

НАИВЫГОДНЕЙШИЕ СООТНОШЕНИЯ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА КЛАПАННОГО ТИПА

А. В. КУРНОСОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей
электротехники)

Выбор конструкции электромагнита постоянного тока по конструктивному фактору [1] $K = \frac{\sqrt{F_n}}{\delta_n}$, где F_n — начальная сила трогания электромагнита, δ_n — начальный рабочий воздушный промежуток, не дает основания судить о степени рационального использования активных материалов и о приближении к наиболее выгодным соотношениям основных геометрических размеров электромагнита, так как изменения K находятся в широком диапазоне. Так, для электромагнита клапанного типа K изменяется в пределах (2,6—26) [2]. Отношения диаметра сердечника к внешнему диаметру катушки d/D для существующих конструкций электромагнитов клапанного типа в контакторах постоянного тока обычно находятся в пределах (0,32—0,45), но эти соотношения далеки от оптимальных [3].

В первом приближении в основу выбора соотношений между основными размерами можно принять отношение

$$\frac{A_y}{V_{ок} + V_{fe}} \quad (1)$$

и найти значения d/D и l_k/D (l_k — длина катушки, рис. 1), соответствующие максимуму выражения (1),

где $A_y = F_n \delta_n$ — условная работа [1, 2];

$V_{ок}$ — объем обмотки катушки;

V_{fe} — объем стали магнитопровода.

Определив максимум выражения (1), тем самым мы определим оптимальные геометрические соотношения, при которых электромагнит развивает наибольшее усилие при заданном рабочем воздушном промежутке.

При выводе основных соотношений принимаем следующие допущения:

а) считаем сечение стали Q_{fe} вдоль длины магнитопровода постоянным;

б) при непритянutom положении якоря электромагнита насыщением стали пренебрегаем;

в) при притянutom положении якоря вся м. д. с. обмотки расходуется на проведение магнитного потока вдоль длины l_{fe} магнитопровода;

г) после срабатывания электромагнит длительно находится под током и достигает установившейся температуры превышения τ над окружающей средой;

д) ток в обмотке во время движения якоря остается неизменным.

При принятых допущениях, ампервитки трогания $AW_{тр}$ в разомкнутом положении якоря определяются как

$$\frac{IW_{гор}}{1,65} = \frac{\Phi\delta}{G_{\mu\delta}} = \frac{B\delta\delta_n}{\sigma_B\mu_0}, \quad (2)$$

где

$$\frac{IW_{гор}}{1,65} = AW_{тр} [3],$$

$IW_{гор}$ — ампервитки, допустимые по нагреву;

$\Phi\delta$ — магнитный поток в рабочем воздушном промежутке;

$B\delta$ — индукция в рабочем воздушном промежутке;

μ_0 — магнитная проницаемость воздуха;

$\sigma_B = \frac{G_{\mu\delta}}{G_{\mu\tau}}$ — коэффициент, учитывающий выпучивание магнитных силовых

линий. В существующих конструкциях электромагнитов его значение принимается (1,2 — 1,5) [4];

$G_{\mu\tau}$ — проводимость магнитному потоку торцевой части рабочего воздушного промежутка.

Потери в обмотке любого электромагнита постоянного тока при установившемся режиме можно найти как

$$P = I^2 \rho \frac{l_{м.ср}}{q_m}, \quad (3)$$

где I — установившееся значение тока в катушке;

W — число витков катушки;

ρ — удельное сопротивление меди обмотки при установившейся температуре нагрева обмотки;

$l_{м.ср}$ — средняя длина витка обмотки;

q_m — сечение меди провода.

Выражение (3) можно написать так:

$$P = \frac{(IW_{гор})^2 l_{м.ср}}{K_3 Q_0}, \quad (4)$$

где K_3 — коэффициент заполнения обмотки;

Q_0 — сечение обмоточного окна.

С другой стороны, потери в обмотке при установившемся превышении температуры τ обмотки над окружающей средой могут быть выражены как

$$P = K_{то} S_0 \tau, \quad (5)$$

где $K_{то}$ — коэффициент теплоотдачи с обдуваемой поверхности;

S_0 — наружная поверхность электромагнита, омываемая воздухом.

Из выражения (2) найдем δ_n как

$$\delta_n = IW_{гор} \frac{\sigma_B \mu_0}{1,65 B\delta}. \quad (6)$$

Приравняв (4) и (5), находим выражение для $IW_{гор}$ как

$$IW_{гор} = \sqrt{\frac{K_{то} S_0 \tau K_3 Q_0}{\rho l_{м.ср}}}. \quad (7)$$

Значение для $lW_{\text{гор}}$ подставляем в (6), найденное значение для δ_n подставляем в выражение для A_y , значение F_n находим в первом приближении по формуле Максвелла, тогда A_y найдем как

$$A_y = \frac{B\delta Q_{fe}}{2 \cdot 1,65\sigma_B} \sqrt{\frac{K_{\text{то}} K_3 \tau S_0 Q_0}{\rho l_{\text{м. ср}}}} = K Q_{fe} \sqrt{\frac{S_0 Q_0}{l_{\text{м. ср}}}}, \quad (8)$$

где

$$K = \frac{B\delta}{2 \cdot 1,65\sigma_B} \sqrt{\frac{K_{\text{то}} K_3 \tau}{\rho}}.$$

Выражение (8) можно представить как

$$\frac{A_y}{K} = Q_{fe} \sqrt{\frac{S_0 Q_0}{l_{\text{м. ср}}}}. \quad (8, a)$$

Выражение (8, a) дает зависимость условной работы от геометрических параметров электромагнита.

Для оценки электромагнитов по предельной нагрузке активных материалов рассмотрим отношение условной работы к сумме объемов активных материалов. Для этого левую и правую части выражения (8, a) поделим на сумму объемов активных материалов

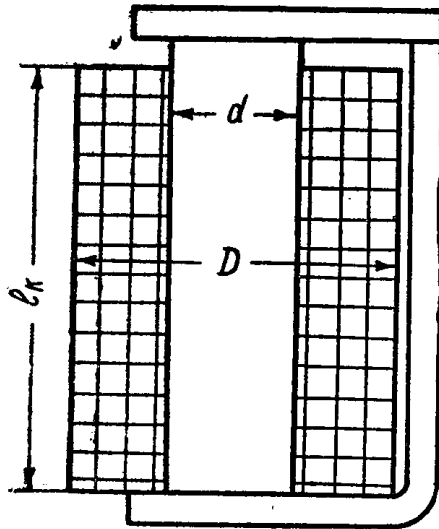


Рис. 1. Эскиз электромагнита.

$$\frac{A_y}{K(V_{fe} + V_{ок})} = \frac{Q_{fe} \sqrt{\frac{S_0 Q_0}{l_{\text{м. ср}}}}}{V_{fe} + V_{ок}}. \quad (9)$$

Выражение (9) пригодно для анализа любого типа тягового электромагнита. Применим (9) для анализа электромагнита клапанного типа (рис. 1).

В выражении (9) S_0 можно представить как $S_0 = S_n + \alpha S_B$, где S_n — наружная поверхность катушки, S_B — внутренняя поверхность катушки. Торцевой поверхностью охлаждения катушки пренебрегаем. На основании исследований катушек электромагнитов М. Г. Кобленц [3] предложил

эмпирическую формулу для определения допустимых потерь в катушках постоянного тока

$$P = K_{\text{то}} (S_n + \alpha S_B), \quad (10)$$

где α — эмпирический коэффициент, зависящий от рода изготовления катушек, и изменяется в пределах (0,9—2,4). Выразив в правой части выражения (9) все геометрические параметры электромагнита через его основные размеры (d , D , l_k) и отнеся их к какому-нибудь одному размеру (в нашем случае D), получим

$$\frac{A_y}{K(V_{fe} + V_{ок})\sqrt{D}} = \frac{X^2 Y \sqrt{\frac{(1-X)(1+\alpha X)}{1+X}}}{2,36X^4 + X^2(1+Y) + Y}, \quad (11)$$

где $X = d/D$; $Y = l_k/D$ (приложение 1).

Правую часть выражения (11) обозначим через Γ и назовем его геометрическим фактором. При намотке катушки на металлическую гильзу, α получается равным 1,7 [4]. Подставив $\alpha = 1,7$ в (11) и задаваясь разными значениями X и Y , получим кривые зависимости $\Gamma = f(X, Y)$ (рис. 2). Максимум значения геометрического фактора

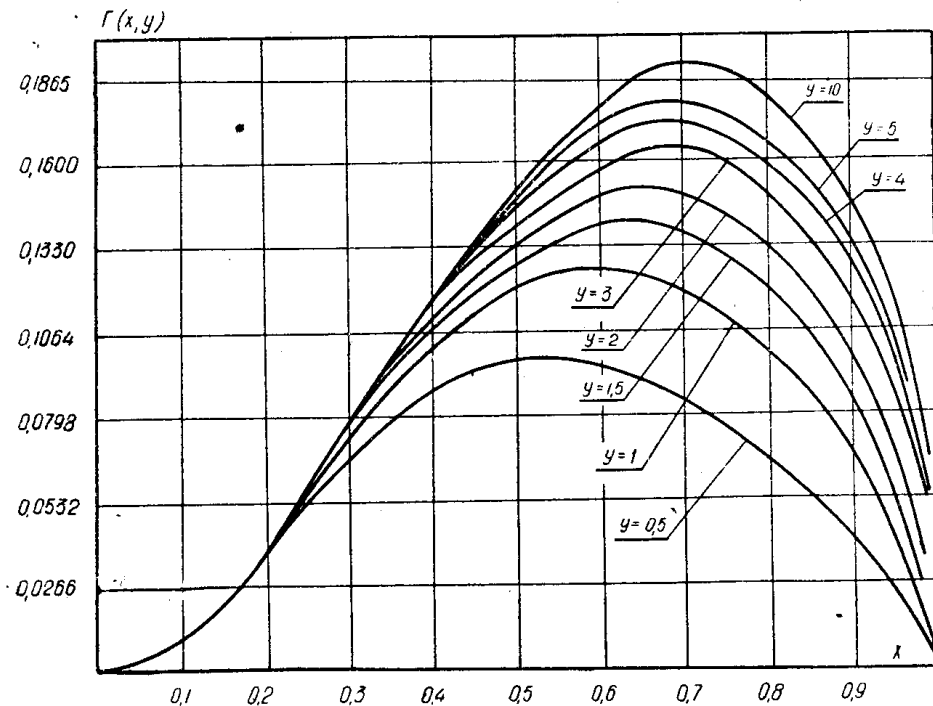


Рис. 2. Кривые зависимости $\Gamma = f(X, Y)$ при $\alpha = 1,7$.

Γ_{\max} находится в пределах (0,55 — 0,7) изменения X . На рис. 3 даны кривые зависимости $\Gamma_{\max} = f(X_{\text{опт}})$ при различных значениях α . Явно выраженного максимума относительно Y нет, однако, как видно из рис. 2, рост $\Gamma(X, Y)$ при $Y > 3$ резко замедляется. Значение Y можно рекомендовать в пределах (1 — 3). На рис. 4 представлены кривые зависимости $X_{\text{опт}} = f(Y)$.

Для того, чтобы подойти к непосредственному проектированию электромагнита, необходимо найти один из геометрических размеров его. Задавшись $X_{\text{опт}}$ по кривым рис. 3, найдем Γ_{\max} , по кривым рис. 4 находим значение Y . Сумму объемов активных материалов в знаменателе выражения (11) необходимо выразить через X и Y .

$$V_{fe} + V_{ок} = \frac{\pi d^2}{4} l_{fe} + \frac{\pi l_k}{4} (D^2 - d^2),$$

$$l_{fe} = 2l_k + D + \frac{3\pi d^2}{4D},$$

$$\frac{3\pi d^2}{4D} = 3\Delta,$$

где Δ — толщина ярма (приложение 1).

$$V_{fe} + V_{ок} = aD^3, \text{ где } a = \pi/4 [X^2 (3\pi/4X^2 + Y + 1) + Y].$$

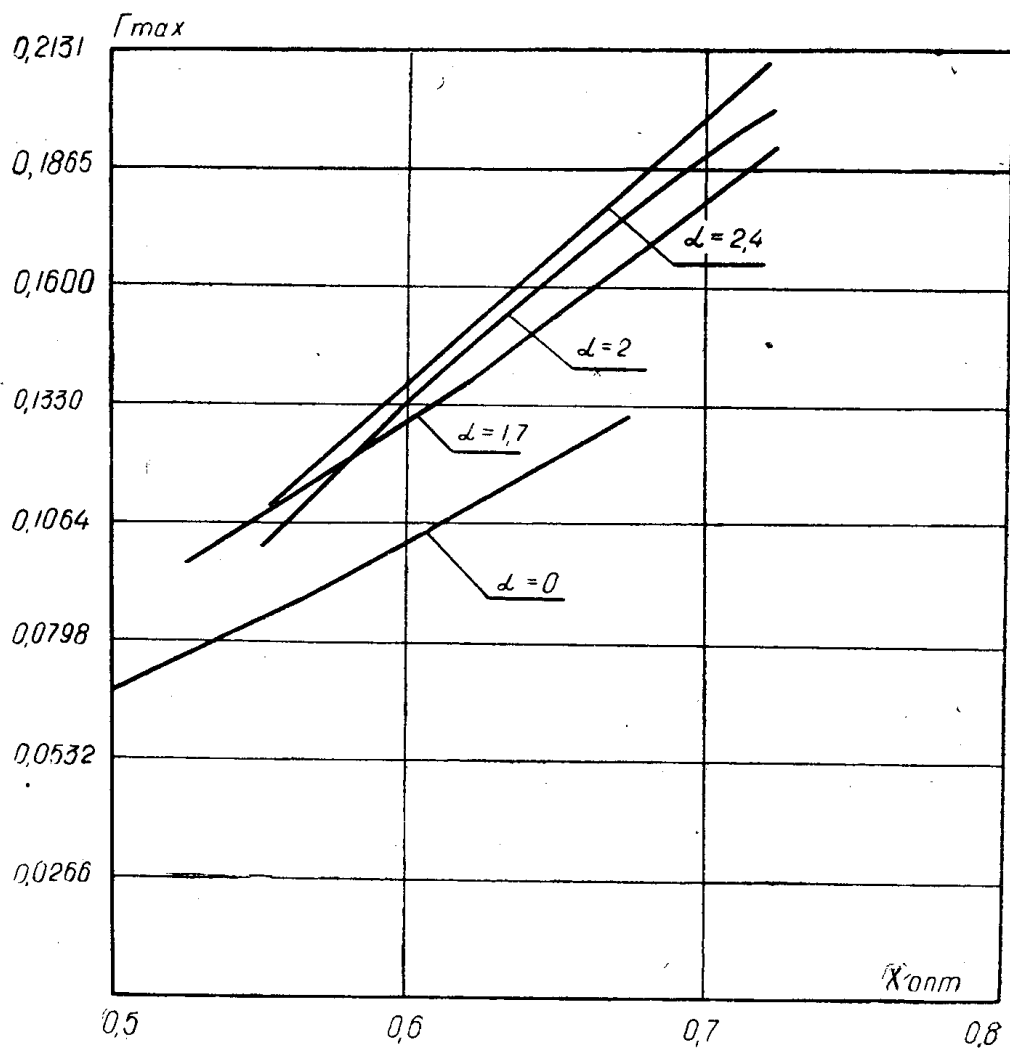


Рис. 3. Кривые зависимости $\Gamma = f(X_{opt})$ при различных значениях α .

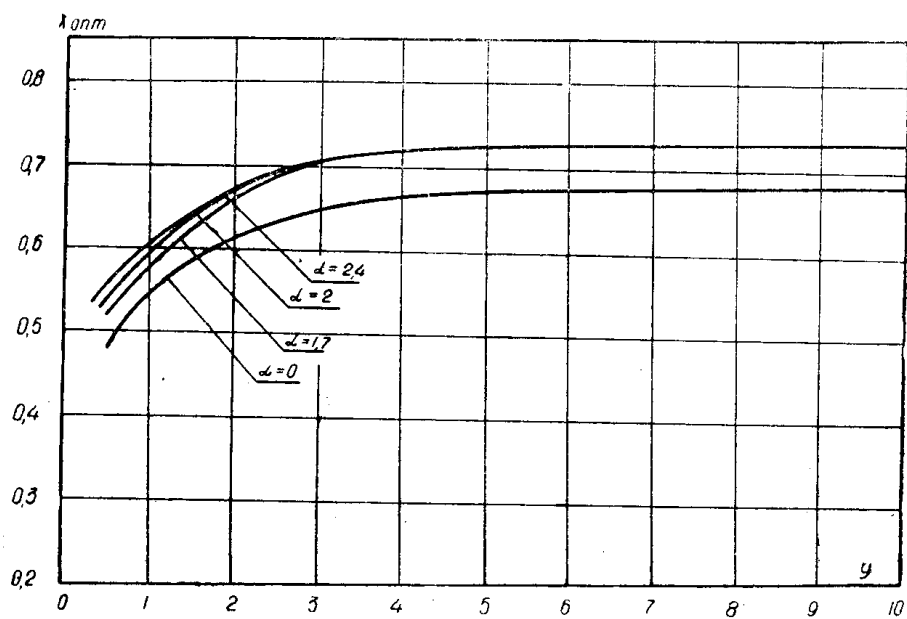


Рис. 4. Кривые зависимости $X_{opt} = f(Y)$ при различных значениях α .

Подставив в (11) значение $(V_{fe} + V_{ок})$, найдем выражение для D как

$$D = \sqrt[7]{\frac{A_y^2}{\Gamma^2 a^2 K^2}}. \quad (12)$$

Для проверки полученных выше выводов и расчетных значений были исследованы два макета электромагнитов. Оба макета рассчитывались на одну и ту же начальную силу 1 кг. Первый макет был выполнен согласно вышеизложенным расчетам. Для второго макета соотношения между основными размерами приняты такими же, как в существующем контакторе КП 21/33. Магнитная цепь обоих макетов выполнена из стали АРМКО. Для сопоставления был испытан контактор КП21/33. Данные расчета и опыта сведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные и опытные параметры электромагнитов	Макет № 1	Макет № 2	КП 21/33
d/D	0,59	0,39	0,39
e_k/D	1,36	1,18	1,18
D , мм	47	55	55
d , мм	28	21,4	21,4
l_k , мм	64	65	65
W	4000	7000	11000
$\delta_{нп}$, мм	6	6	6
опытные данные			
$AW_{тр}$, ав	907	1270	1180
$AW_{гор}$, ав	1500	2090	1950
F_n , кг	1,14	1,0	—
$F_{нп}$, кг	1,35	1,3	1,1
τ , °C	67	56,5	58,5

F_n — начальная сила тяги электромагнита при отсутствии полюсного наконечника;

$F_{нп}$ — начальная сила тяги электромагнита при наличии полюсного наконечника; для всех трех электромагнитов диаметр полюсного наконечника равен 35 мм.

Расход меди для первого макета по сравнению с КП 21/33 составил 70%; расход меди для второго макета по сравнению с КП 21/33 составил 110%; расход стали для первого макета по сравнению с КП 21/33 составил 115%; расход стали для второго макета такой же, как и для КП 21/33.

Результаты испытаний подтвердили правильность теоретических выводов. Сравнительные тяговые характеристики электромагнитов представлены на рис. 5.

Выводы

1. На основании вышеприведенных соображений и построения кривых $\Gamma = f(d/D, l_k/D)$, оптимальные геометрические соотношения в электромагнитах клапанного типа следует принимать $d/D = (0,55—0,7)$, $l_k/D = (1—3)$.

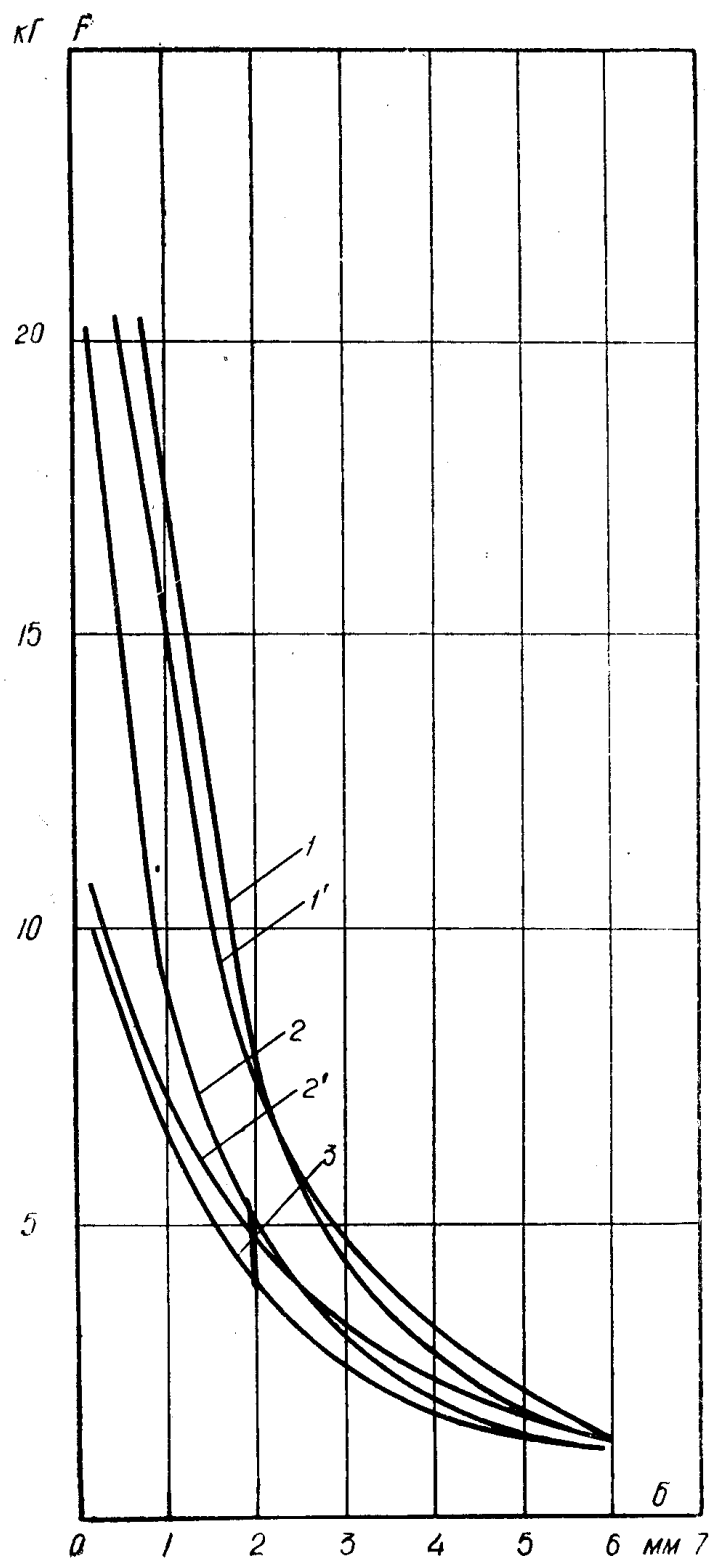


Рис. 5. Кривые зависимости тяговых усилий электромагнитов: 1 — $F = f(\delta)$ при $d = 28$ мм; 1' — при $d_{\Pi} = 35$ мм; 2 — $F = f(\delta)$ при $d = 21,4$ мм, 2' — при $d_{\Pi} = 35$ мм. 3 — $F = f(\delta)$ при $d_{\Pi} = 35$ мм.

2. Выполнение этих соотношений позволит значительно сэкономить дефицитную обмоточную медь и увеличить загрузку активных материалов.

Приложение 1

$$\frac{A_y}{K(V_{fe} + V_{ок})\sqrt{D}} = \frac{Q_{fe} \sqrt{\frac{S_o Q_o}{l_{м. ср}}}}{(V_{fe} + V_{ок})} \quad (9)$$

Принимаем ширину ярма электромагнита равной D (рис. 1).

$$Q_{fe} = \pi d^2/4, \quad Q_o = l_k/2(D - d), \quad l_{м. ср} = \pi/2(D + d),$$

$$V_{fe} = Q_{fe} l_{fe} = \pi d^2/4(2l_k + D + 3\Delta), \quad \text{где } \Delta = \pi d^2/4D,$$

$$V_{ок} = Q_o l_{м. ср} = \pi/4 l_k (D^2 - d^2),$$

$$S_o = S_n + \alpha S_b = \pi D l_k + \alpha \pi d l_k = \pi l_k (D + \alpha d).$$

Подставляем найденные выражения в (9) и, отнеся их к D , получим выражение (11).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ротерс. Электромагнитные механизмы. Госэнергоиздат, 1949.
2. А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. Электромагниты постоянного тока. Госэнергоиздат, 1960.
3. М. Г. Кобленц. Выбор оптимальных соотношений меди и стали в аппаратах постоянного тока. Вестник электропромышленности, № 11, 1961.
4. Ф. А. Ступель. Расчет и конструкция электромагнитных реле. Госэнергоиздат, 1950.