

**КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСЧЕТНОЙ ПОЛЮСНОЙ ДУГИ
АЛЬТЕРНАТИВНО-ПУЛЬСАЦИОННЫХ МАШИН
С МАГНИТНОМЯГКИМИ ПОЛЮСНЫМИ НАКОНЕЧНИКАМИ**

Ю. Н. КРОНЕБЕРГ, А. С. ЖИБИНОВ, В. Б. ГОМЗЯКОВ

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры электрооборудования АЭМФ)

Среди электрических машин комбинированного возбуждения выделяется значительная группа машин [1÷6 и др.], в которых регулирование осуществляется изменением потока одноименных полюсов. Одна из типичных полюсных систем таких машин состоит из чередующихся между собой брусков постоянных магнитов, намагниченных в одном направлении, и магнитномягких полюсов (известны разновидности и с когтеобразными полюсами). Начальное возбуждение обеспечивается магнитами, а регулирование — изменением потока магнитномягких полюсов, при этом поток магнитов изменяется незначительно. Для увеличения глубины регулирования магнитномягкие полюсы могут выполняться шире магнитов. В общем случае поле возбуждения имеет постоянную и переменную составляющие (как в пульсационных машинах) и в то же время является знакопеременным (подобно альтернативным).

Как показывают исследования [4÷6], альтернативно-пульсационные машины являются одной из перспективных разновидностей машин комбинированного возбуждения, и создаются предпосылки их внедрения в качестве источников тока повышенной частоты.

Отмеченная специфичность поля требует уточнения методов вычисления некоторых параметров, в том числе и коэффициента расчетной полюсной дуги α_i , который обычно определяется как отношение средней индукции поля возбуждения $B_{\partial 0}$ на полюсном делении к максимальной индукции $B_{\partial m}$ этого поля над серединой полюса:

$$\alpha_i = \frac{B_{\partial 0}}{B_{\partial m}} = \frac{1}{\pi B_{\partial m}} \int_{-\vartheta_0}^{+\vartheta_0} B_{\partial}(\vartheta) d\vartheta, \quad (1)$$

где $B_{\partial}(\vartheta)$ — закон изменения индукции воздушного зазора по расточке якоря;

$-\vartheta_0, +\vartheta_0$ — угловые координаты точки перехода индукции через нулевое значение при расположении начала координат по оси полюса.

В альтернативно-пульсационных машинах в отличие от альтернативных, где пределы интегрирования известны заранее ($-\pi/2$ и $+\pi/2$), положение точки перехода индукции через нулевое значение зависит от размеров полюсов и степени возбуждения машины. Это приводит к необходимости вычисления α_i отдельно для полюсов разной полярности.

Рассмотрим альтернативно-пульсационную машину с полюсами постоянной ширины (рис. 1), в которой постоянные магниты снабжены полюсными наконечниками. При равенстве индукций узкого $B_{\delta mN}$ (примем его условно северным) и широкого $B_{\delta mS}$ (южного) полюсов, т. е. когда степень возбуждения $\beta = \frac{B_{\delta mS}}{B_{\delta mN}} = 1$, нулевое значение индукции воздушного зазора будет совпадать со серединой межполюсного промежутка [7]. Когда $\beta > 1$, точка перехода индукции через 0 смещается в сторону узкого полюса, а при $\beta < 1$ — широкого (точки ϑ'_0 и ϑ''_0 , рис. 1,б).

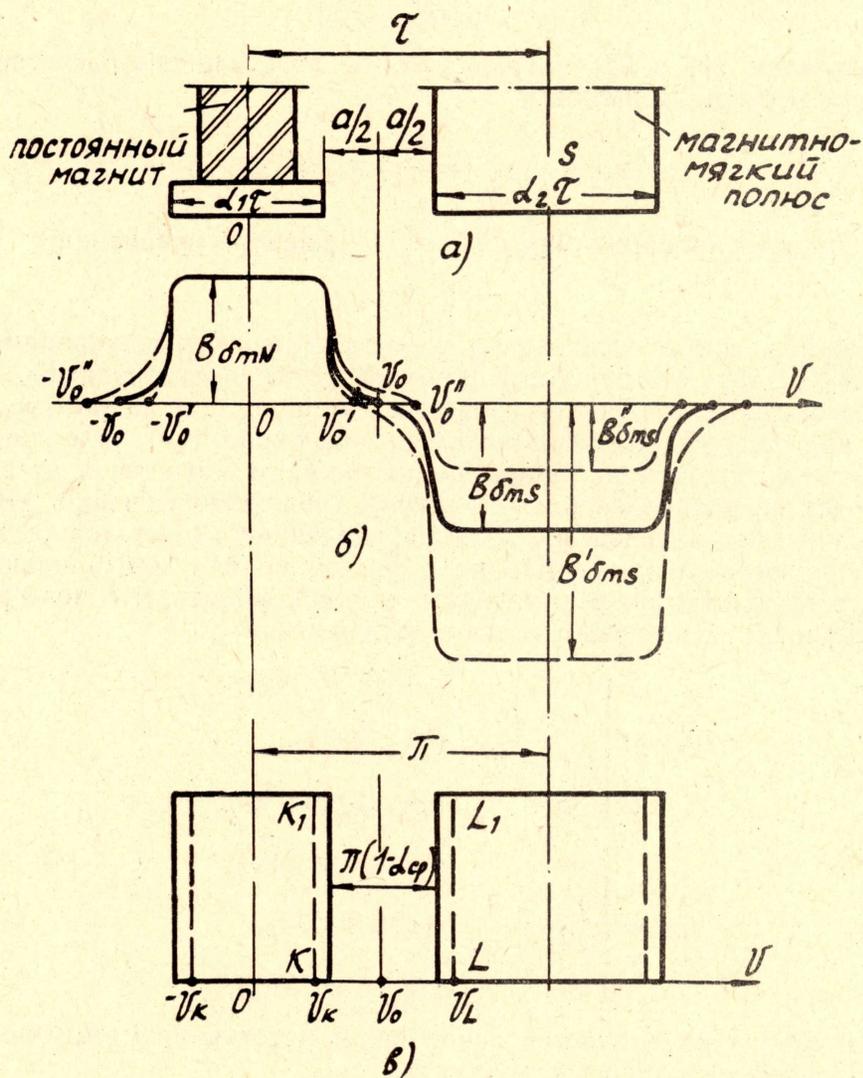


Рис. 1. Основные размеры и координаты полюсной системы для расчета a_i : а) полюсная система; б) поле в воздушном зазоре; в) координаты изменения относительной удельной магнитной проводимости

Распределение индукции на поверхности якоря по методу магнитных проводимостей [8, 9] выражается через относительные удельные магнитные проводимости северного $\lambda_{\delta N}$ и южного $\lambda_{\delta S}$ полюсов, умноженные соответственно на падение н. с. в воздушном зазоре между северным полюсом и якорем ($U_N - U_{\text{вя}}$) и между южным полюсом и якорем ($U_S - U_{\text{вя}}$):

$$B_{\delta}(\vartheta) = \Lambda_{\delta 0} [\lambda_{\delta N}(U_N - U_{\text{вн}}) + \lambda_{\delta S}(U_S - U_{\text{вн}})], \quad (2)$$

где $\Lambda_{\delta 0}$ — магнитная проводимость поля по середине полюса. Учитывая, что

$$U_{\text{вн}} - U_S = \beta(U_N - U_{\text{вн}}), \quad (3)$$

получаем:

$$B_{\delta}(\vartheta) = \Lambda_{\delta 0}(U_N - U_{\text{вн}})(\lambda_{\delta N} - \beta\lambda_{\delta S}). \quad (4)$$

Максимальное значение индукции под северным полюсом

$$B_{\delta mN} = \Lambda_{\delta 0}(U_N - U_{\text{вн}}). \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в (1), получим коэффициент расчетной полюсной дуги северного полюса

$$\alpha_{iN} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\vartheta_0} (\lambda_{\delta N} - \beta\lambda_{\delta S}) d\vartheta, \quad (6)$$

где предел интегрирования определяется из решения уравнения

$$\lambda_{\delta N} - \beta\lambda_{\delta S} = 0. \quad (7)$$

Выражения для относительных удельных магнитных проводимостей, полученные в [9] для эквипотенциальной поверхности полюсов, могут быть применены и для рассматриваемых машин, т. к. полюсные наконечники являются эквипотенциальными поверхностями, находящимися под полным магнитным потенциалом постоянного магнита, а их высота мало влияет на распределение индукции на поверхности якоря [10].

В зазоре под полюсами, между проведенными достаточно далеко от краев полюсов линиями KK_1 на северном полюсе и LL_1 на южном (рис. 1), с высокой степенью точности можно принять, что поле равномерное [9] и $\lambda_{\delta N}$, $\lambda_{\delta S}$ определяются выражениями

$$\lambda_{\delta N} = \begin{cases} 1 & (-\vartheta_K < \vartheta < \vartheta_K), \\ \frac{q^4 - t^2}{t(q^4 - 1)} & (\vartheta_K < \vartheta < \vartheta_L), \\ 0 & (\vartheta_L < \vartheta < 2\pi - \vartheta_L). \end{cases} \quad (8a)$$

$$\lambda_{\delta S} = \begin{cases} 0 & (-\vartheta_K < \vartheta < \vartheta_K), \\ \frac{q^2(t^2 - 1)}{t(q^4 - 1)} & (\vartheta_K < \vartheta < \vartheta_L), \\ 1 & (\vartheta_L < \vartheta < 2\pi - \vartheta_L), \end{cases} \quad (8б)$$

где постоянная q определяется отношением расстояния между полюсами a к величине воздушного зазора δ

$$q = \frac{a}{2\delta} + \sqrt{\left(\frac{a}{2\delta}\right)^2 + 1}. \quad (9)$$

Параметр t связан с угловой координатой ϑ , отсчитываемой от середины северного полюса выражением

$$\vartheta = \frac{\pi}{2} - (1 - \alpha_{\text{сп}}) \left[\frac{\pi}{2} - 2 \operatorname{arctg} \frac{t}{q} + \frac{\delta}{a} \ln \frac{(t+1)(q^2-t)}{(t-1)(q^2+t)} \right], \quad (10)$$

где ϑ_K и ϑ_L — угловые координаты линий KK_1 и LL_1 ;

τ и π — полюсное деление в линейных и угловых единицах.

Решая (7) с учетом (8а, б), найдем значение параметра t_0 , соответствующие угловой координате ϑ_0 ,

$$t_0 = q \sqrt{\frac{q^2 + \beta}{\beta q^2 + 1}}. \quad (11)$$

Выражение (6) для узкого (северного) полюса принимает вид

$$\alpha_{i1} = \alpha_{iN} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\vartheta_K} d\vartheta + \frac{2}{\pi} \int_{\vartheta_K}^{\vartheta_0} \frac{q^4 - t^2}{t(q^4 - 1)} d\vartheta - \frac{2}{\pi} \beta \int_{\vartheta_K}^{\vartheta_0} \frac{q^2(t^2 - 1)}{t(q^4 - 1)} d\vartheta. \quad (12)$$

После замены во втором и третьем интегралах переменной интегрирования ϑ на t и преобразований получаем в окончательном виде:

$$\alpha_{i1} = \alpha_1 + \frac{2}{\pi} (1 - \alpha_{cp}) \left\{ \operatorname{arctg} \frac{2\delta}{a} + \frac{\delta}{a} \left[\ln \left(1 + \frac{a^2}{4\delta^2} \right) + \beta \ln \beta - (\beta + 1) \ln(\beta + 1) \right] \right\}. \quad (13a)$$

Аналогичными вычислениями получаем выражение широкого полюса:

$$\alpha_{i2} = \alpha_2 + \frac{2}{\pi} (1 - \alpha_{cp}) \left\{ \operatorname{arctg} \frac{2\delta}{a} + \frac{\delta}{a} \left[\ln \left(1 + \frac{a^2}{4\delta^2} \right) + \ln \beta - \frac{\beta + 1}{\beta} \ln(\beta + 1) \right] \right\}. \quad (13б)$$

В формулах (13а, б) $\alpha_{cp} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$ — среднее значение коэффициента полюсного перекрытия.

В частности, при $\alpha_1 = \alpha_2$ и $\beta = 1$ выражения (13а, б) совпадают и определяют значение коэффициента расчетной полюсной дуги альтернативной машины

$$\alpha_i = \alpha + \frac{2}{\pi} (1 - \alpha) \left[\operatorname{arctg} \frac{2\delta}{a} + \frac{\delta}{a} \ln \left(\frac{1}{4} + \frac{a^2}{16\delta^2} \right) \right]. \quad (14)$$

Выражения (13а, б) могут быть преобразованы:

$$\alpha_{i1} = \alpha_1 + \Delta\alpha_\delta + \frac{\delta}{\tau} \Delta_{1\beta}, \quad (15a)$$

$$\alpha_{i2} = \alpha_2 + \Delta\alpha_\delta + \frac{\delta}{\tau} \Delta_{2\beta}, \quad (15б)$$

где

$$\Delta\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} (1 - \alpha_{cp}) \left\{ \operatorname{arctg} \frac{2\frac{\delta}{\tau}}{1 - \alpha_{cp}} + \frac{\frac{\delta}{\tau}}{1 - \alpha_{cp}} \ln \left[\frac{1}{4} + \left(\frac{1 - \alpha_{cp}}{4\frac{\delta}{\tau}} \right)^2 \right] \right\}, \quad (16)$$

$$\Delta_{1\beta} = \frac{2}{\pi} [2 \ln 2 + \beta \ln \beta - (1 + \beta) \ln(1 + \beta)], \quad (17a)$$

$$\Delta_{2\beta} = \frac{2}{\pi} \left[2 \ln 2 + \ln \beta - \frac{1+\beta}{\beta} \ln(1+\beta) \right]. \quad (176)$$

Слагаемое $\Delta\alpha_0$ учитывает влияние магнитного поля, распространяющегося за пределы полюсного наконечника, когда индукции под полюсами одинаковы, т. е. $\beta=1$. Оно, как и второе слагаемое в формуле (14), определяется расстоянием между полюсами и величиной воздушного зазора.

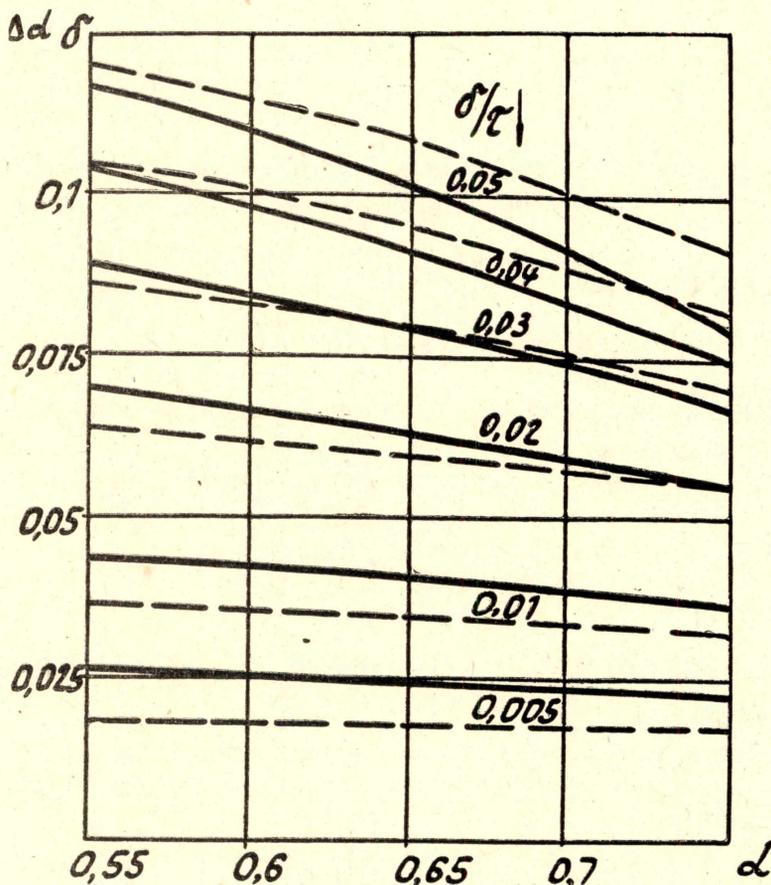


Рис. 2. Зависимости $\Delta\alpha_0 = f(\alpha_{ср})$ ——— рассчитанные по формуле (16); рассчитанные по [11]

На рис. 2 приведены зависимости слагаемого $\Delta\alpha_0$ от величины $\alpha_{ср}$ для всего практически используемого диапазона δ/τ . На этом же рисунке для сравнения приведены зависимости аналогичного слагаемого по аппроксимированной формуле [11], полученной на основании графических построений магнитного поля в воздушном зазоре. Из рисунка видно, что для средних значений δ/τ указанные зависимости близко совпадают. Максимальная разница в величине α_i , рассчитанной по приведенным формулам и [11], составляет 1%.

Коэффициенты $\Delta_{1\beta}$ и $\Delta_{2\beta}$ учитывают изменение магнитного поля за пределами полюсного наконечника при отклонении β от 1. На рис. 3 приведены зависимости этих коэффициентов при изменении β от 0 до 2, позволяющие проанализировать изменение коэффициента расчетной полюсной дуги при регулировании альтернативно-пульсационной машины. Они показывают, что при слабом возбуждении машины (или отсутствии возбуждения), а также при очень сильном возбуждении изменение α_i

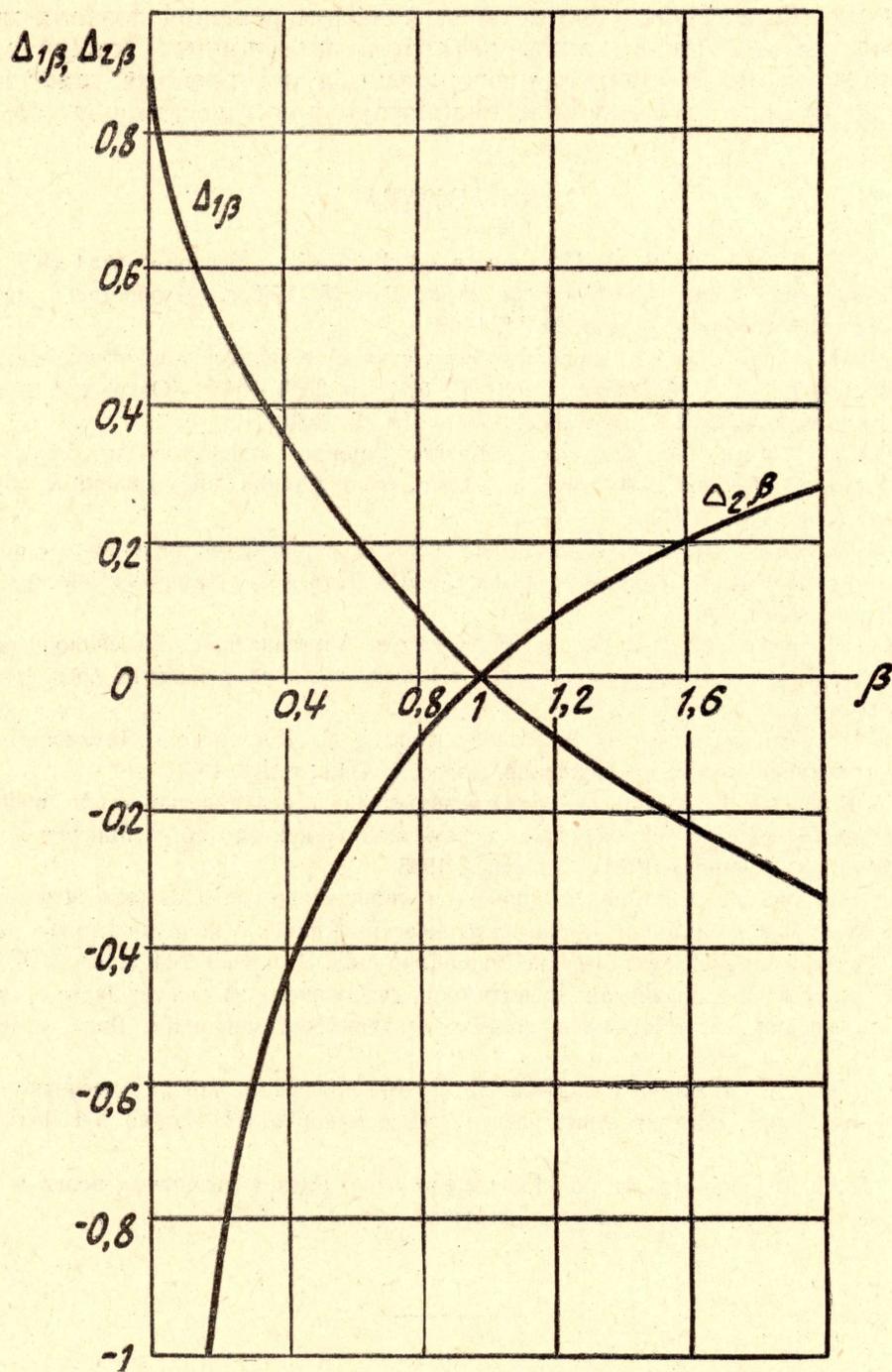


Рис. 3. Зависимости $\Delta_{1\beta}=f(\beta)$, $\Delta_{2\beta}=f(\beta)$

может достигать значительной величины, и его необходимо учитывать. Например, в машине с $\alpha_{\text{ср}}=0,6$ при большом воздушном зазоре ($\delta/\tau=0,05$) и слабом возбуждении ($\beta=0,2$) изменения α_{i1} и α_{i2} достигают 6%. При незначительных отличиях индукций узких и широких полюсов ($0,8 \leq \beta \leq 1,2$) изменение α_i не превышает 1%, и им можно пренебречь.

В альтернативно-пульсационных машинах с полюсами переменной ширины [3] вычисление α_{i1} и α_{i2} может проводиться по формулам (15а, б), (16), (17а, б), при этом величина δ/τ должна приниматься с учетом бокового скоса полюсов аналогично [7].

Таким образом, полученные аналитические решения позволяют производить вычисления α_i альтернативно-пульсационных машин с магнитномягкими полюсными наконечниками, а построенные графические зависимости пригодны для пользования при практических расчетах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Э. Домбур, В. А. Пугачев, З. К. Сика. Бесконтактная синхронная машина. Авт. свид. СССР № 213956, кл. 21 d^2 , 3 от 18/II—65г. «Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», № 11, 1968.

2. Ю. Н. Кронеберг. Торцовый регулируемый генератор с постоянными магнитами. Авт. свид. СССР № 265250, кл. 21 d^2 , 6/01 от 26/V—62 г. «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», № 10, 1970.

3. Ю. Н. Кронеберг. Бесконтактный синхронный генератор. Авт. свид. СССР № 194936 кл. 21 d^2 , 21 d^2 6/01 от 8/VI—62 г. «Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», № 9, 1967.

4. Л. Э. Домбур, В. А. Пугачев. Аксиальные индукторные машины с постоянными магнитами в пазах индуктора. Известия АН Латв. ССР. Серия физических и технических наук, № 3, 1968.

5. Ю. Н. Кронеберг, А. С. Жибинов. Альтернативно-пульсационный генератор и основы его расчета, Труды третьей Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам, Рига, 1966.

6. Ю. Н. Кронеберг, В. Б. Гомзяков, А. С. Жибинов. Двухпакетный генератор комбинированного возбуждения. Известия ТПИ, т. 212, 1971.

7. З. К. Сика. Коэффициенты поля возбуждения и реакции якоря для явнополюсной синхронной машины с полюсами переменной ширины, сб. «Магнитное поле в электрических машинах», Рига, «Зинатне», 1965.

8. В. В. Апсит. Система допущений и упрощенных методов для исследования магнитного поля в воздушном зазоре электрических машин с когтеобразными полюсами, сб. «Бесконтактные электрические машины», вып. 3, изд-во АН Латв. ССР, 1963.

9. З. К. Сика. Магнитная проводимость воздушного зазора машины с когтеобразными полюсами, сб. «Магнитное поле в электрических машинах», Рига, «Зинатне», 1965.

10. З. К. Сика. Влияние радиальной высоты полюса на картину магнитного поля в воздушном зазоре. Бесконтактные электрические машины, III. Изд-во АН Латв. ССР, 1963.

11. Т. Г. Сорокер, И. И. Горжевский. Расчет магнитных полей в зазоре явнополюсной синхронной машины. Электричество, № 6, 1952.