

ТЕПЛОЙ РАСЧЕТ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА ЗАЩИЩЕННОГО ИСПОЛНЕНИЯ СЕРИИ П2

Д. И. САННИКОВ, Р. Я. КЛЯЙН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

В данной работе излагается методика теплового расчета якоря машин постоянного тока с высотой оси вращения h до 200 мм и скоростью вращения до 3000 об/мин. с аксиальной системой вентиляции без вентиляционных каналов.

Предлагаемая методика учитывает основные факторы, влияющие на теплообмен машины в соответствии с общепринятыми воззрениями на процесс теплоотдачи электрических машин, а также результаты экспериментальных исследований теплоотдачи, проведенных авторами [3].

Для расчета нагрева якоря рассматривается эквивалентная тепловая схема замещения на рис. 1.

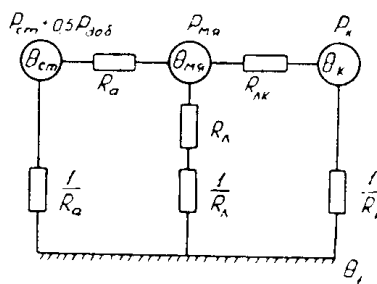


Рис. 1. Упрощенная эквивалентная тепловая схема якоря

Основные допущения:

1. Распределение температуры по длине обмотки якоря в машинах небольшой мощности (в пределах 20—30 кВт) является практически равномерным. В связи с этим якорь рассматривается как одно тело, к которому относятся, кроме обмотки, также сердечник и коллектор, и характеризуется эффективной поверхностью охлаждения

$$S_{я} = \pi D l_{э}, \quad (1)$$

где

D — диаметр якоря,

$l_{э}$ — эквивалентная длина якоря.

2. Тепло, выделяемое в полюсных катушках, уносится воздушным потоком в междуполюсных каналах, и теплообмен между якорем и по-

люсами отсутствует. Это допущение позволяет рассматривать якорь изолированно от полюсов.

3. Распределение температуры охлаждающего воздуха по длине машины подчиняется линейному закону, и учет подогрева воздуха при определении превышения температуры обмотки якоря осуществляется добавлением среднего подогрева, найденного по формуле:

$$\Delta\theta_{f\text{ ср}} = \frac{k_f \sum P_{гр}}{2C_p V}, \quad (2)$$

где

k_f — коэффициент подогрева воздуха, учитывающий, что часть потерь отводится помимо системы вентиляции к конструктивным деталям за счет теплопроводности и излучения, а также, что часть тепла от воздуха отводится к станине и щитам;

$P_{гр}$ — суммарные греющие потери без механических;

C_p — теплоемкость воздуха;

V — расход воздуха.

4. Условия охлаждения передней и задней лобовой части одинаковы и коэффициент теплоотдачи $\alpha_{л}$ усредняется.

Тепловые проводимости и сопротивления схемы рис. 1 определяются следующим образом. Тепловая проводимость от поверхности активной части якоря к внутреннему воздуху

$$\Lambda_a = \alpha_a \pi D l_a, \quad (3)$$

α_a — коэффициент теплоотдачи активной части якоря,

l_a — длина активной части.

Тепловая проводимость поверхности обеих лобовых частей

$$\Lambda_{л} = 2\alpha_{л} D_{л} f_{л}', \quad (4)$$

$\alpha_{л}$ — средний коэффициент теплоотдачи лобовых частей обмотки якоря,

$D_{л}$ — диаметр лобовой части,

$f_{л}'$ — расчетный вылет лобовой части.

На основании анализа машин серии П 1—6 габаритов установлено, что для двухполюсных машин в среднем

$$f_{л}' = 0,6D, \quad (5)$$

для четырехполюсных

$$f_{л}' = 0,45D. \quad (6)$$

Проводимость коллектора

$$\Lambda_k = 1,4\alpha_k \pi D_k l_k, \quad (7)$$

здесь

α_k — коэффициент теплоотдачи поверхности коллектора;

D_k — диаметр коллектора;

l_k — длина коллектора.

Коэффициент 1,4 в формуле (7) учитывает увеличение теплоотдающей поверхности коллектора за счет отвода тепла щетками.

Тепловое сопротивление между медью обмотки и сталью сердечника R_a состоит из теплового сопротивления пазовой изоляции $R_{иа}$ и теплового сопротивления зубцов якоря R_z

$$R_a = R_{иа} + R_z. \quad (8)$$

Тепловое сопротивление пазовой изоляции определяется из выражения [4]

$$R_{иа} = \frac{k_{п} \Delta_{и}}{z l_a \Pi \lambda_{и}}, \quad (9)$$

$\Delta_{и}$ — толщина пазовой изоляции;
 z — число пазов;
 Π — охлаждаемый периметр паза;
 $\lambda_{и}$ — коэффициент теплопроводности пазовой изоляции;
 $K_{и} > 1$ — учитывает увеличение теплового сопротивления за счет изоляции проводников всыпной обмотки.

Тепловое сопротивление зубцов якоря на 1/3 высоты

$$R_z = \frac{h_z}{3z l_a b_z \lambda_{Fe} k_{Fe}}, \quad (10)$$

где

h_z — высота зубца;
 b_z — ширина зубца;
 λ_{Fe} — удельная теплопроводность стали;
 k_{Fe} — коэффициент заполнения пакета сталью.

Введем понятие удельного внутреннего теплового сопротивления, то есть сопротивления, отнесенного к единице площади поверхности охлаждения. Для активной части

$$M_a = \pi D l_a R_a = \pi D l_a (R_{иa} + R_z). \quad (11)$$

После подстановки (9) и (10) в (11) и ряда преобразований получаем

$$M_a = \frac{t_1}{\Pi} \frac{\Delta_{и} k_{и}}{\lambda_{и}} + \frac{1}{3 \lambda_{Fe} k_{Fe}} \frac{t_1}{b_z} \frac{h_z}{D} D, \quad (12)$$

где

t_1 — зубцовый шаг якоря.

Комплексы $\frac{\Delta_{и} k_{и}}{\lambda_{и}}$ и $\frac{1}{3 \lambda_{Fe} k_{Fe}}$ для машин с одинаковым классом изоляции и маркой стали приблизительно постоянны. Входящие в (12) отношения размеров $\frac{t_1}{\Pi}$, $\frac{t_1}{b_z}$ и $\frac{h_z}{D}$ могут быть с некоторым приближением представлены как степенные функции от D . На основании анализа отрезка серии П 1—6 габарита установлена следующая зависимость:

для класса изоляции А

$$M_a = \frac{235}{D^{\frac{3}{4}}} + 1,4 D^{\frac{1}{2}} \approx \frac{150}{D^{\frac{1}{2}}}, \quad (13)$$

(D — выражается в см);

для любого класса изоляции

$$M_a = k_{и} \frac{120}{D^{\frac{1}{2}}}, \quad (14)$$

причем для класса А $k_{и} = 1,25$, для классов В, Е, F, Н $k_{и} = 1,0$.

Погрешность формулы (14) по сравнению с точным расчетом не превышает 6%.

Проведя аналогичный анализ для удельных тепловых сопротивлений лобовых частей и коллектора

$$M_{л} = \pi D_{л} l_{л} R_{л}, \quad (15)$$

$$M_{к} = 1,4 \pi D_{к} l_{к} R_{к}, \quad (16)$$

на основании методики [4] получаем для рассматриваемого отрезка серии их выражение через D и некоторые другие параметры

$$M_{л} = k_{и} \left(1,9 + \frac{1,5}{p^{\frac{1}{3}}} D \right) - k_{и}^2 \sqrt{\frac{D_{п}}{30}}, \quad (17)$$

$$M_{к} = k_{и}^4 \frac{D_{к} l_{к}}{D} \left(\sqrt{w_s} - \frac{1}{\sqrt{w_s}} \right). \quad (18)$$

Здесь

n — скорость вращения, об/мин,

p — число пар полюсов,

w_s — число витков в секции (при переменном w_s берется его среднее дробное значение).

Формула для определения $M_{л}$ получена с учетом влияния изоляции бандажа на лобовых частях на тепловое сопротивление. Выражение для $M_{к}$ учитывает аксиальное тепловое сопротивление выводов от секций к пластинам коллектора и сопротивление изоляции между выводами и лобовыми частями обмотки. Поскольку при $w_s=1$ последнее сопротивление отсутствует, то тепловое сопротивление между коллектором и ближайшим концом вылета лобовых частей равно нулю, как следует из формулы (18).

Коэффициенты теплоотдачи в выражениях (3), (4) и (7) рассчитываются по эмпирическим формулам, полученным на основании обобщения большого количества типовых испытаний машин серии П, а также результатов исследований коэффициентов теплоотдачи на моделях

$$\alpha_a = 0,95 \cdot 10^{-3} (1 + 0,6v_a^{0,9}) k_{л}, \quad (19)$$

$$\alpha_{л} = 1,25 \cdot 10^{-3} (1 + 0,85v_a^{0,85}) k_{л}, \quad (20)$$

$$\alpha_{к} = 1,6 \cdot 10^{-3} (1 + v_{к}^{0,7}) k_{к}. \quad (21)$$

Здесь

v_a — окружная скорость якоря,

$v_{к}$ — окружная скорость коллектора.

Коэффициенты k_a , $k_{л}$ и $k_{к}$ учитывают условия охлаждения элементов якоря и характер движения воздуха в зависимости от аксиальной скорости и коэффициента заполнения междуполюсного промежутка $k_0 = \frac{S_{к}}{S_{кл}}$.

На рис. 2—4 представлены зависимости $k = f\left(\frac{v_p}{v}\right)$, по которым выбираются k_a , $k_{л}$ и $k_{к}$ в формулах (19), (20) и (21).

Здесь

$v_p = \frac{V}{S_{к}}$ — расходная скорость воздуха в междуполюсном канале;

$v_{рл} = \sqrt{\frac{V^2}{S_{к} S_{кл}}}$ — среднегеометрическая скорость воздуха в камере над лобовыми частями;

$S_{к}$ — площадь сечения междуполюсного канала;

$S_{кл}$ — площадь сечения камеры над лобовыми частями;

$v_{рк} = \frac{V}{S_{кл}}$ — скорость воздуха в камере над коллектором.

Поскольку якорь рассматривается нами как одно тело, то весьма удобно для расчета ввести понятие эквивалентного коэффициента теплоотдачи, учитывающего как условия охлаждения поверхности, так и тепловое сопротивление общей и витковой изоляции.

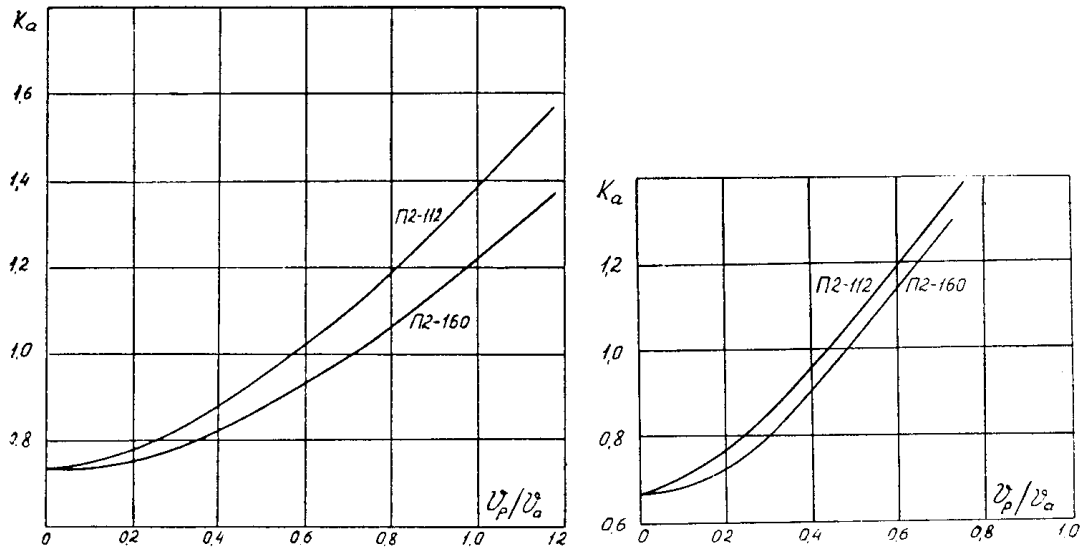


Рис. 2. Зависимость коэффициента k_a для активной части якоря от скорости воздуха при $n=1500$ об/мин и $n=3000$ об/мин.

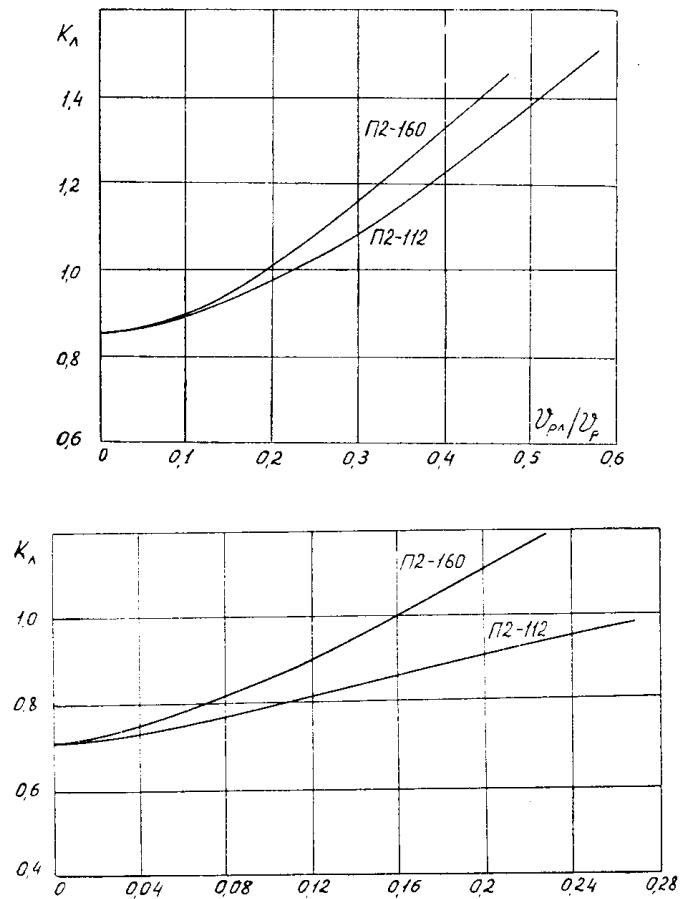


Рис. 3. Зависимость коэффициента k_l для лобовых частей якоря от скорости воздуха при $n=1500$ об/мин. и $n=3064$ об/мин.

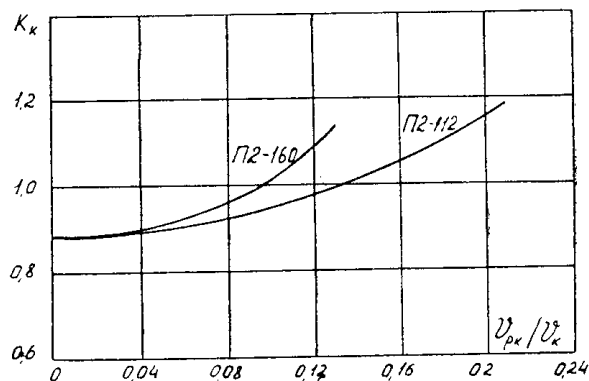
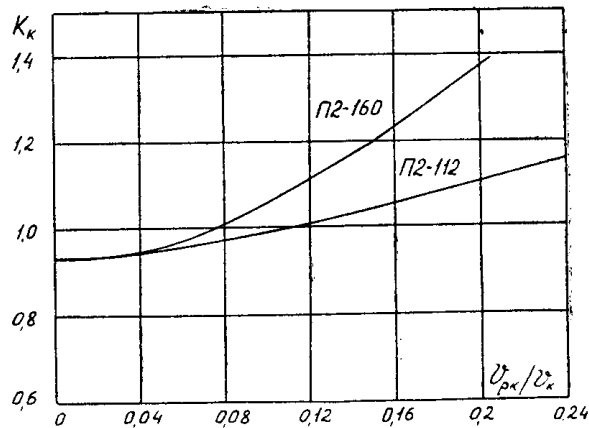


Рис. 4. Зависимость коэффициента K_k для коллектора при $n=1500$ об/мин и $n=3000$ об/мин

Он определяется из выражения

$$\alpha_{эя} = \left(\frac{\alpha_a \zeta_a}{1 + M_a \alpha_a} + \frac{\alpha_l \zeta_l}{1 + M_l \alpha_l} + \frac{\alpha_k \zeta_k}{1 + M_k \alpha_k} \right) k_p. \quad (22)$$

Здесь

$$\zeta_a = \frac{l_a}{l_э}; \quad \zeta_l = \frac{1,9l_l'}{l_э}; \quad \zeta_k = \frac{1,4l_k}{l_э} \frac{D_k}{D} \quad (23)$$

— долевые значения длин участков якоря,

$$l_э = l_a + 1,9l_l' + 1,4l_k \frac{D_k}{D}. \quad (24)$$

Эквивалентная длина якоря $l_э$ представляет собой сумму длин активной части, лобовых частей и коллектора, приведенных к диаметру активной части якоря. Так как в рассматриваемых машинах D_l/D составляет в среднем 0,95, то приведенная длина вылета лобовых частей берется с коэффициентом 1,9.

$$k_p = \frac{1}{1 - \frac{M_a \alpha_a}{1 + M_a \alpha_a} \frac{P_{ст} + 0,5P_{доб}}{P_я} - \frac{M_k \alpha_k}{1 + M_k \alpha_k} \frac{P_k}{P_я}} \quad (25)$$

— коэффициент отношения потерь;

$P_{ст}$ — потери в стали;

$P_{доб}$ — добавочные потери;

P_k — суммарные потери в коллекторе;

$P_{я} = P_{мя} + P_{ст} + P_k + 0,5P_{доб}$ — суммарные потери в якоре;

$P_{мя}$ — потери в обмотке якоря.

Превышение температуры якоря над окружающим воздухом определяется по формуле

$$\theta_{я} = \frac{P_{я}}{k_p S_{я} \alpha_{эя}} + \Delta\theta_{fcp} \quad (26)$$

Средний подогрев воздуха $\Delta\theta_{fcp}$ находится по (2), где $k_f = 0,9$

$$P_{гр} = P_{я} + P_{п}, \quad (27)$$

$P_{п}$ — суммарные потери в катушках полюсов.

В таблицах дается подробный расчет якоря машин П2 с высотой оси вращения $h = 112$ и 160 мм.

Таблица 1 — исходные данные, таблица 2 — промежуточные и конечные результаты расчета и сравнение с опытом.

Основные выводы

1. В предлагаемой методике теплового расчета якоря использованы формулы для расчета коэффициентов теплоотдачи элементов якоря, учитывающие характер движения воздушного потока.

Таблица 1

| №№ п.п. | | | П2=160 | | П2=112 | |
|------------|-----------------|-----------|----------------------|--------|---------------------|--------|
| | | | n=1500 | n=3000 | n=1500 | n=3000 |
| 1. | $U_{я}$ | <i>в</i> | 228 | 440 | 220 | 440 |
| 2. | $I_{я}$ | <i>а</i> | 60 | 65 | 13,7 | 16,5 |
| 3. | $P_{мя}$ | <i>вт</i> | 525 | 684 | 250 | 372 |
| 4. | $P_{ст}$ | » | 130 | 420 | 39 | 182 |
| 5. | $P_{доб}$ | » | 137 | 286 | 32,3 | 72,6 |
| 6. | $P_{п}$ | | 717 | 855 | 390 | 474 |
| 7. | P_k | | 154 | 223 | 47,2 | 72,5 |
| 8. | $P_{я}$ | | 947 | 1470 | 352 | 663 |
| 9. | $P_{д} + P_{п}$ | | 1664 | 2325 | 742 | 1137 |
| 10. | D | см | 16,2 | | 10,6 | |
| 11. | D_k | » | 12,5 | | 8,0 | |
| 12. | l_a | » | 17 | | 15 | |
| 13. | l_k | | 7 | | 3,7 | |
| 14. | l_n | | 7 | | 6 | |
| 15. | $l_э$ | | 37,7 | | 30,3 | |
| 16. | ζ_a | | 0,45 | | 0,5 | |
| 17. | ζ_n | | 0,375 | | 0,35 | |
| 18. | ζ_k | | 0,20 | | 0,125 | |
| 19. | S_k | m^2 | $64,5 \cdot 10^{-4}$ | | $63 \cdot 10^{-4}$ | |
| 20. | $S_{кл}$ | » | $368 \cdot 10^{-4}$ | | $180 \cdot 10^{-4}$ | |
| 21. | $2p$ | | 4 | | 4 | |

2. Введены понятия «удельное внутреннее тепловое сопротивление» и «эквивалентный коэффициент теплоотдачи», позволившие существенно упростить вычисления тепловых сопротивлений и сократить объем счетной работы практически без ущерба для точности.

Таблица 2

| № п/п | Наимено- вание | П2-160 | | П2-112 | |
|----------|---|---------|-----------|--------|--------|
| | | п=1500 | п=3000 | п=1500 | п=3000 |
| 1. | V | 0,047 | 0,082 | 0,018 | 0,036 |
| 2. | v _a | 12,7 | 25,7 | 8,3 | 16,6 |
| 3. | M _a | 20 | 20 | 25 | 25 |
| 4. | M _л | 20 | 20 | 18 | 18 |
| 5. | M _к | 13 | 13 | 12,5 | 12,5 |
| 6. | v _p | 6,3 | 12,7 | 2,86 | 5,72 |
| 7. | v _{p1} v _a | 0,496 | 0,5 | 0,345 | 0,345 |
| 8. | κ _a | 0,875 | 1,01 | 0,846 | 0,9 |
| 9. | α _a ·10 ³ | 5,76 | 11,5 | 4,05 | 7,33 |
| 10. | α _a M _a | 0,115 | 0,23 | 0,101 | 0,183 |
| 11. | α _{аэ} | 5,17 | 9,35 | 3,68 | 6,19 |
| 12. | α _{аэ} ζ _a | 2,32 | 4,21 | 1,84 | 3,1 |
| 13. | v _{pл} | 2,64 | 5,33 | 1,69 | 3,38 |
| 14. | v _{pл} /v _a | 0,208 | 0,21 | 0,204 | 0,204 |
| 15. | κ _л | 1,02 | 1,135 | 0,975 | 1,12 |
| 16. | α _л ·10 ³ | 10,7 | 20,3 | 7,5 | 14,45 |
| 17. | α _л M _л | 0,214 | 0,406 | 0,135 | 0,26 |
| 18. | α _{лэ} | 8,81 | 14,4 | 6,61 | 11,5 |
| 19. | α _{лэ} ζ _л | 3,09 | 5,04 | 2,48 | 4,31 |
| 20. | v _{pк} | 1,1 | 2,23 | 1,0 | 2,0 |
| 21. | v _{pк} /v _к | 0,112 | 0,113 | 0,159 | 0,159 |
| 22. | κ _к | 1,09 | 1,06 | 1,05 | 1,05 |
| 23. | α _к ·10 ³ | 10,35 | 15,4 | 7,74 | 11,55 |
| 24. | α _к M _к | 0,1345 | 0,2 | 0,0967 | 0,1445 |
| 25. | α _{кэ} | 9,12 | 12,8 | 7,06 | 10,1 |
| 26. | α _{кэ} ζ _к | 1,825 | 2,56 | 0,882 | 1,26 |
| 27. | Σλ _г ζ _г | 7,235 | 11,81 | 5,2 | 8,67 |
| 28. | κ _p | 1,042 | 1,11 | 1,027 | 1,07 |
| 29. | α _{эя} | 7,55 | 13,1 | 5,35 | 9,27 |
| 30. | P _я /S _я ·α _{эя} | 65,3 | 58,5 | 65,1 | 70,8 |
| 31. | Δθ _{гср} | 18,6 | 12,9 | 18,8 | 14,3 |
| 32. | θ _я | 83,9 | 71,4 | 83,7 | 85,1 |
| 33. | θ _{яопытн} | 79/81,5 | 79,5/80,3 | 80/77 | 79,5 |
| 34. | (θ _я - θ _{яоп})·100/θ _{яоп} | 6/3 | -10/-11 | 5/9 | 7 |

Примечание:

1. Поскольку в рассматриваемых макетных образцах двигателей применена пазовая изоляция с более высоким коэффициентом теплоотдачи (композиция ИЭМ) формулы для расчета M_a, M_л и M_к умножаются на коэффициент 2/3.

2. Опытное значение θ_{яоп} п. 33 приведено по двум машинам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. С. Гурин и М. Н. Курочкин. Проектирование машин постоянного тока. Госэнергоиздат, 1961.
2. А. И. Борисенко, А. И. Яковлев. Методика теплового расчета защищенных быстроходных двигателей постоянного тока. — «Электромеханика», 1964, № 5.
3. Р. Я. Кляйн, Д. И. Санников. Исследование коэффициентов теплоотдачи на макетах машин постоянного тока малой мощности. «Изв. ТПИ», т. 211, 1970.
4. Д. И. Санников, Р. Я. Кляйн. Тепловой расчет якоря машин постоянного тока малой мощности. «Изв. ТПИ», т. 212, 1971.