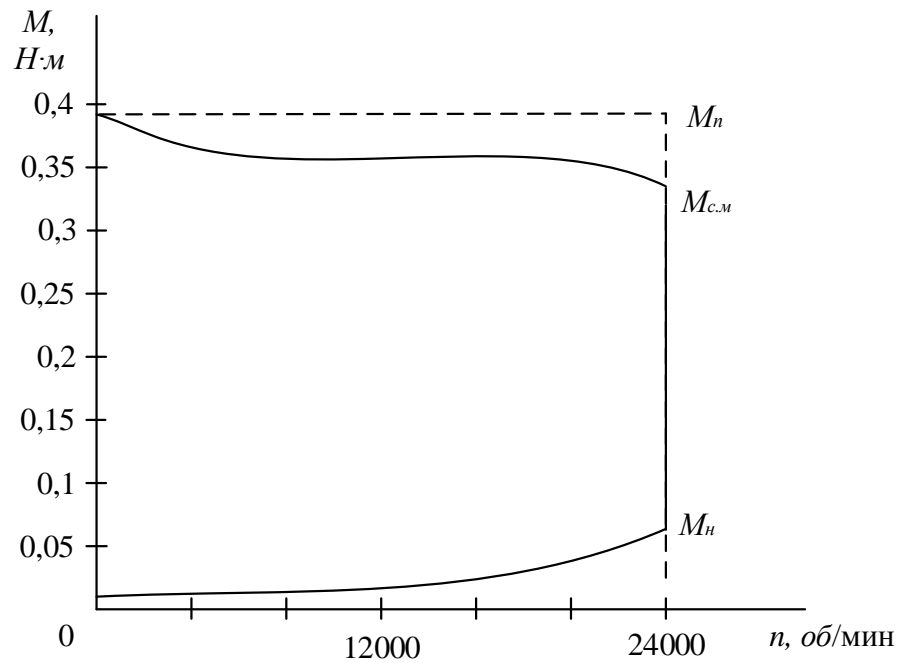


Рисунок 4 – Механическая характеристика СГД

Его значение попадает в интервал 1,1 – 1,5, поэтому влияние высших гармоник относительно не велико. Так как обмотка имеет число пазов на полюс и фазу $q_1 = 2$, и выполнена с укороченным шагом $y = 0,833$, то влияние пространственных гармоник на характер кривой не значительный, что наблюдаем из рисунка 3.

3.8.2 Время разбега

Время разбега – время достижения гиродвигателем установившейся скорости – одна из важнейших его характеристик.

Выражение для вычисления времени разбега по формуле [1, 5.20]:

$$t_p = 10^{-5} \frac{2,2 \cdot H}{M_{II} + M_{с.м.} - M_H} = 10^{-5} \frac{2,2 \cdot 2,74 \cdot 10^5}{0,39 + 0,34 - 0,08} = 9,4 \text{ сек,}$$

где номинальный момент определяется из [1, 10.37]

Значение t_p по [1, 5.20] при $k_M = 1,5$ отличается от опытных данных не более чем на ± 10 .

3.8.3 Рабочие характеристики

Расчет рабочих характеристик СГД практически сводится к определению основных его показателей – тока I_1 , потребляемой мощности P_1 , к.п.д. η и коэффициента мощности $\cos \varphi$ – в пусковой и рабочих точках.

Номинальный ток

$$I_{1H} = \sqrt{(I_{\delta\mu} + I_{2\mu})^2 + (I_{a0} + I_{2a})^2} = \\ = \sqrt{(0,035 + 0,325)^2 + (0,004 + 0,189)^2} = 0,408 \text{ А.}$$

Пусковой ток

$$I_{1П} = \sqrt{(I_{\delta\mu} + I_{2\mu})^2 + (I_{a0} + I_{2a})^2} = \\ = \sqrt{(0,035 + 0,35)^2 + (0,004 + 0,23)^2} = 0,45 \text{ А.}$$

Кратность пускового тока

$$k_I = \frac{I_{1П}}{I_{1H}} = \frac{0,451}{0,408} = 1,105$$

Составляющие тока, затрачиваемого на проведение потока через воздушный зазор и статор по [1, 10.37 – 10.38].

- намагничивающая

$$I_{\delta\mu} = 1,78 \cdot 10^4 \frac{p \cdot \delta \cdot B_\delta}{m_1 \cdot k_{\omega 1} \cdot \varpi_{\phi 1}} = 1,78 \cdot 10^4 \frac{1 \cdot 0,012 \cdot 0,09}{3 \cdot 0,934 \cdot 208} = 0,035 \text{ А,}$$

- активная

$$I_{a0} = \frac{\Delta P_{cm1}}{m_1 k_E U} = \frac{0,185 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot 0,7 \cdot 36} = 0,004 \text{ А.}$$

где потери в стали ΔP_{cm1} определяются из [1, 10.10].

Составляющие тока статора, затрачиваемого на проведение потока через ротор по [1, 10.39 – 10.40].

В номинальном режиме:

- активная

$$I_{2aH} = 0,55 \frac{d_1(1+\beta)}{m_1 k_{\omega 1} \varpi_{\phi 1}} k_{\Delta H} \left(\frac{H_1}{H_m} \right) \cdot H_m \sin \gamma_{1H} =$$

$$= 0,55 \frac{3,05 \cdot (1+1,068)}{3 \cdot 0,934 \cdot 208} 1,18 \cdot 0,9 \cdot 60 \cdot 0,5 = 0,189 \text{ А};$$

- намагничивающая

$$I_{2\mu H} = 0,55 \frac{d_1(1+\beta)}{m_1 k_{\omega 1} \varpi_{\phi 1}} k_{\Delta H} \left(\frac{H_1}{H_m} \right) \cdot H_m \cos \gamma_{1H} =$$

$$= 0,55 \frac{3,05 \cdot (1+1,068)}{3 \cdot 0,934 \cdot 208} 1,18 \cdot 0,9 \cdot 60 \cdot 0,86 = 0,325 \text{ А}.$$

При пуске:

$$I_{2a\Pi} = 0,55 \frac{d_1(1+\beta)}{m_1 k_{\omega 1} \varpi_{\phi 1}} k_{\Delta H} \left(\frac{H_1}{H_m} \right) \cdot H_m \sin \gamma_{1\Pi} =$$

$$= 0,55 \frac{3,05 \cdot (1+1,068)}{3 \cdot 0,934 \cdot 208} 1,18 \cdot 1 \cdot 60 \cdot 0,55 = 0,231 \text{ А};$$

- намагничивающая

$$I_{2\mu\Pi} = 0,55 \frac{d_1(1+\beta)}{m_1 k_{\omega 1} \varpi_{\phi 1}} k_{\Delta H} \left(\frac{H_1}{H_m} \right) \cdot H_m \cos \gamma_{1\Pi} =$$

$$= 0,55 \frac{3,05 \cdot (1+1,068)}{3 \cdot 0,934 \cdot 208} 1,18 \cdot 1 \cdot 60 \cdot 0,835 = 0,35 \text{ А}.$$

Потребляемая мощность:

при пуске

$$P_{1\Pi} = P_{\Sigma} + \Delta P_{M1\Pi} + \Delta P_{cm1} = 10,9 + 3,25 + 0,185 = 14,4 \text{ Вт},$$

в номинальном режиме

$$P_{1H} = P_{\Sigma H} + \Delta P_{M1H} + \Delta P_{cm1} = 2,3 + 2,66 + 0,185 = 5,74 \text{ Вт}.$$

где потери в меди статора находятся по формуле [1, 10.44]:

$$\Delta P_{M1H} = m_1 I_{1H}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 0,4^2 \cdot 5,33 = 2,66 \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{M1\Pi} = m_1 I_{1\Pi}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 0,45^2 \cdot 5,33 = 3,25 \text{ Вт}.$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_H = \frac{P_{1H}}{m_1 U \cdot I_{1H}} = \frac{5,74 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot 36 \cdot 0,4} = 0,23 \text{ о.е.}$$

$$\cos \varphi_{\Pi} = \frac{P_{1\Pi}}{m_1 U \cdot I_{1\Pi}} = \frac{14,4 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot 36 \cdot 0,45} = 0,51 \text{ о.е.}$$

Коэффициент полезного действия в номинальном режиме:

$$\eta_H = \frac{P_{2H}}{P_{1H}} = \frac{2}{5,74} = 0,35 \text{ о.е.},$$

где номинальная полезная мощность определяется из выражения [1, 10.43]

$$P_{2H} = 1,045 \cdot 10^{-3} \cdot M_H \cdot n_C = 1,045 \cdot 10^{-3} \cdot 0,079 \cdot 24000 = 2 \text{ Вт.}$$

Так как, ротор СГД намагничивается обмоткой статора. Поэтому СГД является недовозбужденным синхронным двигателем, что и определяет особенности его характеристик. Прежде всего из-за большого намагничивающего тока, потребляемого из сети, коэффициент мощности очень низкий $\cos \varphi = 0,2 \div 0,5$ (см. рис. 5). Вследствие низкого $\cos \varphi$, двигатель потребляет большой ток, имеет большие потери в меди и следовательно невысокий к.п.д. Ток статора в синхронном режиме слабо зависит от нагрузки, так как преобладающей в токе является намагничивающая составляющая, которая почти постоянна. Кратность пускового тока невелика и составляет $k_I = 1,105$. Малая кратность тока является отличительной особенностью СГД, позволяющая с меньшим запасом выбирать мощность источника питания.

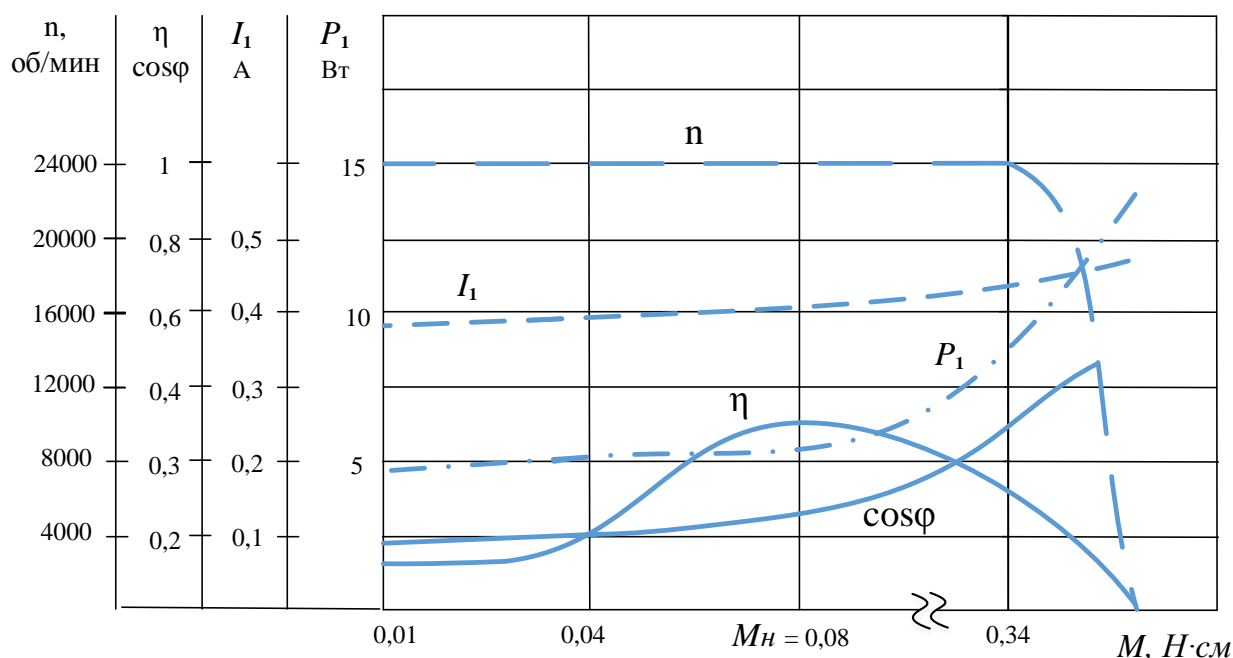


Рисунок 5 – Рабочие характеристики СГД

Малое изменение тока и индукции в зазоре при изменении нагрузки в синхронном режиме приводит к тому, что почти неизменны потери в меди и стали статора, а также потери от высших гармоник. Поэтому с уменьшением нагрузки в синхронном режиме к.п.д. двигателя резко уменьшается.

Заключение

В данной работе был спроектирован СГД для бортовой системы летательного аппарата.. Спроектированный двигатель удовлетворяет основным требованиям технического задания, а именно: синхронная скорость вращения $n_c = 24000$ об/мин, число полюсов $2p = 2$, напряжение питания $U_{л} = 36$ В, полезная мощность $P_{2H} = 2$ Вт. На основании полезной мощности был рассчитан необходимый номинальный момент развиваемый маховой частью гиродвигателя, и соответственно подобраны требуемые размеры вращающейся и неподвижной частей.

Геометрические размеры подобраны так, чтобы получить максимальное значение к.п.д. η . К ним относится отношение внутреннего диаметра маховика к наружному $d/D = 0,8$, и отношение длины статора к внутреннему диаметру маховика $L_1/d = 0,85$. Таким образом, увеличение объема статора привело к снижению электромагнитных потерь и увеличению η . При принятых основных величинах $d = 3,28$ см, $d_1 = 3,05$ см, $L_1 = 2,75$ см, гиродвигатель имеет $\eta = 0,35$.

А также выполнено условие оптимального проектирования $k_d \approx \beta$. Равенство независимой величины $k_d = 1,075$, выбранной в начале расчета, и относительной толщины ротора $\beta = 1,071$, которая однозначно связывает индукцию в воздушном зазоре B_δ и в роторе B_p .

Отличительной особенностью гиродвигателя является применение в качестве материала активной части ротора Fe – Cr – Co. Это привело к изменению таких параметров как: удельные потери на гистерезис, электромагнитная мощность при пуске, пусковой момент, время разбега.

В зависимости от выбора рабочей петли гистерезиса сплава Fe – Cr – Co, удельные потери на гистерезис возрастают от 3 до 10 раз. Во столько же раз увеличивается пусковая мощность и соответственно пусковой момент. При этом время разбега снижается.

Помимо этого проектируемый СГД рассчитан на работу в газовой среде гелий, это предоставляет ряд преимуществ. Во-первых, снижение аэродинамического момента сопротивления M_A (потери на трение маховика об окружающую среду) более чем в 2 раза, который во многом определяет потребляемую мощность, ток и нагрев гироузла. Во-вторых, возрастает теплоотдача в 1,5 раза и снижается перегрев обмотки статора внутри гироузла.