

**К ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ПОЛЮСНОЙ СИСТЕМЫ
МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА
С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ КОМБИНИРОВАННЫМ
ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

Ю. Н. КРОНЕБЕРГ

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры электрооборудования АЭМФ)

Существующие методы расчета рассматриваемых машин (рис. 1) позволяют по заданным размерам надежно рассчитать выходные характеристики [1, 2, 3]. Выбору оптимальных размеров внимания практически не уделялось. Эта задача значительно сложнее и в общей постановке не решена даже для более простых машин электромагнитного

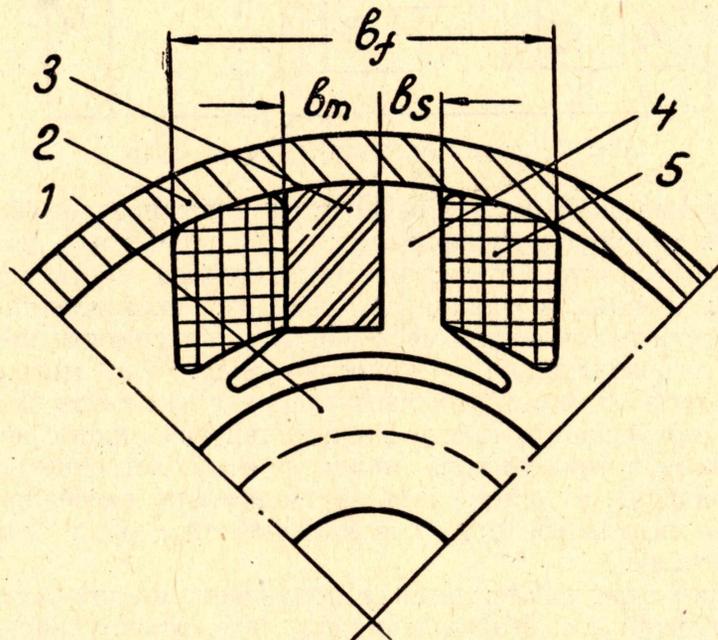


Рис. 1. Магнитная система. 1 —якорь, 2 —ядро, 3 — магнит, 4 — сердечник полюса, 5 — катушка обмотки возбуждения

возбуждения. Их проектирование базируется на обобщении накопленного опыта, который во многом распространяется и на машины комбинированного возбуждения, позволяя, в частности, удовлетворительно выбрать геометрию воздушного зазора, а также все размеры ядра и якоря. Основные затруднения связаны с выбором размеров

(материалы обычно predeterminedены) наиболее специфичного узла — полюсной системы. Критерием ее оптимальности, как правило, служит минимум номинальной мощности возбуждения

$$P_{\text{вн}} = \frac{F_{\text{вн}}^2}{\omega^2} R_t, \quad (1)$$

где

$F_{\text{вн}}$ — номинальная н. с. возбуждения катушки, а;
 R_t — сопротивление обмотки при рабочей температуре, ом;
 ω — число витков в катушке.

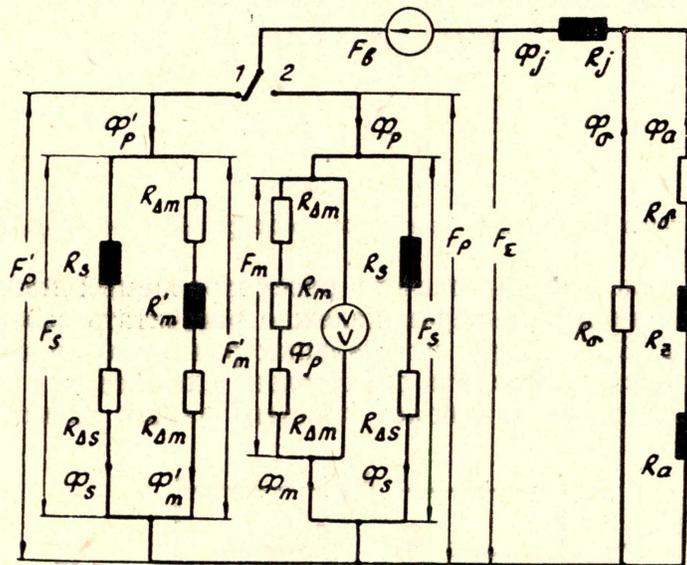


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи.

Одновременно должно обеспечиваться надежное самовозбуждение и достаточная глубина регулирования, т. е. начальная э. д. с. (обмотка возбуждения обесточена) холостого хода должна иметь определенное значение или лежать в заданных пределах. Поставленные условия позволяют свести поиск оптимума к анализу зависимости потока полюса Φ_p от н. с. возбуждения на холостом ходу. Для этого, пользуясь методами расчета электромагнитных машин, нужно найти номинальную э. д. с. якоря (погрешность такого расчета связана лишь с несущественным завышением потока реакции якоря, преимущественно его продольной составляющей), а далее, зная проводимость рассеяния полюсов, определить номинальный $\Phi_{pн}$ и начальный Φ_{p0} (или диапазон его изменения) потока.

Следующий этап заключается в получении аналитической зависимости номинальной н. с. возбуждения $F_{\text{вн}}$, что существенно осложняется нелинейностью схемы (рис. 2) замещения магнитной цепи (нелинейные сопротивления затемнены), положенной в основу проверенных расчетных методик [1, 2, 3].

Имеющихся данных достаточно, чтобы рассчитать и построить (рис. 3) только внешнюю по отношению к полюсу вебер-амперную характеристику $\Phi_j (F_{\Sigma})$, задавшись для этого рядом значений потока якоря Φ_a , нужно рассчитать соответствующие падения н. с. на магнитных сопротивлениях воздушного зазора R_{δ} , зубцов R_z и спинки якоря R_a , далее, зная магнитное сопротивление рассеяния R_s , вычислить потоки рассеяния Φ_s и, складывая их с потоками Φ_a , получить потоки

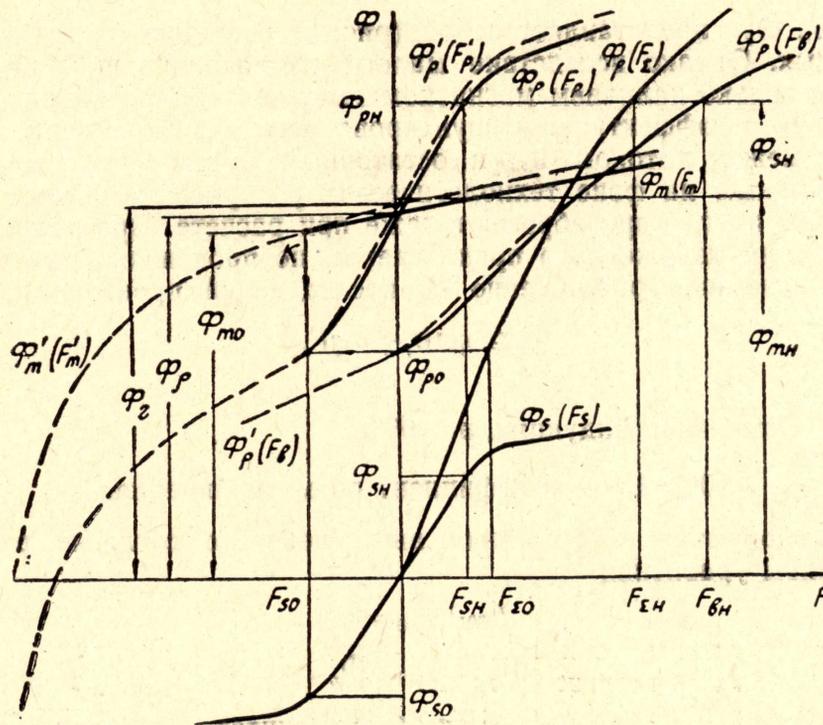


Рис. 3. Диаграмма магнита

ярма Φ и падения н. с. на магнитном сопротивлении ярма R_j ; сумма падений н. с. в воздушном зазоре, зубцах, спинке и ярме будет равна н. с. F_Σ . Допустим, что сечения магнита m и сердечника s известны (речь, по существу, идет только об их ширине b_m и b_s , т. к. длина l_p predeterminedена размерами якоря). Тогда, зная расчетную высоту магнита h_m и сердечника h_s , можно построить (рис. 3) характеристики ветвей нестабилизированного магнита (переключатель на рис. 2 в положении 1) $\Phi'_m(F'_m)$ и сердечника $\Phi_s(F_s)$. Сумма этих потоков при $F_s = F'_m = F'_p$ дает характеристику полюса $\Phi_p(F'_p)$, а сложение н. с. F'_p и F_Σ при $\Phi_p = \Phi_j$ — зависимость потока полюса с нестабилизированным магнитом от н. с. обмотки возбуждения $\Phi'_p(F'_p)$.

Стабилизация магнитов (переключатель на рис. 2 переводится в положение 2) рассматриваемых машин обычно происходит [1] на холостом ходу при отключенной обмотке возбуждения (если, разумеется, невозможно ее встречное включение). Точка отхода рабочей вебер-амперной характеристики — прямой $\Phi_m(F_m)$, которая затем используется вместо кривой $\Phi'_m(F'_m)$ для построения искомой зависимости $\Phi_p(F'_p)$, — находится графически (рис. 3) по потоку Φ_{p0} . Уравнение этой прямой имеет вид

$$\Phi_m = \Phi_p + m\gamma E_m, \quad (2)$$

где

Φ_p — остаточный поток стабилизированного магнита, вб,

$\gamma = \frac{\rho}{h_p + 1,6 \cdot 10^6 \Delta_m \rho}$ — удельная проводимость ветви магнита

(на единицу площади), вб/м² а,

ρ — коэффициент возврата сплава, гн/м,

Δ_m — стыковой зазор магнита, м.

Поток Φ_p представляет собой (рис. 3) сложную функцию многих переменных. Однако вследствие малого размагничивания, что объясняется не только наличием магнитномягких башмаков и малой продольной н.с., но и эффективным шунтированием магнитов сердечниками, различие между потоком Φ_p и остаточным потоком Φ_r становится незначительным на фоне технологических разбросов. Поэтому размагничиванием иногда пренебрегают даже при расчете характеристик [2]. На основании изложенного предлагается, не производя расчета режима стабилизации, приближенно (с последующей проверкой) принять

$$\Phi_m \cong \eta m B_r + m \gamma F_m, \quad (2a)$$

где

B_r — остаточная индукция, вб/м²,

$\eta = \frac{\Phi_p}{\Phi_r} = 0,9 \div 1,0$ — коэффициент размагничивания.

Когда обмотка возбуждения выключена, то согласно рис. 2 и 3 справедливы уравнения

$$F_{\Sigma 0} + F_{s0} = 0, \quad (3)$$

$$\Phi_{m0} + \Phi_{s0} = \Phi_{p0}, \quad (4)$$

в которых кроме потока Φ_{p0} (пока будем считать, что задано его фиксированное значение) известна н.с. $F_{\Sigma 0}$ (Φ_{p0}) и, следовательно, $F_{s0} = F_{m0} = -F_{\Sigma 0}$. Отсюда уже легко найти индукцию сердечника B_{s0} (она всегда отрицательна), т.к. зависимость B_s (F_s), когда расчетная высота сердечника h_s и стыковой зазор Δ_s заданы, известна (рис. 4). Тогда согласно уравнению (2a) имеем

$$\Phi_{m0} = \eta m B_r - m \gamma F_{\Sigma 0} = m B_{m0}, \quad (5)$$

где B_{m0} — индукция магнита при выключенной обмотке возбуждения. Учитывая, что $\Phi_{s0} = s B_{s0}$, из уравнений (4) и (5) получим важное выражение

$$s = \frac{\Phi_{p0} - m(\eta B_r - \gamma F_{\Sigma 0})}{B_{s0}}, \quad \text{м}^2, \quad (6)$$

из которого следует, что при постоянном начальном потоке Φ_{p0} сечения магнита и сердечника могут принимать множество значений, но должны оставаться пропорциональными. Задача оптимизации заключается в том, чтобы из этого множества выбрать такое сочетание, которое бы обеспечивало минимум номинальной мощности возбуждения. Существование экстремума очевидно: при малом сечении магнита мало сечение сердечника и, следовательно, велико падение н.с. и велика мощность возбуждения, с увеличением сечения магнита увеличивается суммарная ширина полюса и соответственно уменьшается сечение катушки, т.е. растет ее сопротивление, и мощность возбуждения также увеличивается.

Когда машина на холостом ходу развивает э.д.с., соответствующую номинальному режиму, то согласно рис. 2 и 3 справедливы уравнения:

$$F_{\Sigma H} + F_{sH} = F_{вн}, \quad (7)$$

$$\Phi_{mH} + \Phi_{sH} = \Phi_{pH}. \quad (8)$$

Подставляя в уравнение (8) поток Φ_{mH} , найденный из уравнения

(2а), при $F_m = F_{mн} = F_{сн}$ и учитывая, что $\Phi_{сн} = sB_{сн}$, получим зависимость

$$\eta m B_r + m \gamma F_{сн} + s B_{сн} = \Phi_{рн}, \quad (9)$$

в которой $B_{сн}$ представляет собой известную заданную графически (рис. 4) нелинейную функцию от н.с. $F_{сн}$. Чтобы с помощью уравнения (9) н.с. $F_{сн}$ представить аналитически, графическую зависимость необходимо аппроксимировать аналитически. Поскольку аппроксимирующее выражение должно удовлетворительно соответствовать реальной зависимости лишь при найденных впоследствии оптимальных размерах (т. е. в итоге нужна только одна точка кривой, а практически — некоторый предполагаемый диапазон), то целесообразно принять наиболее простую линейную аппроксимацию:

$$B_s = B_x + \kappa F_s, \quad (10)$$

где коэффициент κ имеет размерность удельной проводимости, $вб/м^2а$.

Наиболее вероятное положение рабочей точки на кривой рис. 4 — в районе «колена» (пока сердечник ненасыщен — его выгодно загружать для уменьшения ширины полюса и увеличения сечения обмотки возбуждения, однако переход за «колено», мало отражаясь на сечении обмотки, ведет к резкому увеличению н. с. возбуждения, исходя из чего и должны выбираться параметры B_x и κ).

Полагая в уравнении (10) $B_s = B_{сн}$ и $F_s = F_{сн}$ и решая его совместно с уравнением (9), найдем номинальное падение н. с. в сердечнике

$$F_{сн} = \frac{\Phi_{рн} - \eta m B_r - s B_x}{m \gamma + s \kappa}. \quad (11)$$

Подставив величину s из уравнения (6) в уравнение (11), а затем результат — в уравнение (7), получим искомое аналитическое выражение н. с. обмотки возбуждения в виде функции сечения магнита

$$F_{вн} = \frac{B_{s0}(\gamma B_r - \gamma F_{сн}) - (\gamma B_r - \gamma F_{с0})(B_x - \kappa F_{сн})}{\kappa(\gamma B_r - \gamma F_{с0}) - \gamma B_{s0}} \cdot \frac{A_1 - m}{A_2 - m}, \quad (12)$$

где

$$A_1 = \frac{\Phi_{рн} B_{s0} - \Phi_{р0}(B_x - \kappa F_{сн})}{B_{s0}(\gamma B_r - \gamma F_{сн}) - (\gamma B_r - \gamma F_{с0})(B_x - \kappa F_{сн})}, \quad M^2,$$

$$A_2 = \frac{\kappa \Phi_{р0}}{\kappa(\gamma B_r - \gamma F_{с0}) - \gamma B_{s0}}, \quad M^2.$$

Теперь остается выразить через сечение магнита активное сопротивление катушки возбуждения

$$R_t = 2p\omega\rho_t \frac{L}{g}, \quad ом, \quad (13)$$

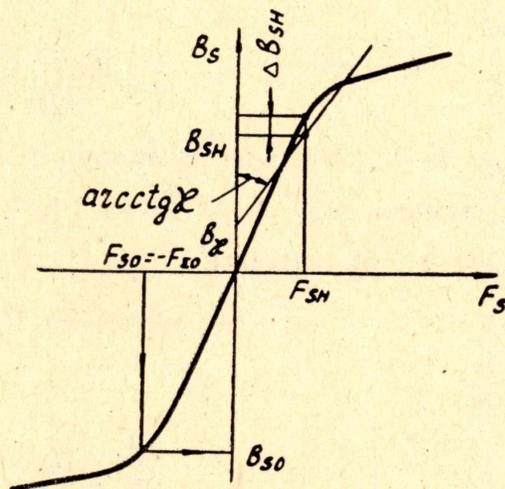


Рис. 4. Кривая намагничивания сердечника полюса

где

ρ_t — удельное электрическое сопротивление, $\text{ом мм}^2/\text{м}$,

p — число пар полюсов,

L — средняя длина витка, м ,

q — сечение проводника, мм^2 .

Считая, как обычно, катушку плоской, согласно рис. 1 имеем:

$$L = 2(l_p + b_m + b_s) + \frac{\pi}{2}(b_f - b_m - b_s), \quad (14)$$

$$q = \frac{[h_f k_3 \cdot 10^6]}{2\omega} (b_f - b_m - b_s), \quad (15)$$

где k_3 — отношение суммарного сечения меди к сечению катушки.

Учитывая, что $b_m = \frac{m}{l_p}$ и $b_s = \frac{s}{l_p}$, с помощью уравнений (6), (13), (14) и (15) получим:

$$R_t = 2p(4 - \pi) \cdot 10^{-6} \rho_t \frac{\omega^2}{h_f k_3} \cdot \frac{A_3 - m}{A_4 + m}, \quad (16)$$

где

$$A_3 = \frac{1}{4 - \pi} (4l_p + \pi b_f) l_p B_{s0} + \Phi_{p0}, \quad \text{м}^2,$$

$$\frac{\eta B_r - B_{s0} - \gamma F_{\Sigma 0}}{\eta B_r - B_{s0} - \gamma F_{\Sigma 0}},$$

$$A_4 = \frac{b_f l_p B_{s0} - \Phi_{p0}}{\eta B_r - B_{s0} - \gamma F_{\Sigma 0}}, \quad \text{м}^2.$$

Наконец, номинальная мощность возбуждения согласно уравнениям (1), (12) и (16)

$$P_{\text{вн}} = A \left(\frac{A_1 - m}{A_2 - m} \right)^2 \frac{A_3 - m}{A_4 - m}, \quad \text{вт}, \quad (17)$$

где

$$A = 2p(4 - \pi) \cdot 10^{-6} \frac{\rho_t}{h_f k_3} \cdot \frac{[B_{s0}(\eta B_r - \gamma F_{\Sigma \text{н}}) - (\eta B_r - \gamma F_{\Sigma 0})(B_x - x F_{\Sigma \text{н}})]^2}{[x(\eta B_r - \gamma F_{\Sigma 0}) - \gamma B_{s0}]^2}, \quad \text{вт}$$

Когда задано фиксированное значение $\Phi_{p0} = \text{const}$, то номинальная мощность возбуждения становится функцией лишь одной переменной — сечения магнита. Чтобы найти ее оптимальное значение в указанном выше смысле, нужно, как обычно, продифференцировать уравнение (17) и приравнять производную к нулю. В итоге получим квадратное уравнение, решение которого и дает оптимальную величину сечения магнита

$$m^* = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad \text{м}^2, \quad (18)$$

где

$$a = 2(A_1 - A_2) - (A_3 + A_4), \quad \text{м},$$

$$b = 3A_1 A_3 + 2A_2 A_4 - A_1 A_4 - A_2 A_3, \quad \text{м}^2,$$

$$c = 2(A_1 - A_2) A_3 A_4 - (A_3 + A_4) A_1 A_2, \quad \text{м}^3.$$

Оптимальное сечение сердечника s^* определяется по уравнению

(6) при $m = m^*$, а по уравнениям (14), (15) — средняя длина витка L^* и сечение проводника q^* (число витков предполагается известным).

В общем случае зависимость Φ_p ($F_{вн}$), рассчитанная с помощью существующих методик [1, 2, 3], при найденных выше размерах полюсной системы не пройдет через точки $(0, \Phi_{p0})$ и $(F_{вн}, \Phi_p)$, что вызвано несколько произвольным выбором рабочей прямой возврата магнита и возможной погрешностью аппроксимации кривой намагничивания сердечника полюса (неточность параметров η , B_x и χ). Величины отклонений нетрудно найти, произведя поверочный расчет. Если они не превышают $5 \div 15\%$, т. е. находятся на уровне обычных погрешностей расчета электрических машин, то дальнейшего уточнения не требуется. В противном случае нужно изменить параметры η , B_x и χ и произвести перерасчет.

Иногда вполне достаточной может оказаться относительно грубая оценка отклонений начального $\Delta\Phi_{p0}$ и номинального $\Delta\Phi_{pн}$ потоков, которую можно сделать и без проведения поверочного расчета. Для этого нужно построить кривую размагничивания магнита с сечением m^* и при н. с. $F_{с0}$ найти величину потока, который будет отличаться от потока Φ_{m0}^* , найденного по уравнению (5), на величину $\Delta\Phi_{m0}$. Легко показать, что знаки отклонений $\Delta\Phi_{m0}$ и $\Delta\Phi_{p0}$ совпадают и

$$|\Delta\Phi_{p0}| < |\Delta\Phi_{m0}|. \quad (19)$$

Можно также показать, что

$$|\Delta\Phi_{pн}| < |\Delta\Phi_{m0}| + |s^* \Delta B_{s0}|, \quad (20)$$

где $\Delta B_{сн}$ находится по кривой рис. 4 при н. с. $F_{сн}$, рассчитанной с помощью уравнения (11).

Значительно сложнее обстоит дело, когда начальный поток Φ_{p0} может выбираться в некотором диапазоне. В этом случае в уравнение (17), все коэффициенты которого теперь будут функциями начального потока Φ_{p0} , следовало бы подставить из уравнения (18) величину сечения магнита m^* , которое теперь также является функцией потока Φ_{p0} , и полученное выражение номинальной мощности возбуждения продифференцировать по аргументу Φ_{p0} , приравнять производную нулю и отсюда найти экстремальное значение начального потока Φ_{p0} . Однако получается столь громоздкое уравнение, что решение его становится явно нецелесообразным (к тому же неясно, лежит ли экстремальное значение в заданной области). Значительно проще задаться несколькими значениями потока Φ_{p0} , найти для них по уравнению (18) ряд сечений магнита, а по уравнению (17) подсчитать ряд номинальных мощностей возбуждения. Построив зависимости $P_{вн}(\Phi_{p0})$ и $m^*(\Phi_{p0})$, уже несложно найти оптимальные значения Φ_{p0} и m^* .

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Б. Панферов. Расчет магнитной цепи регулируемых машин постоянного тока с постоянными магнитами. «Вестник электропромышленности». № 12, 1961.
2. Л. М. Паластин. Графоаналитический метод определения характеристик холостого хода регулируемых машин постоянного тока с постоянными магнитами. «Электричество». № 11, 1963.
3. Ю. Н. Кронеберг. Аналитический расчет характеристик холостого хода машин постоянного тока с последовательным комбинированным возбуждением. Электронные и электромеханические устройства. «Энергия», 1969.