УДК 621.313.333.001.24

М. А. Ваганов, Д. С. Пантюхов, И. А. Пименова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И РАСЧЕТ ЕГО ОБМОТКИ СТАТОРА

Рассматривается алгоритм определения основных размеров асинхронного двигателя, обеспечивающий наилучшее использование активных материалов этого двигателя при максимальном значении его энергетического КПД и порядок расчета обмотки статора.

Оптимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, относительное значение диаметра расточки статора, наружный диаметр пакета стали статора, длина пакета стали статора, число витков фазы обмотки статора

К основным размерам асинхронного двигателя при его проектировании на базе машинной постоянной традиционно относят диаметр расточки статора D_1 и длину пакета стали статора l_1. На этапе синтеза машины при таком подходе активная зона статора, а именно пакет стали статора и его обмотка, учитывается лишь косвенно через линейную нагрузку обмотки статора A_1 и магнитную индукцию в воздушном зазоре B_δ. В каждом конкретном случае значения этих величин выбираются по кривым или из таблиц с учетом дополнительных условий задания, что вносит некоторую неопределенность и практически полностью исключает возможность получения двигателя, оптимального по какому-либо показателю или критерию, без предварительного просчета нескольких вариантов, формирование исходных данных которых требует определенного практического опыта.

В [1], [2] теоретически доказана и практически показана принципиальная возможность проектирования за один вариант асинхронного двигателя с максимальным использованием его активных материалов относительно электромагнитного момента при условии обеспечения одновременно максимума энергетического КПД. Полная математическая модель процесса такого проектирования, представленная в [1]–[3], содержит в качестве неизвестных две величины: наружный диаметр пакета стали статора $D_{1н}$ и длину этого пакета l_1.

При проектировании серии, как правило, на одном диаметре расточки статора выбираются 2–3 длины пакета стали статора, т. е. их отношение можно считать известным, чем и обеспечивается однозначность определения указанных размеров.

Предлагаемая в [1] математическая модель, записанная для электромагнитного момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, имеет следующий вид:

$$M_{\text{эм}} = k_F F_{\text{м}*} F_{\text{н}} D_{1\text{н}}^5, \tag{1}$$

$$k_F = \frac{\pi f_1 k_{\text{об}1} \sqrt{\gamma_1 \gamma_2 k_{\text{г}1} k_{\text{г}2}}}{4\sqrt{k_{\vartheta 1} k_{\vartheta 2}}}, \tag{2}$$

$$F_{\text{м}*} = \frac{1}{p} \frac{D_{1*}^4 l_{1*}^2 B_\delta^2 \sqrt{k_{\text{п}1} k_{\text{п}2}}}{\sqrt{\left(k_{\text{л}1} l_{1*} + k_{\beta 1} \frac{D_{1*}}{p}\right)\left(l_{1*} + \frac{\pi D_{1*} k_j}{Z_2 \sin\left(\frac{\pi p}{Z_2}\right)}\right)}}, \tag{3}$$

$$F_{\text{н}} = \frac{s_{\text{н}}}{2c_1^2 k_{\text{м}}\left(k_{\text{м}} + \sqrt{k_{\text{м}}^2 - 1}\right)} \sqrt{\frac{r_1}{r_2'}}, \tag{4}$$

$$D_{1*} = D_1 / D_{1\text{н}}, \quad l_{1*} = l_1 / D_{1\text{н}}, \tag{5}$$

где $k_{\text{об}1}$ – обмоточный коэффициент обмотки статора для первой гармоники; f_1 – частота тока в обмотке статора; γ_1 и γ_2 – электропроводность материалов обмоток статора и ротора; Z_1 и Z_2 – числа пазов статора и ротора; $k_{\text{г}1}$ и $k_{\text{г}2}$ – коэффициенты заполнения пазов статора и ротора неизолированным проводом; $k_{\vartheta 1}$ и $k_{\vartheta 2}$ – температурные коэффициенты сопротивления материалов обмоток статора и ротора; $k_{\text{п}1}$ и $k_{\text{п}2}$ – коэффициенты, учитывающие площади пазов статора и ротора и определяемые выражениями из [1] и [4]; $k_{\text{л}1}$ – коэффициент вылета лобовых частей обмотки статора; $k_{\beta 1}$ – коэффициент укорочения шага обмотки статора; k_j – коэффициент, учитывающий увеличение плотности тока в короткозамыкающих кольцах ротора по отношению к плотности тока в стержнях; $s_{\text{н}}$ – номинальное скольжение двигателя; c_1 – коэффициент, учитывающий падение напряжения на сопротивлении обмотки статора; $k_{\text{м}}$ – перегрузочная способность асинхронного двигателя; r_1 – активное сопротивление обмотки статора, r_2' – приведенное активное сопротивление обмотки ротора; D_{1*} и l_{1*} – соответственно относительные значения диаметра расточки статора и длины пакета стали статора асинхронного двигателя.

Числовые значения всех величин, входящих в выражение (2), заданы или известны, а значит, и само выражение (2) полностью определено. В [1] показано, что функция $F_{\text{м}*}$, определяемая выражением (3), имеет единственный максимум в плоскости двух независимых переменных D_{1*} и B_δ.

Пакет MathCad содержит стандартную программу определения максимума функции двух переменных. С помощью этой программы находим оптимальные значения $D_{1*опт}$ и $B_{\delta\ опт}$ и соответствующее им максимальное значение функции $F_{м*max}$.

В качестве примера, иллюстрирующего это положение, на рис. 1 и 2 представлены зависимости $F_{м*} = f\ B_{\delta}$ при $D_{1*} = D_{1*опт}$ и $F_{м*} = f\ D_{1*}$ при $B_{\delta} = B_{\delta\ опт}$, которые проходят в двух взаимно перпендикулярных плоскостях через вершину поверхности $F_{м*} = f\ D_{1*}, B_{\delta}$, определяемой выражением (5).

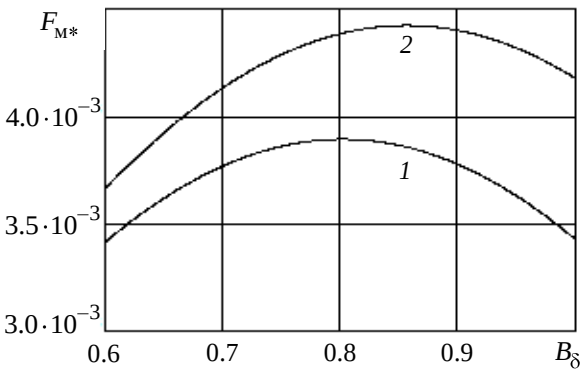

Рис. 1

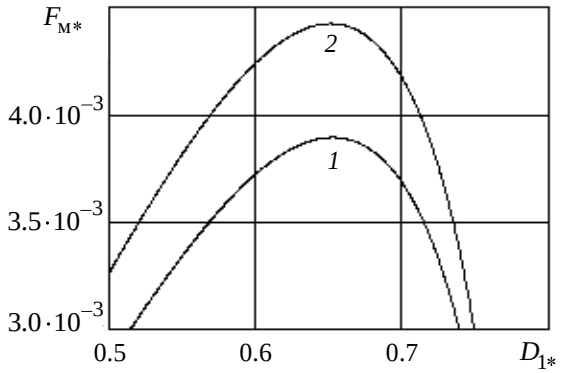

Рис. 2

Магнитная индукция	$B_{з1}$	$B_{с1}$	$B_{з2}$	$B_{с2}$
Кривая *1*	1.8	1.6	1.6	0.9
Кривая *2*	1.9	1.7	1.7	1.0

Графические зависимости, представленные на рис. 1 и 2, рассчитаны при значениях магнитных индукций, указанных в таблице.

Из рис. 1 и 2 и данных, приведенных в таблице, следует, что повышение значений магнитных индукций на участках магнитной системы двигателя сопровождается увеличением значения функции $F_{м*}$. Обозначения в таблице: $B_{з1}$, $B_{с1}$, $B_{з2}$, $B_{с2}$ – магнитные индукции в зубцах и сердечнике статора и в зубцах и сердечнике ротора соответственно.

В ходе вычисления значения $F_{м*max}$ функции $F_{м*}$ определяются одновременно и значения магнитных индукций $B_{з1}$, $B_{с1}$, $B_{з2}$, $B_{с2}$. По этим данным, используя соответствующие выражения из [3], рассчитываем отношение r_1/r_2' для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

$$\frac{r_1}{r_2'} = \frac{k_{\theta1}\gamma_2 Z_2 k_{г2} k_{п2}}{k_{\theta2}\gamma_1 Z_1 k_{г1} k_{п1}} \frac{1}{k_{об1}^2} \frac{k_{л1} l_{1*} + k_{\beta1} D_{1*}/p}{l_{1*} + \pi D_{1*} k_j / Z_2 \sin\ \pi p/Z_2} \tag{6}$$

или фазным ротором

$$\frac{r_1}{r_2'} = \frac{k_{\theta1}\gamma_2 Z_2 k_{г2} k_{п2}}{k_{\theta2}\gamma_1 Z_1 k_{г1} k_{п1}} \frac{1}{k_{об1}^2} \frac{k_{л1} l_{1*} + k_{\beta1} D_{1*}/p}{l_{в2}}, \tag{7}$$

где $l_{в2}$ – длина витка обмотки ротора [3].

Принимая во внимание выражения (6) или (7), вычисляем по выражению (4) функцию $F_{\text{н}}$, имея в виду, что значения номинального скольжения $s_{\text{н}}$ и перегрузочной способности двигателя $k_{\text{м}}$ указаны в задании на проектирование. Таким образом, все сомножители в правой части выражения (1) теперь определены и на следующем этапе рассчитываются наружный диаметр пакета стали статора $D_{1\text{н}}$ и его длина l_1.

В соответствии с энергетической диаграммой асинхронного двигателя его электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$ и полезный механический момент на валу двигателя M_2, значение которого определяется заданием на проектирование, связаны соотношением

$$M_{\text{эм}} = k_{\text{мех}} M_2 , \tag{8}$$

где $k_{\text{мех}} = 1.02...1.05$ – коэффициент, учитывающий полные механические потери в двигателе (меньшие значения для двигателей большей мощности).

Подставляя (8) в (1), получим выражение, определяющее наружный диаметр пакета стали статора:

$$D_{1\text{н}} = \sqrt[5]{\frac{k_{\text{мех}} M_2}{k_F F_{\text{м}*} F_{\text{н}}}} .$$

Диаметр D_1 расточки статора и длина l_1 пакета стали статора будут определяться выражениями $D_1 = D_{1\text{н}} D_{1*}$ и $l_1 = D_{1\text{н}} l_{1*}$ соответственно.

Для определения числа витков W_1 фазы обмотки статора необходимо предварительно вычислить действующее значение фазной ЭДС обмотки статора $E_1 = U_1 / c_1$ в предположении, что задано действующее значение фазного напряжения U_1. Далее выбирается тип обмотки статора (сосредоточенная или распределенная, с диаметральным или укороченным шагом) и рассчитывается обмоточный коэффициент $k_{\text{об}1}$. Для полученных значений D_1 и l_1 вычисляется амплитуда полезного магнитного потока в воздушном зазоре $\Phi_\delta = D_1 / \, p l_1 B_\delta$ и ЭДС $E_1 = \pi\sqrt{2}\, f_1 W_1 k_{\text{об}1} \Phi_\delta$. Отсюда однозначно определяется число последовательно соединенных витков W_1 одной фазы обмотки статора.

На каждую фазу обмотки статора приходится $Z_\phi = Z_1 / \, 2pq_1$ пазов. Обмотка может иметь параллельные ветви, число которых обозначим через a_1, и тогда полное число витков фазы будет равно $a_1 W_1$. Катушки должны содержать одинаковые числа витков $W_{\text{к}}$, и так как формально $W_{\text{к}} = a_1 W_1 / Z_\phi$, то отношение $a_1 W_1 / Z_\phi$ равно целому числу. С учетом данного условия уточняется число витков W_1. При двухслойной обмотке число проводников в пазу $S_{\text{п}1}$ должно быть четным. Это условие можно записать в следующем виде $S_{\text{п}1} = a_1 W_1 / \, pq_1$ – четное число.

После уточнения числа витков W_1 определяется сечение проводника обмотки статора q_{a1}. В процессе определения оптимальных значений D_{1*} и l_{1*} формируется лист стали статора и поэтому можно считать, что площадь паза статора $Q_{п1}$ известна. С учетом этого расчетное значение $q_{a1} = Q_{п1}k_{г1}/S_{п1}$. Полученное значение q_{a1} уточняется в соответствии со стандартом на провода круглого сечения.

При однослойной или двухслойной всыпной обмотке достаточно сложно обеспечить . Поэтому располагая размерами паза (рис. 3), производится проверка возможности укладки в паз пазовой изоляции *3*, изолированных проводов *1*, междуслойной прокладки *2* и клина *4* с одновременным определением толщины и материала пазовой изоляции.

Предварительно рассчитываем по эскизу паза или аналитически его периметр $П_{п1}$ и выбираем толщину пазовой изоляции $\delta_и = 0.3...0.5$ мм (например, пленкостеклопласт при напряжении до 690 В). Площадь, занимаемая пазовой изоляцией $Q_{п.и} = \delta_и П_{п1}$. Площадь, занимаемая клином $Q_{кл}$, определяется в каждом конкретном случае из технологических соображений.

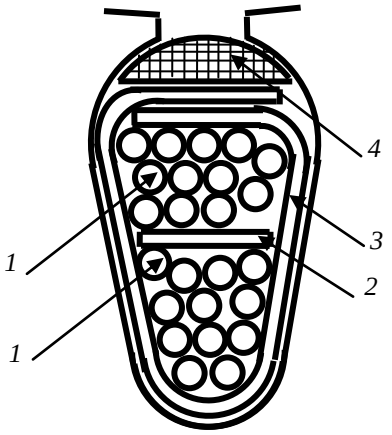

Рис. 3

Обозначая через $Q_{п1}$ площадь паза статора, $d_{1и}$ диаметр изолированного провода, вычисляем технологический коэффициент заполнения части паза, занимаемой изолированным проводом

$$f_0 = \frac{S_{п1}d_{1и}^2}{Q_{п1} - Q_{п.и} - Q_{кл}} = 0.68...0.72.$$

Существенно сложнее решается задача расчета ширины b и высоты a сечения провода прямоугольного сечения. Предполагается, что по расточке статора размещены пазы прямоугольного профиля. При этом ширина паза $b_п$ и его высота $h_п$ (рис. 4) определяются в процессе оптимизации поперечной геометрии как и в случае пазов овальной формы. Предварительное значение площади поперечного сечения q_{a1} прямоугольного провода *1* вычисляется также как для круглого провода.

Ширина сечения проводника b должна быть меньше ширины пазамм[2], то он разбивается на 2 элементарных проводника, ширина каждого из них будет равна $b = 0.5\ b_п - 2b_{из} - \Delta b_п$. В этом выражении $2b_{из}$ представляет собой собственную изоляцию проводника.

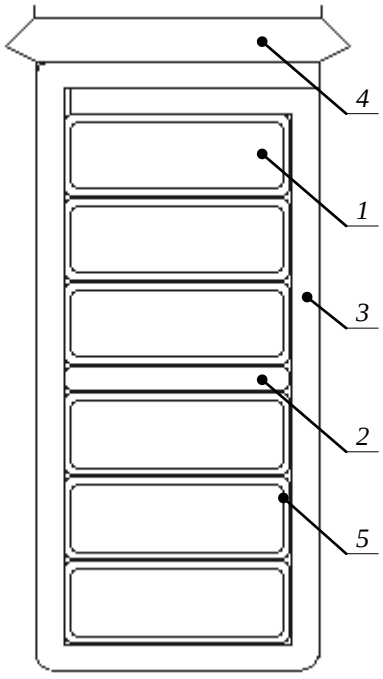

Рис. 4

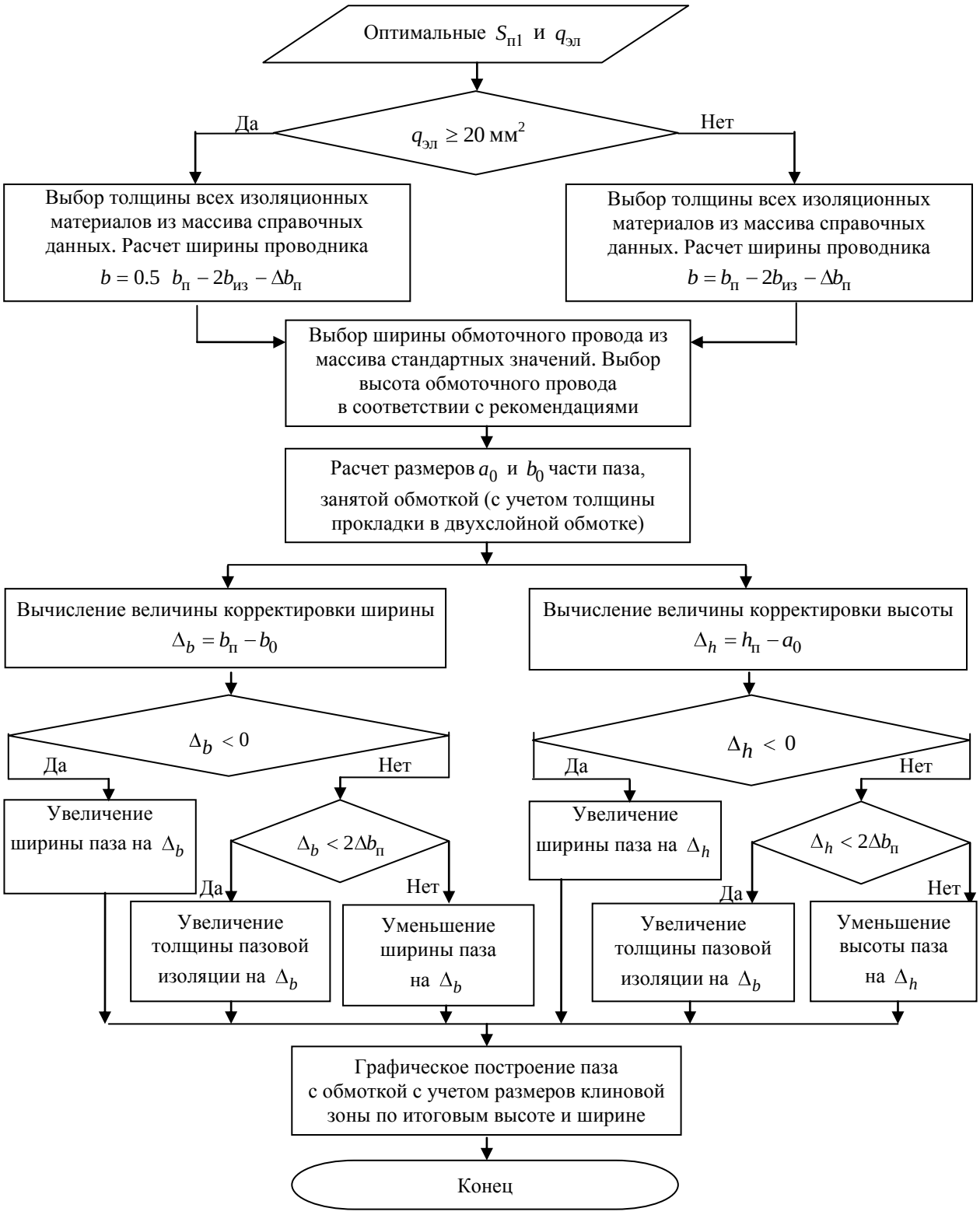

Рис. 5

Окончательная ширина проводника находится по таблицам стандартных размеров обмоточных проводов прямоугольного сечения. По предварительно определенной ширине проводника и по его расчетному сечению подбирается наиболее близкие к ним стандартные значения $q_{эл}$ и ширина b и соответствующая им высота проводника a. Высота проводника при этом не должна превышать 2.5…3.0 мм (для исключения возникновения эффекта вытеснения

тока в проводниках) и не меньше 1 мм (технологические трудности при изготовлении катушек). Нежелательно также применение прямоугольных проводов с близкими размерами a и b, так как провод во время намотки катушек часто перекручивается и при рихтовке может быть может быть повреждена изоляция на поверхности провода.

Сумма размеров по высоте и ширине паза всех проводников и изоляции с учетом необходимых допусков на разбухание изоляции и на укладку обмотки определяет размеры части паза, занятой обмоткой. В дальнейшем расчетная высота и ширина этой части паза корректируются либо за счет увеличения толщины пазовой изоляции, либо возрастают с увеличением мощности машины и ширины ее пазов. Обычно в асинхронных двигателях $h_{\text{ш}} = 0.5...1.0$ мм и $h_{\text{к}} = 3.0...3.5$ мм в машинах средней мощности и достигает 5 мм в крупных машинах. Высота междуслойной прокладки *2* составляет 1…2 мм.

Схема алгоритма укладки обмотки в прямоугольный паз представлена на рис. 5.

В [1]–[3] и в данной заключительной статье представлена новая математическая модель, обеспечивающая однозначное решение обратной задачи или задачи синтеза проектирования асинхронных двигателей, в ходе решения определяются основные размеры двигателя и его обмоточные данные. Эта модель базируется на фундаментальном положении, в соответствии с которым в некотором замкнутом объеме активных материалов асинхронного двигателя всегда существует единственная пара оптимальных значений диаметра расточки статора и магнитной индукции в воздушном зазоре, при которых электромагнитный момент асинхронного двигателя имеет наибольшее значение, что соответствует наилучшему использованию активных материалов двигателя по электромагнитному моменту. Одновременно можно определить значения магнитных индукций в зубцах и сердечниках статора и ротора, при которых энергетический КПД асинхронного двигателя будет иметь максимальное значение. Это значит, что предложенная модель обеспечивает оптимизацию асинхронных двигателей по степени использования активных материалов и по уровню энергетического КПД, т. е. по двум критериям одновременно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов М. А., Пантюхов Д. С. Оптимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре асинхронного двигателя // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. Вып. 2. С. 31–38.

2. Ваганов М. А., Пантюхов Д. С. Максимум энергетического КПД асинхронного двигателя // Изв. СПбГЭТУ«ЛЭТИ». 2010. Вып. 8. С. 68–76.

3. Ваганов М. А., Пантюхов Д. С. Преобразование параметрического сомножителя в выражении электро-магнитного момента асинхронного двигателя // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 3. С. 62–67.

4. Ваганов М. А. К вопросу об определении площади пазов микромашин постоянного и переменного тока // Изв. вузов. Электромеханика. 1976. № 12. С. 1332–1337.

M. A. Vaganov, D. S. Pantuhov, I. A. Pimenova

DETERMINATION OF ASYNCHRONOUS MOTOR'S PRINCIPAL DIMENSIONS AND ITS STATOR WINDING

Asynchronous motor's principal dimensions determination algorithm that provides the best way of active materials using when it works with the maximum radiant efficiency level and stator winding finding are examined in this work.

Best values of magnetic induction in air clearance, stator bore relative diameter value, stator core external diameter, stator core length, number of turns of stator winding phase

УДК 681.621

В. В. Федоров

ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ УСКОРЕНИЙ И ИМПУЛЬСОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕЛ

Посвящается дальнейшему развитию единой теории поля, основанной на уравнениях Максвелла. Рассматриваются особенности гравитационных полей вращающихся цилиндрических и сферических тел. Источниками импульсного поля являются вращающиеся тела. Получены эквивалентные моменты импульсных диполей планет солнечной системы. Гравитационное поле внутри вращающихся тел и во внешнем пространстве определяется из подобных для гравитационного взаимодействия уравнений Максвелла.

Гравитация, инертная масса, поле ускорений, напряженность импульсного поля, уравнения Максвелла гравитационного поля, гравитационное напряжение

В гравитации [1] масса – это гравитационный заряд. Аналогично электрическому полю в гравитационном поле введено понятие напряженности $\mathbf{E}_{\text{гр}}$ поля ускорений как силы, с которой поле ускорений действует на точечное тело с единичной массой 1 кг. Кроме напряженности электрического поля движущиеся или изменяющиеся во времени электрические заряды создают вокруг себя магнитное поле. Так и при движении или изменении во времени масс вокруг них образуется импульсное гравитационное поле $\mathbf{H}_{\text{гр}}$.

Значение вектора напряженности импульсного гравитационного поля определяет значение импульса, действующего на единицу поверхности $1\,\text{м}^2$.

Импульсное поле $\mathbf{H}_{\text{гр}}$ совместно с полем ускорений $\mathbf{E}_{\text{гр}}$ образуют единое гравитационное поле. Связь между импульсным полем и полем ускорений, исходя из аналогии гравитационных и электромагнитных полей, единства природы и ее закономерностей, определяется из уравнений, аналогичных уравнениям Максвелла

$$\text{I. rot}\,\mathbf{H}_{\text{гр}} = \gamma_{\text{гр}}\mathbf{E}_{\text{гр}} + \frac{d\mathbf{D}_{\text{гр}}}{dt} - \rho_{\text{гр}}\mathbf{v};\ \ \text{II. rot}\,\mathbf{E}_{\text{гр}} = -\frac{d\mathbf{B}_{\text{гр}}}{dt};\ \ \text{III. div}\,\mathbf{D}_{\text{гр}} = -\rho_{\text{гр}};\ \ \text{IV. div}\,\mathbf{B}_{\text{гр}} = 0$$

и трех уравнений связи или вещественных уравнений:

$$\mathbf{D}_{\text{гр}} = \varepsilon_{\text{гр}}\,\mathbf{E}_{\text{гр}},\ \ \mathbf{B}_{\text{гр}} = \mu_{\text{гр}}\mathbf{H}_{\text{гр}},\ \ \ \mathbf{J}_{\text{гр}} = \gamma_{\text{гр}}\,\mathbf{E}_{\text{гр}},$$

где $\mathbf{D}_{\text{гр}}$, $\mathbf{B}_{\text{гр}}$ – векторы индукции; $\varepsilon_{\text{гр}}$, $\mu_{\text{гр}}$ – проницаемости поля ускорений и импульсного поля; $\gamma_{\text{гр}}$ – удельная гравитационная проводимость. Для эфира, исходя из равенства скоростей электромагнитных и гравитационных волн в нем и постоянной тяготения Кавендиша, гравитационные проницаемости $\varepsilon_{\text{гр}} = 1.19 \cdot 10^{9}\ \text{кг}\cdot\text{с}^2/\text{м}^3$, $\mu_{\text{гр}} = 9.35 \cdot 10^{-27}\,\text{м/кг}$.