

УДК 621.313.333.3:043.3.001.24

А.М. Олейников, В.В. Агафонов, С.В. Попов*Севастопольский национальный технический университет**Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053***К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ РАБОЧЕГО ЦИЛИНДРА ДВУХСЛОЙНОГО РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Приведены соотношения для расчета составляющих поля и параметров двухслойного ротора, результаты расчетов и экспериментальных исследований асинхронных двигателей малой мощности

К настоящему времени развитие теории, экспериментальных исследований и опытной эксплуатации асинхронных двигателей с двухслойным ротором (АДДР) достигло такого уровня, что вопрос о возможности и целесообразности практического использования этих машин в автономных и промышленных электроприводах из плоскости обсуждения, как это происходило 15...20 лет назад, закономерно переходит в область практической реализации.

В то же время требуют уточнения отдельные вопросы, связанные с конструированием массивных и двухслойных роторов, в первую очередь, для специальных электрических машин. В частности, решающее влияние на характеристики АДДР оказывает правильный выбор толщины массивного рабочего цилиндра двухслойного ротора. Как показано в [1], даже незначительное отклонение этой величины от оптимального значения приводит к ухудшению энергетических показателей двигателя. Увеличение толщины цилиндра ухудшает коэффициент мощности ($\cos\phi$), а уменьшение приводит к снижению КПД и полезной мощности АДДР.

В научной периодике в связи с этим активно обсуждается проблема точного определения глубины проникновения магнитного поля в тело массивного ротора [2 – 4]. Поэтому возникает необходимость экспериментальным путем проверить влияние толщины массивного цилиндра h_c двухслойного ротора на характеристики АДДР, ее связь с глубиной проникновения и определить на этой основе оптимальное значение h_c . По результатам такого эксперимента можно будет точно оценить приемлемость для практических расчетов тех или иных соотношений. Это и является предметом данной статьи.

Глубина проникновения Δ_1 магнитного поля для вращающегося массивного ротора электрической машины записывается в виде соотношения

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \mu_0 \mu_r s}}, \quad (1)$$

где ρ и μ_r – соответственно удельное электрическое сопротивление и относительная магнитная проницаемость ротора; s – скольжение; ω – угловая частота.

О характере затухания поля в двухслойном роторе АД можно судить по изменению величины и фазы любой его составляющей. Например, для границы раздела двух сред (рабочий цилиндр – сердечник) продольная составляющая электрического поля, определяющая величину тока, по отношению к ее значению на поверхности ротора записывается в виде [5]

$$\dot{E}_{hx} = \frac{1}{ch\dot{k}_1 h_1 + \left(\frac{\dot{b}_1 + \dot{a}_1}{\dot{b}_1 - \dot{a}_1} \right) sh\dot{k}_1 h_1}, \quad (2)$$

где комплексные коэффициенты определяются по соотношениям

$$\dot{a}_1 = \frac{\dot{k}_2}{\mu_{a2}} - \frac{\dot{k}_1}{\mu_{a1}}; \quad \dot{b}_1 = \frac{\dot{k}_2}{\mu_{a2}} + \frac{\dot{k}_1}{\mu_{a1}}; \quad \dot{k}_1 = A_1 + jB_1; \quad \dot{k}_2 = A_2 + jB_2,$$

а значения A и B

$$A = \frac{\pi}{\tau\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \beta^2}}, \quad B = \frac{\pi}{\tau\sqrt{2}} \sqrt{1 - \sqrt{1 + \beta^2}}$$

рассчитывают путем подстановки в них параметра $\beta = \frac{\tau \mu_a}{\pi \rho}$ vs со значениями τ , μ_a ($\mu_a = \mu_0 \cdot \mu_r$) и ρ , соответствующими определенному слою.

В большинстве случаев величина $\beta \gg 1$, поэтому $A \approx B$ и соотношение (2) упрощается, т.е. получаем

$$\dot{E}_{hx} = \frac{1}{ch\dot{k}_1 h_1 + \sqrt{d_1} sh\dot{k}_1 h_1}, \quad (3)$$

где $\dot{k}_1 = (1+j)\frac{1}{\Delta_1}$; $d_1 = \frac{\mu_{r1}\rho_1}{\mu_{r2}\rho_2}$; h_1 – толщина рабочего цилиндра.

Соотношения (2) и (3) более универсальны, чем (1). Действительно, если ротор массивный ($\mu_{r1}=\mu_{r2}$, $\rho_1 = \rho_2$), при $h_1 = \Delta$, т.е. на расстоянии, равном эквивалентной глубине проникновения поля в массив ротора, имеем

$$\dot{E}_{hx} = \frac{1}{ch(1+j) + sh(1+j)} = \frac{1}{e^{(1+j)}} = \frac{1}{e(\cos 1 + j \sin 1)} = \frac{1}{e} e^{-j\frac{\pi}{2}}.$$

Получается известный результат [1]. Для массивного ротора на глубине $h_1 = \Delta$ составляющие поля уменьшаются по амплитуде в e раз и приобретают фазовый сдвиг $\frac{\pi}{2}$ по отношению к фазе на поверхности ротора.

Для двухслойного ротора с шихтованным сердечником (в идеальном случае $\mu_{r2} \rightarrow \infty$, $\rho_2 \rightarrow \infty$) имеем

$$\dot{E}_{hx} = \frac{1}{ch\dot{k}_1 h_1}. \quad (4)$$

При $h_1 = \Delta$ (4) принимает вид

$$\dot{E}_{hx} = \frac{2}{e^{(1+j)} + e^{-(1+j)}} = \frac{2}{e(\cos 1 + j \sin 1) + \frac{1}{e}(\cos 1 - j \sin 1)} = 0,772 e^{-j50}.$$

Как видно, поле в данном случае затухает в среднем в два раза слабее, чем в массивном роторе. Уменьшается почти в два раза и фазовый сдвиг $\dot{E}_x$. По такому же закону изменяются и нормальные составляющие напряженности магнитного поля $\dot{H}_{1z}$ или магнитной индукции $\dot{B}_{1z}$ в роторе.

Возрастание напряженности электрического поля в массивном цилиндре приводит к увеличению плотности тока и активной мощности, возрастание напряженности магнитного поля (нормальной составляющей) – к снижению реактивной мощности, передаваемой в ротор. Как показано в [1], в двухслойном роторе с шихтованным внутренним сердечником при толщине массивного цилиндра $h_1=0,9\Delta_1$ активная мощность возрастает в 1,4 раза, а реактивная уменьшается в 1,5 раза. В действительности, поскольку μ_{r2} и ρ_2 сердечника имеют конечные значения, изменение составляющих электромагнитной мощности несколько меньше.

Из выражения (3) можно получить значения составляющих поля при произвольных соотношениях μ и ρ слоёв. В развернутом виде (3) принимает вид

$$\dot{E}_{hx} = \frac{1}{\cos B_1 h_1 (ch A_1 h_1 + \sqrt{d_1} sh A_1 h_1) + j \sin B_1 h_1 (sh A_1 h_1 + \sqrt{d_1} ch A_1 h_1)},$$

а для абсолютного значения этой составляющей соответственно имеем

$$|E_{hx}| = \frac{1}{\sqrt{[\cos B_1 h_1 (ch A_1 h_1 + \sqrt{d_1} sh A_1 h_1)]^2 + [\sin B_1 h_1 (sh A_1 h_1 + \sqrt{d_1} ch A_1 h_1)]^2}}$$

При малых значениях параметра $\frac{\omega \mu_{a1} s}{2\rho}$ (при небольших s) можно принять, что $B_1 = 0$; $A_1 = \frac{\pi}{2}$, поэтому на границе раздела получаем

$$E_{hx} = \frac{1}{ch \frac{\pi}{\tau} h_1 + \sqrt{d_1} sh \frac{\pi}{\tau} h_1}. \quad (5)$$

Последнее выражение учитывает не только влияние электромагнитных параметров массивного цилиндра и сердечника на процесс затухания, но и геометрические соотношения в двигателе (величину полюсного деления, определяемую числом полюсов $2p$). В таблице 1 приведены данные расчетов по формуле (5) при различных значениях d_1 для условного двигателя, имеющего наружный диаметр двухполюсного ротора $D_p = 120$ мм, толщину массивного цилиндра $h_1 = 15$ мм и различное число полюсов.

Таблица 1 – Изменение напряженности поля E_{hx} в зависимости от соотношения параметров слоев ротора при разных значениях d_1 и $2p$

Число полюсов $2p$	Значения напряженности поля $ E_{hx} $ при d_1 , о.е.						
	10	1	10^{-1}	$0,5 \cdot 10^{-2}$	10^{-2}	10^{-4}	0
2	0,546	0,887	0,957	0,967	0,986	0,992	1,0
4	0,361	0,606	0,774	0,804	0,848	0,883	0,887
6	0,257	0,472	0,643	0,676	0,726	0,767	0,772
8	0,191	0,368	0,522	0,554	0,602	0,643	0,648

Из таблицы 1 видно, что при одинаковых условиях затухание тем больше, чем меньше полюсное деление. Характеристики двигателя с двухслойным ротором при увеличении числа полюсов ухудшаются, а при определении оптимальной толщины рабочего цилиндра h_1 ротора по (3) заданная величина E_{hx} должна выбираться в пределах 0,6...0,9 и она тем меньше, чем больше число полюсов. Что же касается параметра d_1 , то его вполне можно ограничить значением $d_1=10^{-2}$, а для относительно быстроходных двигателей ($2p=2$ и 4) – значением $d_1=10^{-1}$.

Расчеты и опыты проведены на асинхронном двигателе (АД) малой мощности ($P_2 = 2,8$ кВт, $n_1 = 3000$ об/мин), имеющего типичные для такой машины параметры: $U_n=220$ В; $I_n=5,8$ А; $\cos \varphi = 0,88$; $\eta = 0,84$; $n_n = 2870$ об/мин; $B_\delta = 0,69$ Тл; $2p=2$; $D_i = 0,104$ м; $L_i = 0,078$ м; $W_1 K_{об1} = 178$; $r_1 = 1,96$ Ом; $x_1 = 2,4$ Ом; $A_{H1} = 2 \cdot 10^4$ А/м; $\delta \cdot k_\delta = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Массивный и двухслойные роторы при различной толщине массивного рабочего цилиндра изготовлены из железо-медных сплавов СМ [6] со значениями ρ и μ_r , близкими к требуемым оптимальным значениям для этого типа двигателей. Кривые намагничивания названных сплавов изображены на рисунке 1. Роторы с толщиной массивного цилиндра $h_1 = 3,0; 4,5; 6,0; 7,5; 9,0$ и 12 мм выполнены из сплава СМ-20, имеющего $\rho = 1,98 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. Из сплава СМ-25, имеющего $\rho = 1,37 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, выполнены массивный ротор с толщиной рабочего цилиндра 20 мм и двухслойные роторы с толщиной цилиндра $h_1 = 10$ мм и различным типом сердечника – шихтованным или массивным. Два ротора выполнены полыми без сердечника. Все роторы не имеют на торцах медных короткозамыкающих колец, что позволило исключить влияние на электромагнитные свойства сплавов высоких температур, связанных со сваркой медных колец.

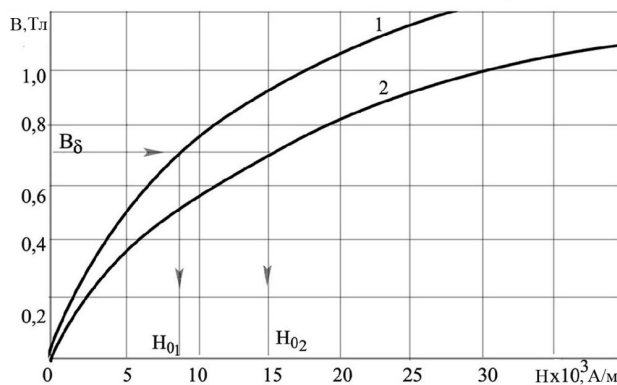


Рисунок 1 – Статические характеристики намагничивания сплавов:

1 – СМ20, $\rho=1,98 \cdot 10^{-7}$ Ом·м; 2 – СМ25, $\rho=1,37 \cdot 10^{-7}$ Ом·м

Рабочие и пусковые характеристики исследуемого двигателя определялись методом непосредственной нагрузки, для чего был создан специальный испытательный стенд с нагрузочной машиной постоянного тока в режиме генератора. Эта же машина использована в качестве приводного двигателя для измерений характеристик АДПР в режиме идеального холостого хода.

Особенность испытанного двигателя заключается в его весьма малой относительной длине и сильно выраженном поперечном краевом эффекте при отсутствии короткозамыкающих колец. Отношение активной длины пакета статора к полюсному делению составляет

$$\lambda = \frac{L_i}{\tau} = \frac{0,078}{0,163} = 0,48,$$

где $\tau = \frac{\pi D_i}{2p} = \frac{3,14 \cdot 0,104}{2} = 0,163 \text{ м}$ – полюсное деление.

Коэффициенты ослабления мощности и поперечного краевого эффекта [4] соответственно равны

$$K_{oc} = 0,2, \quad K_d = \frac{1}{K_{oc}} = 5,0,$$

поэтому не следует ожидать для всех исследуемых вариантов двухслойных роторов удовлетворительных энергетических показателей. Задача расчетов и опытов заключается только в анализе влияния толщины рабочего цилиндра h_1 и типа сердечника ротора на характеристики АД.

Расчетные значения магнитной проницаемости материала ротора в области малых скольжений составляют 30...65. В таблице 2 приведены зависимости параметров массивного и двухслойного (при $h_1 = 7,5 \text{ мм}$) роторов, рассчитанные по соотношениям [1]:

– параметр β , характеризующий совокупность геометрических и электромагнитных величин

$$\beta = \frac{\tau \mu_0}{\pi p} \nu \mu_r s = \frac{0,163 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi \cdot 1,98 \cdot 10^{-7}} 16,3 \cdot \mu_r \cdot s = 5,38 \mu_r \cdot s,$$

где $\nu = 2\tau f = 100\tau = 16,3 \text{ м/с}$ – линейная скорость на периферии ротора;

– сопротивления схемы замещения для массивного и двухслойного роторов

$$\left(r_2''/s \right)_m = \frac{\mu_0 \cdot \omega (W_1 \cdot K_{об1})^2 D_i L_i m}{p^2 \tau} \cdot K_{л\mu_r} \cdot \alpha_1 = 9,35 \mu_r \alpha_1 \text{ Ом};$$

$$x_{2,m} = \frac{\mu_0 \cdot \omega (W_1 \cdot K_{об1})^2 D_i L_i m}{p^2 \tau} \cdot K_{л\mu_r} \cdot \alpha_2 = 9,35 \mu_r \alpha_2 \text{ Ом};$$

$$\left(\frac{r_2'}{s} \right)_o = \frac{\left(r_2''/s \right)_m^2 + \left(x_{2,m}'' \right)^2}{\left(r_2''/s_m \cdot P^* \right)^2 + \left(x_{2,m}'' \cdot Q^* \right)^2} \cdot \left(\frac{r_2''}{s} \right)_m \cdot P^* \text{ Ом};$$

$$\left(x_2 \right)_o = \frac{\left(r_2''/s \right)_m^2 + \left(x_{2,m}'' \right)^2}{\left(r_2''/s_m \cdot P^* \right)^2 + \left(x_{2,m}'' \cdot Q^* \right)^2} \cdot X_{2,m}'' \cdot Q^* \text{ Ом},$$

где α_1, α_2 – коэффициенты, учитывающие эффект вытеснения; Q^* и P^* – относительные мощности двухслойного ротора, которые рассчитаны по рекомендациям [1].

Параметр γ определяется по формуле $\gamma = \pi h_1 / \sqrt{2} \tau$.

Таблица 2 – Расчетные параметры схемы замещения массивного и двухслойного (при $h_1 = 7,5 \text{ мм}$) роторов АД

s	β	γ	P^*	Q^*	$(r_2'/s)_m$ Ом	$(x_2')_m$ Ом	$(r_2'/s)_d$ Ом	$(x_2')_d$ Ом
0,05	9,0	0,1	1,13	0,35	116	69	134	24,8
0,1	17,5	-«-	1,33	0,62	61	52	69	23,5
0,3	48,5	-«-	1,2	1,08	35,2	28,1	31,8	22,8
0,5	77	-«-	1,05	1,05	25,5	20,1	24,2	19,6
0,7	103	-«-	1,04	1,01	20,6	17,7	20,4	17,6
1,0	141	-«-	1,0	1,0	17,2	14,8	17,2	14,8

Из таблицы 2 видно влияние конструкции ротора на параметры вторичной цепи; при малых скольжениях приведенное активное сопротивление двухслойного ротора по сравнению с массивным несколько возрастает, что связано с уменьшением поперечного сечения активного слоя ротора для тока, а индуктивное сопротивление существенно уменьшается, что определяется кардинальным снижением магнитного сопротивления магнитной цепи ротора. В то же время возрастает нормальная составляющая магнитной индукции в рабочем цилиндре и, как следствие, увеличивается активная составляющая тока ротора и электромагнитная мощность. Именно в этом проявляется основной эффект «двухслойности» при достаточно высоких значениях магнитной проницаемости μ_r и сопротивления p материала сердечника ротора. При высоких скольжениях ($s > 0,5$) изменение параметров несущественно; эффект вытеснения поля и тока к поверхности ротора практически устраняет разницу в типе сердечника.

На рисунке 2 показана зависимость толщины цилиндра h_1 двухслойного ротора от скольжения рассматриваемого двигателя, рассчитанная по соотношению (3) для неизменного значения $E_{hx} = 0,89$. Если принять за номинальное скольжение $s = 0,1$, то оптимальной следует признать величину $h_1 = 10 \text{ мм}$.

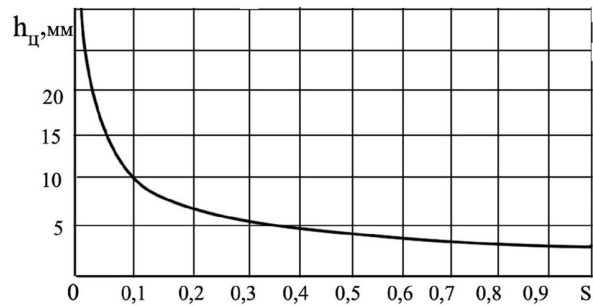


Рисунок 2 – Зависимость толщины рабочего цилиндра двухслойного ротора от скольжения

Расчеты характеристик АДДР при определенных значениях толщины рабочего цилиндра проведены по соотношениям [1]:

$$\text{– поправочный коэффициент } c = 1 + \frac{x_1}{X_m} = 1 + \frac{2,4}{193} = 1,01,$$

где $X_m = \frac{\mu_{00} (w_1 k_{w_1})^2 D_i L_i m}{\pi \delta \cdot p^2}$ – индуктивное сопротивление взаимной индукции;

– сопротивления Г-образной схемы замещения

$$r = r_1 c + \left(r \frac{2}{s} \right)_u c^2, x = x_1 c + (x_2)_u c^2, z = \sqrt{r^2 + x^2};$$

$$\text{– ток рабочей ветви } I_2'' = \frac{U}{z};$$

$$\text{– электромагнитная мощность } P_{эм} = 3 I_2'^2 \cdot r_2 / s \cdot c^2;$$

$$\text{– коэффициент мощности рабочей ветви } \cos \varphi_2 = \frac{r}{z}.$$

Для лучшей наглядности и упрощения сравнения результаты расчета и опыта изображены на рисунке 3 в виде зависимостей I_1 , $\cos \varphi_1$ и $P_{эм}$ от скольжения s .

Отметим прежде всего то, что расчетная и по результатам эксперимента оптимальная толщина массивного цилиндра для области малых скольжений ($s = 0,1 \dots 0,15$) составляет $h_{1,опт} \approx 9,0$ мм, при этом изменение толщины цилиндра в пределах $\pm 1,5$ мм существенно не сказывается на характеристиках двигателя: увеличение толщины цилиндра приводит к некоторому увеличению электромагнитной мощности при большем токе статора, а коэффициент мощности несколько уменьшается; при уменьшении толщины h_1 с уменьшением тока статора и электромагнитной мощности – снижается и $\cos \varphi_1$. Эта величина h_1 весьма близка к ее значению, рассчитанному по формуле (3). Уменьшение коэффициента мощности в области пусковых скольжений объясняется тем, что, с одной стороны, при уменьшении толщины цилиндра уменьшается ток намагничивания, но с другой – вследствие увеличения сопротивления цилиндра уменьшается ток ротора при некотором увеличении его реактивной составляющей, что приводит к снижению $\cos \varphi_1$. При дальнейшем уменьшении толщины массивного цилиндра в области малых скольжений наблюдается все более значительное снижение $\cos \varphi_1$ при меньших значениях тока статора и электромагнитной мощности, что обусловлено увеличением потоков рассеяния в роторе. Увеличение толщины массивного цилиндра свыше 9,0 мм также приводит к некоторому ухудшению номинальных характеристик АДДР. Изменение КПД соответствует общим закономерностям в АД при изменении электромагнитной мощности и нагрузки двигателя.

С точки зрения оценки физических процессов в области больших скольжений весьма информативным является характер изменения тока статора I_1 и коэффициента мощности $\cos \varphi_1$. Обратим внимание на то, что наименьшее значение пускового тока наблюдается при $h_1 = 3,0$ мм, при этом двигатель имеет наибольшее значение $\cos \varphi_1$ при $s = 0,7 \dots 1,0$. Ясно, что решающее значение в данном случае играет активное сопротивление цилиндра и эффект вытеснения, ограничивающий величину индуктивного сопротивления рассеяния.

По мере снижения скольжения соотношение сопротивлений r_2 и x_2 изменяется, а $\cos \varphi_1$ существенно снижается и в номинальном режиме этот вариант ротора имеет самые низкие энергетические показатели. По мере увеличения h_1 коэффициент мощности в области пуска непрерывно снижается, а при малых скольжениях – увеличивается, что обусловлено соответствующим изменением

составляющих сопротивления ротора, на которое накладывается неуклонное возрастание сопротивления магнитной цепи основному магнитному потоку.

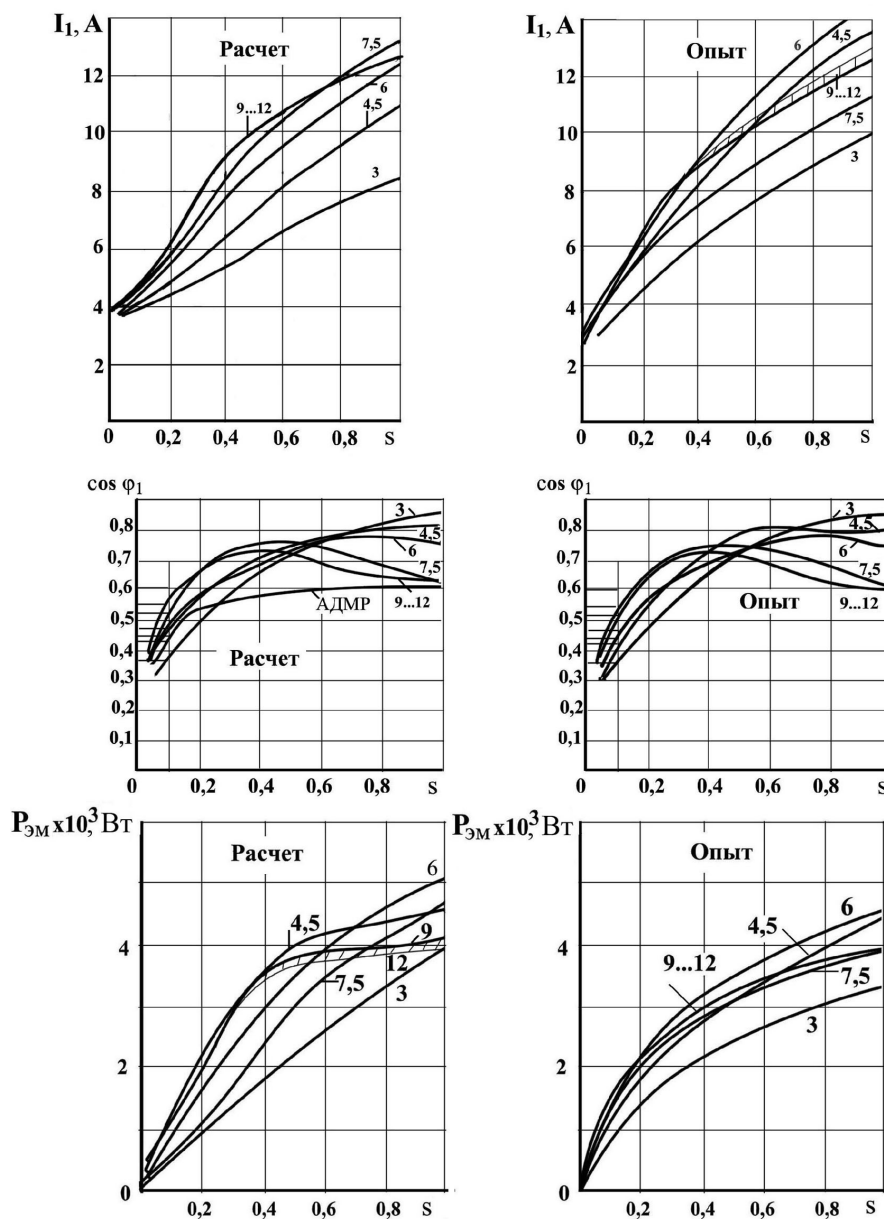


Рисунок 3 – Сравнительные расчетные и опытные характеристики АД малой мощности при различной толщине рабочего массивного цилиндра

В целом оказывается, что опытные данные отличаются от расчетных особенно заметно для коэффициента мощности и электромагнитной мощности в области малых скольжений только для роторов с толщиной цилиндра менее 7,5 мм. Опытные значения $\cos \varphi_1$ при малых скольжениях в среднем на 7...10 % выше расчетных, а опытные значения электромагнитной мощности выше расчетных примерно в 1,5...1,7 раза.

Погрешность в вычислении тока статора для всех роторов при всех скольжениях не превышает 13...15 %.

На рисунке 4 для большей наглядности приведена зависимость параметра $\eta \cdot \cos \varphi_1$ от полезной мощности P_2 , которая показывает изменение характеристик двигателя при различной толщине массивного цилиндра. Из сравнения кривых рисунка 3 хорошо видно, что и по этому обобщенному энергетическому показателю наилучшие результаты дают двухслойные роторы с толщиной цилиндра $h_d=7,5$ и 9,0 мм.

Еще раз подчеркнем, что для данного исследования имеют значение только сравнительные характеристики, а не уровень достигаемых энергетических показателей.

Влияние типа и материала сердечника, а также конструкции ротора на характеристики АД иллюстрируется данными таблицы 3, где все параметры нагрузки приведены для одного скольжения, и кривыми рисунка 5 для диапазона скольжений в пределах $s = 0 \dots 10\%$.

Как видно наилучшие характеристики имеет двухслойный ротор с шихтованным сердечником (строка 5, таблица 3), однако и при массивном сердечнике с повышенным значением ρ (строка 4) достигаются примерно такие же энергетические показатели, как и в роторе с шихтованным сердечником.

Для полого ротора (строки 2 и 3) характеристики хуже, чем в двигателе с массивным ротором (строка 1), причем с уменьшением толщины цилиндра полого ротора возрастают одновременно и ток холостого хода, за счет увеличения, в основном, намагничивающей составляющей, и ток нагрузки при существенном снижении коэффициента мощности, что обусловлено одновременным увеличением активного сопротивления и сопротивления магнитной цепи. КПД также ухудшается как за счет значительного возрастания тока намагничивания, так и за счет скольжения s . Следует отметить, что коэффициенты мощности при массивном и полом роторах в случае одинаковой толщины цилиндра отличаются незначительно.

Таблица 3 – Сравнительные данные двигателя малой мощности с различными роторами (материал ротора СМ25, $\rho = 1,37 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, опыт)

Тип ротора	Холостой ход				Нагрузка				
	U_n , В	I_0 , А	P_{10} , Вт	$\cos \varphi_0$	I_1 , А	P_2 , Вт	η , %	$\cos \varphi$	s , %
Массивный ($h_y = 20$ мм) с массивным сердечником	220	5,64	465	0,217	10,3	1245	57,2	0,59	8,0
Полый, $h_y = 20$ мм	220	7,0	600	0,225	9,0	1080	53,7	0,58	8,0
Полый, $h_y = 10$ мм	220	9,3	760	0,215	10,5	575	41,5	0,38	8,0
Двухслойный $h_1 = 10$ мм с массивным сердечником, $\rho_{серд} \approx \rho_1$	220	5,5	550	0,263	10,1	1440	58,4	0,635	8,0
Двухслойный $h_1 = 10$ мм с шихтованным сердечником	220	5,27	450	0,224	9,1	1510	63,0	0,69	8,0

Последнее обстоятельство можно пояснить из рассмотрения соотношения энергий основного магнитного поля W_0 и магнитного поля рассеяния W_p в теле массивного ротора. Они равны

$$W_0 = \frac{1}{2} \frac{B_\delta^2}{\mu_r \mu_0} \Delta l_y 2\tau = \frac{B_\delta^2}{\mu_r \mu_0} \Delta l_y \tau; \quad (6)$$

$$W_p = \frac{1}{2} H_p^2 \mu_r \mu_0 \Delta l_y 2\tau = H_p^2 \mu_r \mu_0 \Delta l_y \tau. \quad (7)$$

Напряженность магнитного поля согласно закону полного тока равна

$$H_p = \frac{I_2'}{2\tau} \approx \frac{I_1}{2\tau} = \frac{A_1}{2}, \quad (8)$$

где A_1 – линейная нагрузка статора.

Из (6) и (7) с учетом (8) получаем

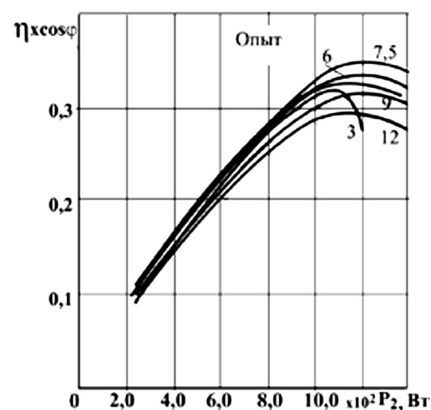


Рисунок 4 – Изменение обобщенного энергетического показателя АД с двухслойным ротором от нагрузки на валу при различной толщине рабочего цилиндра ротора

$$\frac{W_0}{W_p} = \frac{4B_\delta^2}{(A_l \mu_r \mu_0)^2}.$$

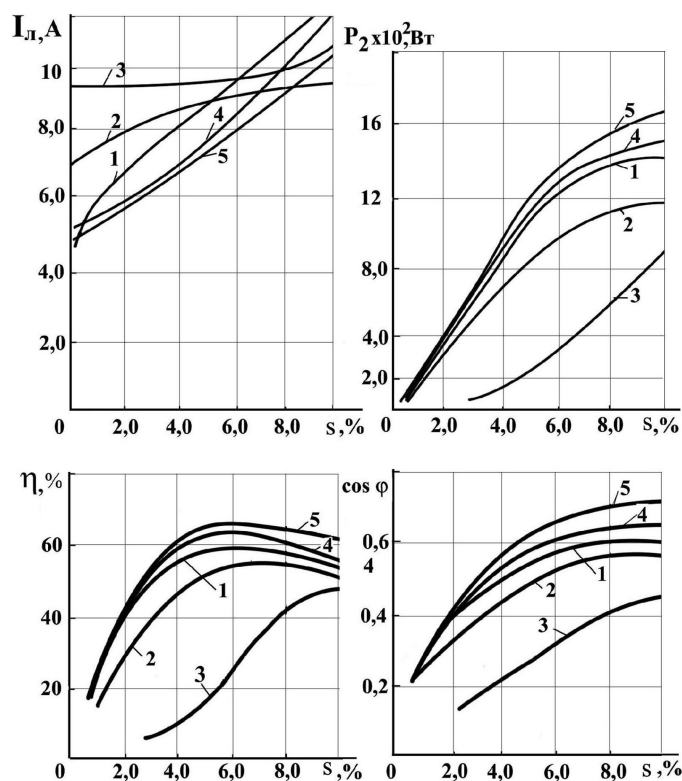


Рисунок 5 – Характеристики АД малой мощности при различной конструкции ротора:

- 1 – массивный, $h_{ц} = 20$ мм с массивным сердечником; 2 – полый, $h_{ц} = 20$ мм;
3 – полый, $h_{ц} = 10$ мм; 4 – двухслойный с массивным сердечником, $h_{ц} = 10$ мм;
5 – двухслойный с шихтованным сердечником, $h_{ц} = 10$ мм

Для рассмотренного двигателя при $B_\delta = 0,69$ Тл, $A_l = 2 \cdot 10^4$ А/м и $\mu_r \approx 56$ имеем

$$\frac{W_0}{W_p} = \frac{4 \cdot 0,69^2}{(2 \cdot 10^4 \cdot 56 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7})^2} = 1,07.$$

Таким образом, $W_0 \approx W_p$ и при переходе от массивного ротора к полую магнитное сопротивление потоку рассеяния и основному магнитному потоку увеличивается примерно в равной степени, поэтому коэффициент мощности двигателя остается неизменным.

ВЫВОДЫ

1. Расчет оптимальной толщины массивного рабочего цилиндра двухслойного ротора h_1 рекомендуется производить не по общей формуле для глубины проникновения магнитного поля

$\Delta_1 = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \mu_0 \mu_r s}}$ в массивное тело, а по соотношению, учитывающему реальные электромагнитные

параметры применяемого материала цилиндра и материала сердечника, а также геометрические размеры ротора, задаваясь при этом определенным затуханием составляющей поля в пределах 0,6...0,9 от ее значения на поверхности ротора и в зависимости от числа полюсов АД.

2. Соотношения параметров рабочего цилиндра и сердечника ротора могут быть ограничены значением $d_1 = \frac{\mu_r \rho_1}{\mu_r \rho_2} \approx 10^{-1} \dots 10^{-2}$, причем более высокие значения d_1 относятся к двигателям с числом полюсов $2p = 2$ и 4.

3. Незначительные отклонения толщины массивного цилиндра h_1 (в пределах $\Delta h_1 = \pm 1,5$ мм) от оптимального значения существенно не сказываются на характеристиках двигателя.

4. Окончательное суждение по выбору толщины цилиндра можно сделать только по результатам анализа рабочих характеристик АД с двухслойным ротором в определенном диапазоне скольжений s вблизи номинального при различных значениях h_l . Это может быть предметом оптимизационного расчета, который должен включать анализ влияния названных выше электромагнитных параметров материалов ротора, магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ , величины самого зазора δ , линейной нагрузки статора A_l , числа витков обмотки статора W_l , а при полном проектировании АДПР возможно и геометрических параметров двигателя – внутреннего диаметра расточки статора D_i и его активной длины L_i .

Библиографический список

1. Могильников В.С. Асинхронные электродвигатели с двухслойным ротором и их применение / В.С. Могильников, А.М. Олейников, А.Н. Стрельников. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 119 с.
2. Вербовой А.П. Исследование глубины проникновения электромагнитной волны в массивный ферромагнитный ротор асинхронного двигателя / А.П. Вербовой, П.Ф. Вербовой, А.М. Съянов // Техническая электродинамика. — 1999. — № 1. — С. 68 – 71.
3. Лопухина Е.М. Оптимизация проектирования асинхронных двигателей с массивными ферромагнитными роторами / Е.М. Лопухина, А.Б. Захаренко // Электричество. — 1999. — № 3. — С. 37 – 42.
4. Олейников А.М. К выбору параметров двухслойного ротора асинхронного двигателя / А.М. Олейников, В.И. Орлов, Ю.П. Повстаной // Техническая электродинамика. — 1986. — № 4. — С. 13 – 18.
5. Олейников А.М. Электромагнитные и геометрические соотношения в многослойных роторах асинхронных двигателей / А.М. Олейников // Электричество. — 1987. — № 3. — С. 25 – 28.
6. Олейников А.М. Практические рекомендации к изготовлению двухслойных роторов из маломagnetных сплавов / А.М. Олейников, А.Н. Стрельников // Электротехника. — 1975. — № 10. — С. 27 – 30.

Поступила в редакцию 15.02.2007 г.