

УДК 621.313.333.+621.31.03+621.314

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ АКСИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

DETERMINATION OF THE MAIN SIZES OF AXIAL ELECTRICAL MACHINES

Кашин Яков Михайлович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электротехники
и электрических машин,
Кубанский государственный
технологический университет

Kashin Yakov Mikhaylovich

Candidate of Technical Sciences,
associate professor,
head of the department of electrical
equipment and electrical machines,
Kuban State University of Technology

Кашин Александр Яковлевич

соискатель,
Краснодарское высшее военное
авиационное училище летчиков

Kashin Alexander Yakovlevich

Applicant,
Krasnodar highest military aviation
college of pilots

Князев Алексей Сергеевич

соискатель, инженер авиационной базы, г. Липецк

Knyazev Alexey Sergeyeovich

Applicant, engineer of aviation base,
Lipetsk

Абзалов Булат Ниязович

курсант,
Краснодарское высшее военное
авиационное училище летчиков

Abzalov Bulat Niyazovich

Cadet,
Krasnodar highest military
aviation college of pilots

Аннотация. Представлена методика расчета основных размеров аксиальных электрических машин. Приведены различные соотношения внутренних и внешних диаметров в зависимости от критерия оптимальности.

Annotation. The method of calculation of the main sizes of axial electrical machines is presented. Various ratios of internal and external diameters depending on criterion of an optimality are given.

Ключевые слова: электрическая машина, электрическая энергия, аксиальная электрическая машина, магнитопровод, напряжение, внутренний диаметр, внешний диаметр.

Keywords: electrical machine, electric energy, axial electrical machine, magnetic conductor, tension, internal diameter, external diameter.

В практике мирового электромашиностроения в последние 40 лет наблюдается расширение области применения аксиальных электрических машин (ЭМ) и рост их производства. Это обусловлено рядом преимуществ таких машин по сравнению с обычными машинами радиальной (цилиндрической) конструкции, имеющими радиальный воздушный зазор: меньшими размерами; большей жесткостью конструкции; благоприятными условиями теплоотдачи, охлаждения и вентиляции; существенным упрощением обмоточных работ благодаря открытой зубцовой зоне; практически безотходным использованием магнитных материалов; удобством сочленения с механизмом и приводом; сравнительной простотой эксплуатации, и ремонта и т.д. [1]. К таким электрическим машинам относятся трансформаторы [2, 3, 4], индукционные регуляторы [4, 5, 6], двигатели-насосы [7, 8], генераторы [9, 10, 11], двигатели-генераторы [12], магнитотурботроны [20] и пр.

Проектирование ЭМ аксиальной конструкции имеет ряд особенностей. Общей единой методики расчета, подходящей для всех аксиальных электрических машин, не существует.

Для радиальных ЭМ одним из важных этапов проектирования является определение соотношения расчетной длины l ; активной зоны магнитопровода к наружному

диаметру ротора D , т.е. величины $\frac{l_i}{D}$. Для авиационных генераторов длина l_i практически равна геометрической длине l магнитопровода. Определим аналогичное соотношение для эквивалентных ЭМ [13, 14].

На примере плоской рамки, вращающейся в магнитном поле (рис. 1) рассмотрим закон электромагнитной индукции.

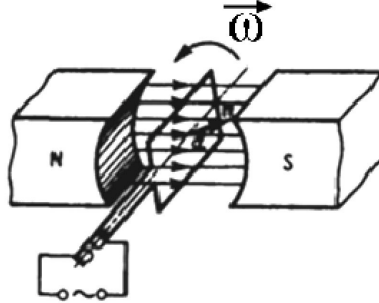


Рисунок 1 – Вращение рамки в однородном магнитном поле

Пусть рамка вращается в однородном магнитном поле ($B = \text{const}$) равномерно с угловой скоростью $\omega = \text{const}$. Магнитный поток, сцепленный с рамкой площадью S , в любой момент времени t , равен:

$$\Phi = BnS = BS\cos(\alpha), \quad (1)$$

где $\alpha = \omega t$ – угол поворота рамки в момент времени t . При вращении рамки в ней будет возникать переменная ЭДС индукции:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin(\alpha). \quad (2)$$

Зависимость ЭДС от линейной (окружной) скорости движения проводника в однородном магнитном поле выражается формулой:

$$e = vBl \sin(\alpha). \quad (3)$$

Известно, что линейная скорость точки, движущейся по окружности, равна:

$$v = \omega R, \quad (4)$$

где R – радиус окружности, по которой движется проводник.

Возьмём прямой проводник, состоящий из трёх участков, каждый из которых имеет бесконечно малую длину l , и будем вращать его в однородном магнитном поле по окружности радиусом R_0 .

Если проводник расположен параллельно оси вращения, то ЭДС в проводнике будет равна:

$$e = e_1 + e_2 + e_3 = v_0 Bl \sin(\alpha) + vBl \sin(\alpha) + vBl \sin(\alpha) = 3vBl \sin(\alpha) = 3\omega R_0 Bl \sin(\alpha), \quad (5)$$

где v_0 – линейная скорость движения проводника по окружности радиусом R_0 .

Если наклонить проводник относительно его центра к оси вращения, то средний участок будет находиться от оси вращения на том же расстоянии R_0 , участок, расположенный ближе к оси вращения, будет находиться от неё на расстоянии $R_0 - \Delta R$, участок, расположенный дальше от оси вращения, будет находиться от неё на расстоянии $R_0 + \Delta R$. В этом случае ЭДС в проводнике будет равна:

$$\begin{aligned}
 e &= e_1 + e_2 + e_3 = v_1 B l \sin(\alpha) + v_0 B l \sin(\alpha) + v_2 B l \sin(\alpha) = \\
 &= \omega(R_0 - \Delta R) B l \sin(\alpha) + \omega R_0 B l \sin(\alpha) + \omega(R_0 + \Delta R) B l \sin(\alpha) = \\
 &= \omega R_0 B l \sin(\alpha) - \omega \Delta R B l \sin(\alpha) + \omega R_0 B l \sin(\alpha) + \omega R_0 B l \sin(\alpha) + \omega \Delta R B l \sin(\alpha) = \\
 &= 3\omega R_0 B l \sin(\alpha).
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Как видно, результаты выражений (5) и (6) совпадают. Получается, что если развернуть проводник относительно его центра под некоторым углом к оси вращения и вращать его с той же угловой скоростью в том же магнитном поле, то ЭДС, наводимая в проводнике, не изменится. При этом расстояние от оси вращения до центра проводника не должно изменяться при наклоне проводника относительно оси вращения.

Если же рассмотреть не отдельный проводник, а всю ЭМ, то условия электро-механического преобразования энергии не изменятся, если «разворот» всех магнитопроводов и проводников будет выполнен относительно окружности, проходящей через середину воздушного зазора. Если зафиксировать величину активной длины, то радиус этой окружности будет определять линейную скорость каждой точки на роторе, независимо от конструкции ЭМ – будь она радиальной, аксиальной или конической. При этом «разворот» относительно указанной окружности не приведет к изменению мощности ЭМ. Эта окружность является своего рода невидимой осью, относительно которой формируется вся ЭМ с её размерами, и параметрами под некоторым углом наклона к оси вращения ротора. Множество соответствующих параметров у эквивалентных ЭМ являются одинаковыми. Поэтому указанная окружность является своего рода «эталоном», относительно которого можно построить бесконечное количество эквивалентных ЭМ одинаковой мощности, но разной формы.

Рассмотрим ЭМ с коническим ротором (рис. 2). Проведем прямую, проходящую через середину воздушного зазора и пересекающую ось вращения ротора под некоторым углом α . Назовем угол α *углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора ЭМ*. Тогда при $\alpha = 0^\circ$ получится радиальная ЭМ, а при $\alpha = 90^\circ$ – аксиальная. То есть все радиальные и аксиальные ЭМ можно рассматривать как частный случай ЭМ с коническим ротором.

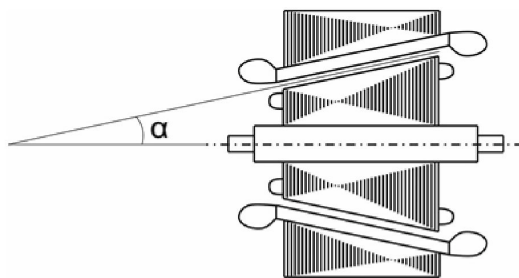


Рисунок 2 – Электрическая машина с коническим ротором

На этапе проектирования ЭМ с заданными характеристиками существует бесконечное множество вариантов их конструктивного исполнения. При переходе от одного варианта конструктивного исполнения ЭМ к другому форма и размеры магнитопроводов статора и ротора должны изменяться (преобразовываться) в соответствии с определенными закономерностями, чтобы выходные характеристики оставались без изменений. Процесс изменения формы и размеров магнитопроводов статора и ротора при проектировании ЭМ назовём *преобразованием ЭМ*.

Процесс изменения формы тела магнитопровода назовём *геометрическим преобразованием* магнитопровода, при этом выделим три его вида: *нормальное, искажённое и произвольное*.

Нормальным назовём геометрическое преобразование без изменения углов между всеми соприкасающимися поверхностями магнитопровода ЭМ.

Искажённым назовём геометрическое преобразование без изменения углов между противоположными поверхностями магнитопровода ЭМ.

Произвольным назовём геометрическое преобразование, при котором как минимум для одной пары противоположных поверхностей магнитопровода ЭМ изменяется угол между противоположными поверхностями.

Для определения параметров проектируемого генератора будем использовать только нормальное геометрическое преобразование. Для любой ЭМ с известными параметрами, у которой значение угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора равно α_1 , можно определить такую ЭМ со значением угла наклона воздушного зазора α_2 , у которой результат электромагнитного преобразования энергии будет идентичным, или эквивалентным.

Тогда ЭМ с углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора α_1 и известными параметрами назовём *исходной*, а ЭМ с углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора α_2 назовём *эквивалентной*.

Под эквивалентностью результатов электромагнитного преобразования энергии будем понимать получение одинаковых выходных параметров при одинаковых входных, причём эквивалентность результатов должна соблюдаться при любой частоте вращения ротора и любом значении тока, подаваемого в соответствующие обмотки исходной и эквивалентной ЭМ.

Нахождение эквивалентной ЭМ для исходной назовём *эквивалентным преобразованием ЭМ*. Суть эквивалентного преобразования ЭМ состоит в том, чтобы для ЭМ с известными характеристиками и имеющей один угол наклона воздушного зазора (α_1), определить геометрические размеры, форму и положение в пространстве магнитопроводов статора и ротора ЭМ, имеющей другой угол наклона воздушного зазора (α_2), при этом результат электромагнитного преобразования энергии в которой будет идентичным, или эквивалентным.

Процесс геометрического преобразования рассматривается индивидуально для каждого магнитопровода ЭМ. При выполнении преобразования наличие пазов не учитывается, то есть весь процесс геометрического преобразования касается только тела, ограниченного активной, тыльной и боковыми поверхностями магнитопровода. После преобразования, выполненного по определённым правилам, на магнитопроводе эквивалентной ЭМ пазы «вырезаются» заново, причём их количество и параметры – ширина, высота, форма и угол скоса должны быть точно такими же, как и в соответствующем магнитопроводе исходной ЭМ [13].

Рассмотрим сечение одного из магнитопроводов ЭМ с коническим ротором (рис. 3). Построим плоскость, перпендикулярную оси вращения ротора и проходящую через точку O , которая располагается в середине сечения воздушного зазора. В этой плоскости проведем окружность, имеющую центр на оси вращения ротора и проходящую через точку O . Построенную окружность назовём «*эталонной*». Для исходной ЭМ эквивалентное преобразование выполняется относительно эталонной окружности, которая сохраняет своё положение и размер при любом значении α , поэтому радиус эталонной окружности R_0 является постоянной величиной для рассматриваемой ЭМ, т.е. $R_0 = \text{const}$.

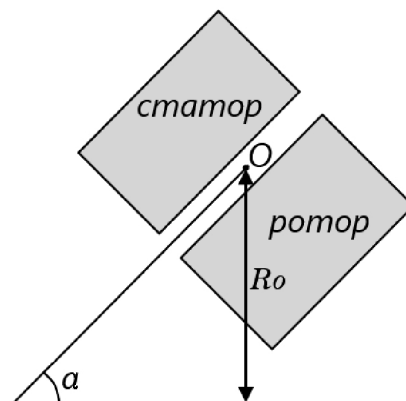


Рисунок 3 – Сечение магнитопроводов ЭМ с коническим ротором

На рисунке 4 представлены эквивалентные ЭМ с разным углом наклона воздушного зазора. Светлыми линиями выделена эталонная окружность, радиус которой для всех представленных магнитопроводов одинаков.

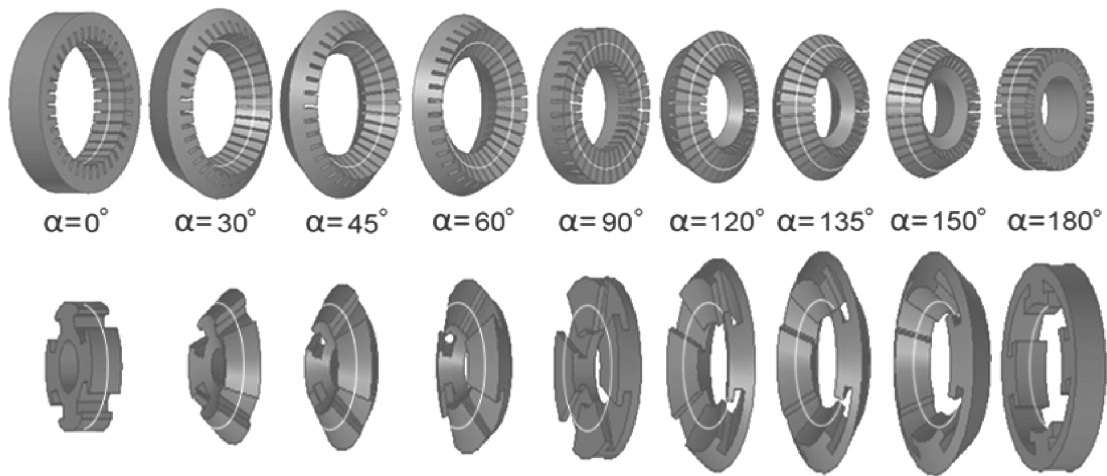


Рисунок 4 – Изменение формы эквивалентных синхронных ЭМ при изменении угла наклона воздушного зазора в диапазоне от 0° до 180°

Пренебрегая величиной воздушного зазора можно утверждать, что в соотношении $\frac{l_i}{D}$ для радиальных ЭМ диаметр D определяет расстояние от оси вращения ротора до середины воздушного зазора. Тогда при эквивалентных преобразованиях этот диаметр будет являться диаметром эталонной окружности, относительно которой будет происходить эквивалентное преобразование исходной ЭМ, т.е.

$$D = 2R_0. \quad (7)$$

Из опыта проектирования радиальных ЭМ известно, что важное значение имеют величины λ_i и λ'_i :

$$\lambda_i = \frac{l_i}{D} = \frac{l_i}{2R_0}; \quad (8)$$

$$\lambda'_i = \frac{l_i}{\tau}, \quad (9)$$

где τ – полюсное деление.

Учитывая, что при эквивалентных преобразованиях значения длины активной зоны l_i магнитопроводов и радиус эталонной окружности R_0 не меняются, то для эквивалентных ЭМ будут справедливы следующее равенства:

$$\lambda_i = \text{const}; \quad (10)$$

$$\lambda'_i = \text{const}. \quad (11)$$

Это означает, что независимо от величины угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора для всех ЭМ, эквивалентных исходным радиальным, будут справедливы зависимости величины λ_i от числа пар полюсов p , полученные для авиационных радиальных ЭМ на основе опыта их эксплуатации (рис. 5) [15, с. 32].

Из опыта проектирования ЭМ общего назначения известно, что исходя из величины λ_i проектируемая ЭМ может быть «короткой» ($\lambda_i < 0,4$), «длинной» ($\lambda_i > 1,4$) и «средней». Необходимо знать достоинства «длинных» и «коротких» ЭМ, а именно, в

«длинных» ЭМ использование активных материалов более эффективно, т.е. при одинаковых частоте вращения и мощности «длинные» ЭМ требуют при изготовлении меньше активных материалов, чем «короткие». У длинных ЭМ лучше динамические свойства (меньше время разгона и торможения), но они хуже охлаждаются (а следовательно, имеют более высокие рабочие температуры), у них больше прогиб вала [16].

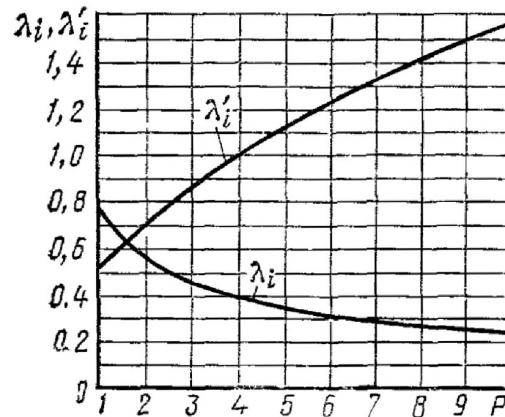


Рисунок 5 – Оптимальное отношение расчётной длины магнитопровода якоря к диаметру эталонной окружности или к полюсному делению в радиальных авиационных ЭМ

Величина λ'_i одинакова для всех эквивалентных ЭМ при условии, что величина полюсного деления рассматривается на среднем диаметре D_{cp} эквивалентной ЭМ, как показано на рисунке 6.

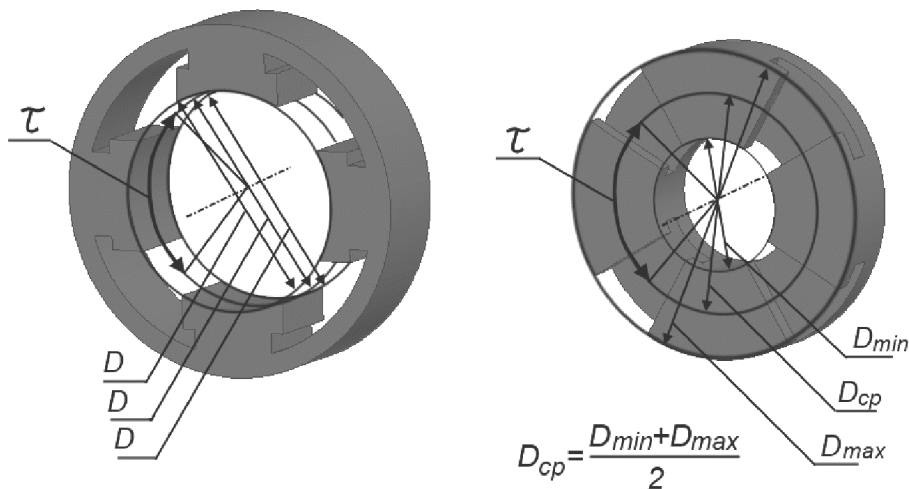


Рисунок 6 – К определению полюсного деления у эквивалентных ЭМ

Представленные на рис. 5 графики дают ориентировочные значения при выборе величин λ_i и λ'_i . Оптимальная величина λ_i при выбранном числе пар полюсов зависит так же от формы полюсов (круглая, сегментная, призматическая), мощности ЭМ, номинальной частоты вращения генератора, при увеличении диаметра эталонной окружности она снижается. Это нарушение законов геометрического подобия вызывается необходимостью учёта условий охлаждения и тем, что оптимум отношения λ_i уменьшается с увеличением мощности. Для генераторов автономных систем электроснабжения нет четких закономерностей при выборе отношения λ_i . Практика проектирования радиальных ЭМ показывает, что отклонение в пределах $\pm 20\%$ от оптимальной величины не вызывает заметного ухудшения характеристик ЭМ.

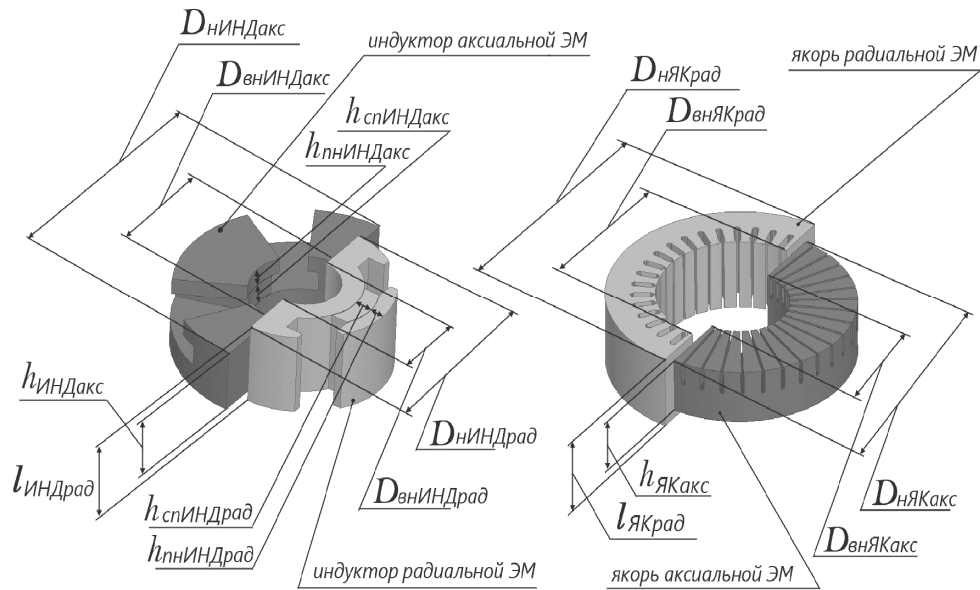


Рисунок 7 – К определению основных размеров эквивалентных аксиальных и радиальных ЭМ

При преобразовании исходной радиальной в эквивалентную аксиальную ЭМ необходимо учитывать соотношение внутреннего и наружного диаметров получаемой аксиальной ЭМ (рис. 7). В [17] приведена методика расчёта аксиальных ЭМ с постоянными магнитами различной формы. В [18] приведены подробные расчёты и получены значения оптимального соотношения внутреннего и наружного диаметров магнитопроводов аксиальных ЭМ, исходя из показателей электромагнитной мощности.

Для постоянных магнитов призматической формы (рис. 8, а)

$$D_{ВН} = 0,667 \cdot D_{Н} \quad (12)$$

Для постоянных магнитов сегментной формы (рис. 8, б):

$$D_{ВН} = 0,578 \cdot D_{Н} \quad (13)$$

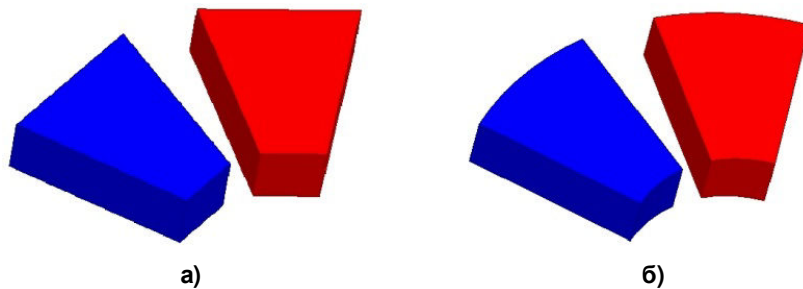


Рисунок 8 – Постоянные магниты призматической (а) и сегментной (б) формы

В [1, с. 64] показано, что оптимальное соотношение внутреннего и наружного диаметров аксиальных ЭМ, исходя из показателей электромагнитной мощности, находится по соотношению:

$$D_{ВН} = 0,33 \cdot D_{Н} \quad (14)$$

Если же кроме показателя электромагнитной мощности есть показатель экономической эффективности, то согласно [1, с. 66] оптимальное соотношение внутреннего и наружного диаметров аксиальных ЭМ находится в пределах:

$$0,5 < \frac{D_{ВН}}{D_{Н}} < 0,625 \quad (15)$$

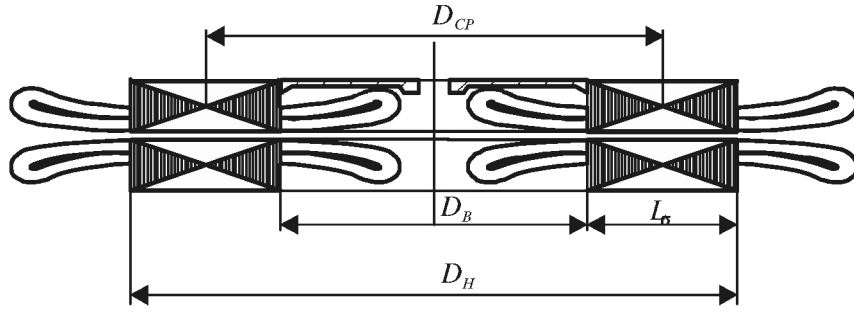


Рисунок 9 – Схема активной части аксиальной электрической машины

На рисунке 9 показана активная часть аксиальной ЭМ [19, с.56]. Из рисунка 9 видно, что расчётная длина активной зоны l_i магнитопровода аксиальной ЭМ равна:

$$l_i = \frac{D_H - D_{BH}}{2}. \quad (16)$$

Средний диаметр эквивалентной аксиальной ЭМ равен диаметру эталонной окружности (рис. 8):

$$D_{CP} = D_{BH} + l_i = D_{BH} + \frac{D_H - D_{BH}}{2} = \frac{D_H + D_{BH}}{2} = 2R_0. \quad (17)$$

Тогда выражение (16) для аксиальных ЭМ будет иметь вид:

$$\lambda_i = \frac{l_i}{2R_0} = \frac{D_H - D_{BH}}{D_H + D_{BH}}. \quad (18)$$

Выражение (18) для аксиальных ЭМ является аналогом отношения $\frac{l_i}{D}$, известного из опыта проектирования радиальных ЭМ.

Выражения (12–15) можно обобщить, утверждая, что внутренний и наружный диаметр аксиальной ЭМ связаны следующим соотношением:

$$D_{BH} = k_{Дакс} \cdot D_H, \quad (19)$$

где $k_{Дакс}$ – коэффициент пропорциональности наружного и внутреннего диаметров, причём $k_{Дакс} < 1$.

Тогда выражение (18) можно преобразовать к следующему виду:

$$\lambda_i = \frac{1 - k_{Дакс}}{1 + k_{Дакс}}. \quad (20)$$

Произведем обратное вычисление – найдем величину λ_i для оптимальных значений $k_{Дакс}$.

Для выражения (12):

при $k_{Дакс} = 0,667$ получим $\lambda_i = 0,2$. (21)

Для выражения (13):

при $k_{Дакс} = 0,578$ получим $\lambda_i = 0,27$. (22)

Для выражения (14):

при $k_{Дакс} = 0,33$ получим $\lambda_i = 0,5$. (23)

Для выражения (15):

при $0,5 < k_{Дакс} < 0,625$ получим $0,23 < \lambda_i < 0,33$. (24)

Исходя из выражений (21–24) и данных, представленных на рисунке 5, следует, что при соотношении наружного и внутреннего диаметров оптимальном для генераторов аксиального исполнения, величина λ_i будет находиться на границе или за пределами области оптимальных значений для генераторов радиального исполнения.

Поэтому график зависимости оптимальных значений $\lambda_i(p)$ для аксиальных ЭМ должен располагаться ниже графика, представленного для радиальных ЭМ, как показано на рисунке 10. График, изображенный на рис. 10 пунктирной линией приведен только исходя из выражений (12–15) и не подкреплён практическими данными, поэтому не гарантирует получение наиболее оптимальных результатов, но с учётом того, что, как было сказано выше, отклонение в пределах $\pm 20\%$ от оптимальной величины не вызывает заметного ухудшения характеристик ЭМ, он может быть использован при проектировании аксиальных ЭМ для предварительных расчётов.

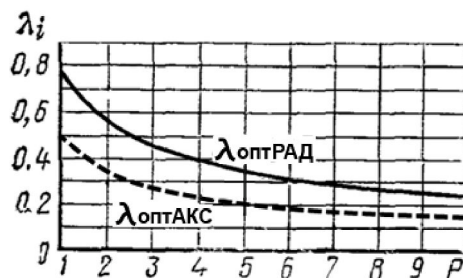


Рисунок 10 – Оптимальное отношение расчётной длины активной зоны магнитопровода к диаметру эталонной окружности для радиальных и аксиальных ЭМ

Исходя из данных, представленных на рис. 10, следует, что для каждого значения угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора существует своя область оптимальных значений λ_i . При эквивалентных преобразованиях ЭМ необходимо учитывать этот факт и выбирать угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора для эквивалентной ЭМ таким образом, чтобы параметры проектируемой ЭМ оставались в области значений $\lambda_i(p)$, оптимальных для выбранного угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора. Это, в свою очередь, означает, что существует предельный угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, превышение которого приведет к выходу величины отношения основных размеров проектируемой эквивалентной ЭМ за пределы зоны оптимальных значений, что крайне нежелательно.

Кроме того, из зависимостей, представленных на рисунке 10, следует, что для одинакового числа пар полюсов при фиксированном диаметре эталонной окружности оптимальное значение λ_i в аксиальных ЭМ достигается при меньшей расчётной длине l_i магнитопровода якоря, чем в радиальных. Это является отличительной особенностью ЭМ аксиального конструктивного исполнения, которую следует учитывать на начальном этапе проектирования ЭМ при выборе её конструктивного исполнения.

Из выражения (14) определим зависимость $k_{\text{ДаКС}}(\lambda_i)$:

$$k_{\text{ДаКС}} = \frac{1 - \lambda_i}{1 + \lambda_i} . \quad (25)$$

На рисунке 11 представлен график зависимости $k_{\text{ДаКС}}(p)$ исходя из данных, представленных на рисунке 7.

Из данных, представленных на рисунке 11 следует, что для сохранения оптимальности соотношения основных размеров для аксиальных ЭМ с увеличением числа пар полюсов p внутренний диаметр $D_{\text{ВН}}$ должен приближаться к наружному $D_{\text{Н}}$, при этом длина активной зоны l_i магнитопровода будет уменьшаться.

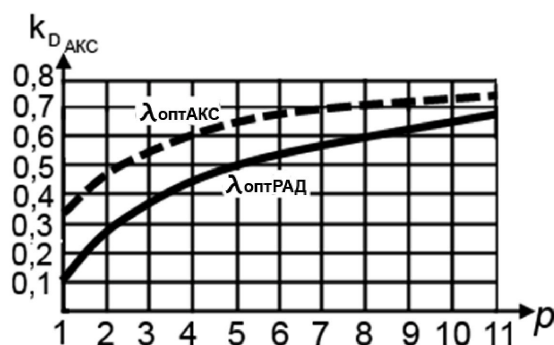


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента наружного диаметра аксиальных ЭМ от числа пар полюсов

Таким образом, каждое из выражений (12–15) является наиболее оптимальным только при определенных условиях (при определенном числе пар полюсов, форме полюсов, мощности ЭМ, номинальной частоте вращения и др.), а с другой стороны, ни одно из них не является наиболее оптимальным в общем случае, т.е. нет универсального оптимального соотношения внутреннего и наружного диаметров магнитопровода для аксиальных ЭМ.

Введение термина «эталонной окружности» позволило установить аналогию между соотношениями основных размеров радиальных и аксиальных ЭМ. Исследования зависимости отношения расчетной длины активной зоны магнитопровода к диаметру эталонной окружности от числа пар полюсов для аксиальных ЭМ, представленной на рисунке 10 пунктирной линией, и зависимости коэффициента наружного диаметра аксиальных ЭМ от числа пар полюсов, представленной на рисунке 11 пунктирной линией, в настоящее время являются актуальными и требуют уточнения на основе опытных данных.

Литература:

1. Гайтова Т.Б. Нетрадиционные электротехнические комплексы (теория, расчет и конструкции) / Т.Б. Гайтова, Я.М. Кашин. – Краснодар : КВАИ, 2004. – 403 с.
2. Многофазный трансформатор-фазорегулятор // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Сингаевский Н.А., Жуков Ф.И., Исик С.Н. – Патент на изобретение RUS № 2137586. 06.04.1988 г.
3. Многофазный трансформатор // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б. – Патент на изобретение RUS № 2249871. 03.03.2003 г.
4. Гайтова Т.Б. Перспективные конструкции аксиальных многофазных трансформаторов и регуляторов с вращающимся магнитным полем / Т.Б. Гайтова, Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2005. – № 3. – С. 44–47.
5. Аксиальный индукционный регулятор // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Сингаевский Н.А., Савченко А.Ю., Шарифуллин С.Р. – Патент на изобретение RUS № 2168785. 06.04.1998 г.
6. Сдвоенный аксиальный индукционный регулятор // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Сингаевский Н.А., Самородов А.В., Ариди Ф.М., Майоров А.П. – Патент на изобретение RUS № 2170971. 31.03.1999 г.
7. Аксиальный центробежный двигатель-насос // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Рябухин М.И., Гайтова Т.Б. – Патент на изобретение RUS № 2284426. 20.04.2005 г.
8. Аксиальный двигатель-насос // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Рябухин М.И., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я. – Патент на изобретение RUS № 2340974. 26.10.2007 г.
9. Аксиальная двухходовая бесконтактная электрическая машина-генератор // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В., Голощанов А.В. – Патент на изобретение RUS № 2450411. Оpubл. 12.01.2011 г. Бюл. № 13.
10. Кашин Я.М. Обоснование и разработка перспективных конструкций генераторных установок для систем автономного электроснабжения / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Д.В. Пауков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 46–53.
11. Аксиальный двухходовый бесконтактный ветро-солнечный генератор // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Кашин А.Я., Копелевич Л.Е., Самородов А.В. – Патент на изобретение RUS № 2561504. 16.06.2014.
12. Аксиальный бесконтактный двигатель-генератор // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Князев А.С., Кашин А.Я., Пудов С.А. – Патент на изобретение RUS № 2529210. 03.10.2013.

13. Князев А.С. Эквивалентное преобразование электрических машин с коническим ротором / А.С. Князев // Технические и технологические системы : Материалы седьмой международной научной конференции «ТТС-15». – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2015. – С. 127–132.
14. Кашин А.Я. Радиальные и аксиальные электрические машины, как частный случай электрических машин с коническим ротором. Основные определения / А.Я. Кашин, А.С. Князев // Технические и технологические системы : Материалы седьмой международной научной конференции «ТТС-15». – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2015. – С. 121–127.
15. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин / В.А. Балагуров. – М. : Высшая школа, 1982.
16. Кацман М.М. Расчёт и конструирование электрических машин / М.М. Кацман. – М. : Энергоатомиздат, 1984.
17. Ганджа С.А. Методика инженерного расчёта вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком / С.А. Ганджа, А.С. Мартыанов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2013. – Т. 13. – № 2.
18. Ганджа С.А. Вентильные электрические машины с аксиальным магнитным потоком. Анализ, синтез, внедрение в производство : дисс. ... д-ра техн. наук. – Челябинск, 2011.
19. Методика расчета аксиальных многофазных трансформаторов / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Т.Б. Гайтова, С.В. Божко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2001. – № 1. – С. 54–58.
20. Гайтов Б.Х. Устройство и математическая модель аксиального магнитотурботрона для лечения онкозаболеваний / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2014. – № 1. – С. 95–102.

References:

1. Gaytova T.B. Nonconventional electrotechnical complexes (theory, calculation and designs) / T.B. Gaytova, Ya.M. Kashin. – Krasnodar : KVAI, 2004. – 403 p.
2. Multiphase transformer phase-shifter / Gaytov B.H., Kashin Ya.M., Singayevsky N.A., Zhukov F.I., Isik S.N. – Patent for the invention of RUS № 2137586. 4/6/1988.
3. Multiphase transformer // Gaytov B.H., Kashin Ya.M., Gaytova T.B. – Patent for the invention of RUS № 2249871. 3/3/2003.
4. Gaytova T.B. Perspective designs of axial multiphase transformers and regulators with the rotating magnetic field / T.B. Gaytova, B.H. Gaytov, Ya.M. Kashin // News of higher educational institutions. Electromechanics. – 2005. – № 3. P. 44–47.
5. Axial induction regulator // Gaytov B.H., Kashin Ya.M., Singayevsky N.A., Savchenko A.Yu., Sharifullin S.R. – Patent for the invention of RUS № 2168785. 4/6/1998.
6. Dual axial induction regulator // Gaytov B.H., Kashin Ya.M., Singayevsky N.A., Samorodov A.V., Aridi F.M., Majorov A.P. – Patent for the invention of RUS № 2170971. 3/31/1999.
7. Axial centrifugal engine pump // Gaytov B.H., Kashin Ya.M., Ryabukhin M.I., Gaytova T.B. – Patent for the invention of RUS № 2284426. 4/20/2005.
8. Axial engine pump // Gaytov B.H., Kashin Ya.M., Ryabukhin M.I., Gaytova T.B., Kashin A.Ya. – Patent for the invention of RUS № 2340974. 10/26/2007.
9. Axial dvukhvkhodovy contactless electric machine generator // Gaytov B.H., Kashin Ya.M., Gaytova T.B., Kashin A.Ya., Paukov D.V., Goloshchapov A.V. – Patent for the invention of RUS № 2450411. Opubl. 1/12/2011 Bulletin № 13.
10. Kashin Ya.M. Justification and development of perspective designs of generating installations for systems of autonomous power supply / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, D.V. Paukov // News of higher educational institutions. Electromechanics. – 2012. – № 1. – P. 46–53.
11. Axial dvukhvkhodovy contactless vetro-solar generator // Gaytov B.H., Kashin Ya.M., Kashin A.Ya., Kopelevich L.E., Samorodov A.V. – Patent for the invention of RUS № 2561504. 6/16/2014.
12. Axial contactless engine generator // Gaytov B.H., Kashin Ya.M., Knyazev A.S., Kashin A.Ya., Podov S.A. – Patent for the invention of RUS № 2529210. 10/3/2013.
13. Knyazev A.S. Equivalent transformation of electrical machines with a conic rotor / A.S. Knyazev // Technical and technological systems: Materials of the seventh international scientific TTS-15 conference. – Krasnodar : Publishing house – South, 2015. – P. 127–132.
14. Kashin A.Ya. Radial and axial electrical machines as a special case of electrical machines with a conic rotor. Main definitions / A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev // Technical and technological systems: Materials of the seventh international scientific TTS-15 conference. – Krasnodar : Publishing house – South, 2015. – P. 121–127.

15. Balagurov V.A. Design of special electrical machines / V.A. Balagurov. – M. : The higher school, 1982.
16. Katsman M.M. Calculation and designing of electrical machines / M.M. Katsman. – M. : Energoatomizdat, 1984.
17. Gandzha S.A. Metodik's of engineering calculation of valve electrical machines with an axial magnetic flux / S.A. Gandzha, A.S. Martyanov // Bulletin of the Southern Ural state university. – 2013. – V. 13. – № 2.
18. Gandzha S.A. Valve electrical machines with an axial magnetic flux. The analysis, synthesis, introduction in production : yew... Dr. Sci. Tech. – Chelyabinsk, 2011.
19. Method of calculation of axial multiphase transformers / B.H. Gaytov, Ya.M. Kashin, T.B. Gaytova, S.V. Bozhko // News of higher educational institutions. Electromecanics. – 2001. – № 1. – P. 54–58.
20. Gaytov B.H. The device and mathematical model of an axial magnitoturbotron for treatment of oncological diseases / B.H. Gaytov, Ya.M. Kashin, L.E. Kopelevich // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). –2014. – № 1. – P. 95–102.