

\* \* \*

## Проектирование одноимённо-полюсных индукторных двигателей с постоянными магнитами на роторе

СМИРНОВ А.Ю., ЗИМИН А.Ю.

Приводится метод определения базовых размеров одноименно-полюсной индукторной машины с возбуждением от кольцевых постоянных магнитов, расположенных на роторе, — диаметра и длины ротора. Размеры определяются с учетом как электромагнитных нагрузок двигателя (линейной нагрузки якоря и индукции в зазоре), так и момента инерции, при котором обеспечиваются наиболее благоприятные динамические качества двигателя в шаговом приводе. Делается вывод о том, что электромагнитный момент одноименно-полюсной машины с магнитоэлектрическим ротором, магниты которого намагничены в осевом направлении, не зависит от отношения длины ротора к его диаметру. Это позволяет предложить методику проектирования одноименно-полюсных индукторных двигателей с постоянными магнитами на роторе, по которой основные размеры ротора определяются с учетом как момента нагрузки на валу, так и момента инерции подвижных частей привода.

Ключевые слова: индукторная машина, постоянные магниты, базовые размеры, момент инерции, шаговый привод

В системах автоматики и телемеханики весьма широко применяются простые в производстве и надёжные в эксплуатации одноимённо-полюсные индукторные двигатели с расположенным на роторе постоянным магнитом, создающим поток возбуждения (на рис. 1 показан вариант схемы соединения катушек в одной фазе обмотки якоря). Ротор

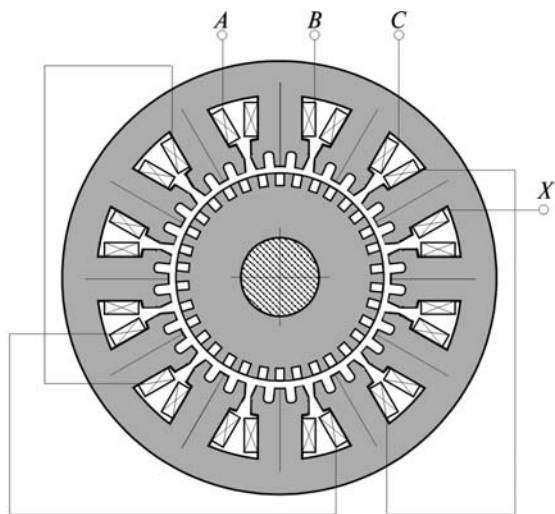


Рис. 1. Конструкция одноименно-полюсного индукторного двигателя ( $m=3$ ,  $2p=4$ ,  $q=1$ ) с возбуждением от постоянных магнитов

(рис. 2) состоит из одного или нескольких пакетов, в каждом из которых два зубчатых магнитопровода 1 и 2, повернутых относительно друг друга на половину зубцового деления, и расположенного между ними постоянного магнита 3, намагниченного в осевом направлении.

Поток возбуждения замыкается в аксиально-радиальном направлении и проходит через зубцовые зоны ротора и статора, в которых модулируется в зависимости от взаимного расположения зубцовых зон ротора и полюсных наконечников с катушками

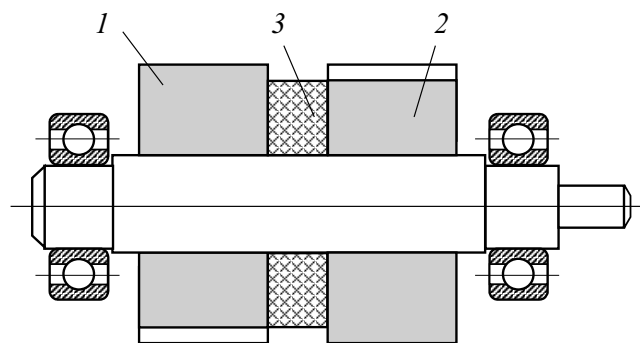


Рис. 2. Конструкция ротора (один пакет): 1, 2 — магнитопроводы; 3 — магнит

различных фаз обмотки якоря. В результате взаимодействия тока фаз обмотки якоря с полем возбуждения создаётся вращающийся электромагнитный момент.

Наиболее часто такие двигатели применяются в разомкнутом синхронном (шаговом) приводе [1], где каждому импульсу тока, поочерёдно поданному на одну из фаз обмотки, строго соответствует перемещение ротора на фиксированный угол, определяемый соотношением чисел зубцов на роторе и статоре и числом фаз обмотки якоря.

Основными (базовыми) размерами двигателя, определяющими его другие геометрические параметры, являются диаметр  $D$  и длина пакетов ротора в осевом (аксиальном направлении)  $l_d$ .

При определении базовых размеров двигателей, предназначенных для разомкнутого привода с частотным управлением, следует учитывать как электромагнитные нагрузки собственно машины, так и инерционные параметры привода. При учете электромагнитных нагрузок следует исходить из известной формулы, связывающей базисные размеры с линейной нагрузкой  $A$  и индукцией в зазоре  $B_d$  через постоянную Арнольда [2]:

$$\frac{D^2 l_d W}{P} = \frac{61}{a_d k_B k_{об} A B_d}, \quad (1)$$

где  $W$  — частота вращения, об/мин;  $P$  — расчётная электромагнитная мощность, Вт;  $a_d$ ,  $k_B$ ,  $k_{об}$  — коэффициенты полюсного перекрытия, формы поля и обмоточный.

Отношение  $P/W$  можно рассматривать как расчётный электромагнитный момент машины. При использовании коэффициента приведения указанных единиц измерения значение момента (Нж) в стандартных единицах составит

$$M = 0,1047 \frac{P}{W}. \quad (2)$$

Подставляя его в (1), выразим функцию диаметра ротора от электромагнитных нагрузок:

$$D^3 = \frac{6,388 M}{a_d k_B k_{об} l A B_d}, \quad (3)$$

где

$$l = l_d / D \quad (4)$$

— длина ротора  $l_d$  по отношению к его диаметру.

При проектировании магнитоэлектрической машины с возбуждением со стороны ротора следует учесть связь индукции в зазоре  $B_d$  с характеристикой магнитотвёрдого материала через соотношение площади магнитов в плоскости, перпендикулярной направлению намагничивания  $S_M$ , и сум-

марной площади зубцов  $S_d$ , ограничивающей зазор под полюсными наконечниками с катушками одной фазы:

$$\frac{k_s B_d}{B_r} = \frac{S_M}{S_d}. \quad (5)$$

В (5)  $k_s$  — коэффициент рассеяния;  $B_r$  — паспортное значение остаточной индукции (индукции холостого хода) магнитотвёрдого материала (при этом можно полагать, что её фактическое значение отличается от паспортного в два раза);

площадь магнитов

$$S_M = \frac{\rho[(D - 2h_{п.р})^2 - D_B^2]}{4} = 0,21 \rho D^2 \frac{\alpha}{\epsilon} \left[ 1 - \frac{0,597 \ddot{\phi}}{Z \ddot{\phi}} \right] \frac{\alpha}{\epsilon} \left[ 1 - \frac{0,287 \ddot{\phi}}{Z \ddot{\phi}} \right], \quad (6)$$

где диаметр отверстия под вал

$$D_B \gg 0,35 D; \quad (7)$$

площадь зубцов ротора, ограничивающих зазор под наконечниками полюсов статора с катушками одной фазы,

$$S_d = \frac{\rho D^2 l k_z}{2 n_M}, \quad (8)$$

где  $n_M$  — число магнитов на роторе; протяжённость зубца по отношению к зубцовому делению ротора

$$k_z = b_z / t_z = 0,40, 0,47; \quad (9)$$

длина зубцового деления ротора

$$t_z = \frac{\rho D}{Z}. \quad (10)$$

Высота паза ротора принимается из условия, в соответствии с которым глубина проникновения поля в паз не превышает 60% его ширины [3]:

$$h_{п.р} = 0,6(1 - k_z)t_z = 0,36 t_z. \quad (11)$$

В двигателях с преобразованием энергии на зубцовой гармонике значение шага  $a_{ш}$  не зависит от числа пар полюсов  $p$  обмотки якоря. Число зубцов ротора, соответствующее заданному шагу, определяется пространственным сдвигом осей фаз обмотки относительно зубцового деления ротора:

$$Z = \frac{2p}{m a_{ш}} \quad (12)$$

и, естественно, должно быть целой величиной. В противном случае значение шага следует скорректировать вверх или вниз от первоначально заданного значения.

Длину магнита, обеспечивающую заданную линейную нагрузку на окружности ротора, следует определять с учётом насыщения и запаса МДС, ко-

торым должны обладать магниты во избежание размагничивания при коротких замыканиях и случайных бросках тока в обмотке якоря. Поэтому можно приравнять МДС

$$F_M = H_{CB} l_M k_{3.M} = A p D, \quad (13)$$

где  $H_{CB}$  – коэрцитивная сила магнитотвёрдого материала по индукции (паспортное значение);  $l_M$  – длина магнита в аксиальном направлении;  $k_H$  – коэффициент насыщения;  $k_{3.M}$  – коэффициент запаса МДС магнита.

Подставляя в (3) выражения для электромагнитных нагрузок из (5) с учётом (12), найдём функцию диаметра ротора от электромагнитных нагрузок:

$$D^3 = \frac{6,388 M}{a_d k_B k_{об} l A \frac{S_M B_r}{S_d k_s}} = \frac{6,388 M}{a_d k_B k_{об} A k_{md} B_r}, \quad (14)$$

где  $k_{md}$  – коэффициент перераспределения потока постоянных магнитов в зазор, представляющий отношение площадей (6) и (7):

$$k_{md} = \frac{l S_M}{S_d k_s} = \frac{0,219 \frac{\pi}{Z} l - \frac{0,597 \pi}{Z} l - \frac{0,287 \pi}{Z} l}{\frac{k_z k_s}{2 n_M}}. \quad (15)$$

Этот коэффициент не зависит от относительной длины ротора  $l$ , поскольку содержится как в числителе, так и в знаменателе, поэтому коэффициенты при моменте в (14) можно заменить конструктивной постоянной

$$C = \frac{6,388}{a_d k_B k_{об} k_{md} A B_r}. \quad (16)$$

Кроме того, коэффициенты полюсного перекрытия и протяжённости зубца по отношению к зубцовому делению для рассматриваемых машин можно приравнять:

$$a_d = k_z,$$

что позволяет исключить соответствующие множители из (15) и (16).

Таким образом, конструктивная постоянная  $C$  зависит от выбранных электромагнитных нагрузок, параметров обмотки и характеристик ферромагнитных материалов:

$$D^3 = MC, \quad (17)$$

но не зависит от отношения длины ротора к его диаметру.

Для оптимальной работы частотного привода, прежде всего шагового, необходимо, чтобы момент инерции привода  $J_{пр}$  был равен или не более чем в

два раза превосходил момент инерции ротора двигателя  $J_p$  [5]:

$$J_{пр} = (1, 2) J_p = b J_p. \quad (18)$$

Связь между диаметром ротора и его моментом инерции (кгж) устанавливается для железного цилиндра массой  $m_{ц}$ , диаметром  $D$  и длиной  $l_d = l D$ :

$$J_p = m_{ц} \frac{D^2}{8} = \gamma_{ж} l \frac{\rho D^3 D^2}{4 \cdot 8} = 765,76 D^5 l \quad [\text{кг} \cdot \text{м}^2].$$

Его уменьшение вследствие наличия пазов

$$J_{p2} = (1 - k_z) \gamma_{ж} l D \frac{\rho (D - 2h_{пр})^4}{32} = (1 - k_z) 765,76 D^5 l \left(1 - \frac{2,262 \pi}{Z} \frac{D^4}{\pi}\right) \quad (19)$$

определено уравнением (10) с учётом (11), следовательно,

$$J_p = J_{p1} - J_{p2} = 765,76 D^5 l \left(1 - \frac{2,262 \pi}{Z} \frac{D^4}{\pi}\right) (1 - k_z) + k_z \frac{J_{п1}}{l}. \quad (20)$$

Подставляя (17) в (20), а (20) в (18), найдём диаметр ротора в функции электромагнитного момента двигателя и момента инерции привода:

$$D = \sqrt[5]{\frac{M J_{пр}}{765,76 \left(1 - \frac{2,262 \pi}{Z} \frac{D^4}{\pi}\right) (1 - k_z) + k_z \frac{J_{п1}}{l}}}. \quad (21)$$

Активная длина ротора рассматриваемой индукторной машины отличается от его аксиальной длины  $L$  на значение суммарной длины магнитов в аксиальном направлении, поэтому

$$L = l D + n_M l_M. \quad (22)$$

Размеры (21) и (22) являются базовыми для машины в целом.

Размеры магнита (магнитов):  
наружный диаметр

$$D_{\text{маг}} = D - 2h_{пр}; \quad (23)$$

внутренний диаметр

$$d_{\text{маг}} = \sqrt{D_{\text{маг}}^2 - \frac{2D^2 l k_z k_s}{B_r n_M}}. \quad (24)$$

Если под корнем (24) получилось отрицательное число, то следует выбрать меньшее значение относительного момента инерции  $b$ , увеличить линейную нагрузку  $A$ , число магнитов  $n_M$  или уменьшить относительную длину ротора  $l$ . Полученное значение, равное диаметру вала  $D_B$ , следует сопос-

тавить с диаметром ротора. Манипулируя одним или несколькими из перечисленных параметров, можно добиться выполнения условия

$$d_{\text{Маг}} = D_B = (0,30, 0,45)D. \quad (25)$$

Исходные данные, необходимые для проектирования, приведены в табл. 1.

Кривые намагничивания используются для определения коэффициента насыщения  $k_H$ . Однако он может быть предварительно выбран в определённых пределах, тогда указанные характеристики используются для проверки предварительно выбранного значения после проектирования всей машины.

Пример исходных данных и результаты определения основных размеров ротора двигателя (о.к.н. – основная кривая намагничивания):

$M$	21,5
$J_{\text{пр}}$	$2,36 \cdot 10^{-3}$
$a_{\text{ш}}$	3,0
$m$	3
$k_B$	1,11
$n_M$	2

$b$	1,0
$A$	$2,5 \cdot 10^4$
$B_d$	0,9
$k_{3,М}$	1,1
$l$	1,8
$B_r$	1,05
$H_{CB}$	1000
$B_1=f(H)$	о.к.н.
$B_2=f(H)$	о.к.н.

По известному из (11) значению зубцового деления  $t_z$  определяется воздушный зазор; можно рекомендовать [5]:

$$t_z = (15, 25)d. \quad (26)$$

При выборе большего значения уменьшается амплитуда модуляции потока в зазоре за счёт роста его ответвления в пазовые области зубцовой зоны и, следовательно, снижаются массогабаритные показатели двигателя. Выбор слишком малого по сравнению с рекомендуемым по (24) значения  $d$  ведёт к росту реактивных моментов, которые искажают форму угловой (статической) характеристики и

Таблица 1

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Пределы изменения
Привод и двигатель			
Момент нагрузки	$M_H$	Н·м	–
Момент инерции привода	$J_{\text{пр}}$	кг·м <sup>2</sup>	–
Шаг – угол поворота ротора, соответствующий одному импульсу, поданному на фазы обмотки	$a_{\text{ш}}$	градус	0,5, 30
Число фаз обмотки	$m$	–	3, 6
Коэффициент формы поля	$k_B$	–	1,11
Число магнитов на роторе	$n_M$	–	1, 4
Момент инерции ротора относительно момента инерции привода	$b$	–	1,0, 2,0
Линейная нагрузка	$A$	А/м	$(1, 8) \cdot 10^4$
Индукция в зазоре	$B_d$	Тл	0,7, 95
Коэффициент запаса МДС магнита	$k_{3,М}$	–	1,1, 1,2
Относительная, по отношению к диаметру, длина ротора (предварительно)	$l$	–	0,7, 95
Материалы			
Остаточная индукция магнитотвёрдого материала (рис. 3)	$B_r$	Тл	–
Коэрцитивная сила магнитотвёрдого материала по индукции (рис. 3)	$H_{CB}$	А/м	–
Характеристика намагничивания магнитопровода статора	$B_1=f(H)$	Тл, А/м	–
Характеристика намагничивания магнитопровода ротора	$B_2=f(H)$	Тл, А/м	–

могут стать причиной ряда нежелательных явлений в частотном (шаговом) приводе.

Последовательность (алгоритм) и результаты определения размеров ротора и зазора представлены в табл. 2.

Проектирование статора сводится к выбору числа полюсных выступов с катушками  $Z_S$ , количества зубцов, выполненных на поверхности гребенчатой зубцовой зоны каждого из них, и определению размеров пазов и наружного диаметра магнитопровода.

Таблица 2

Параметр	Расчётная формула	Единица измерения	Значение
$q$	0,5 или 1,0	—	1,0
$Z$	(12)	—	40
$n$	(27)	—	3
$a_d$	(9)	—	0,4
$k_{мд}$	(15)	—	1,862
$C$	(16)	$\frac{м\kappa^2}{кг}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$
$D$	(21)	м	0,133
$l_d$	(4)	мм	239
$l_m$	(13)	мм	11,0
$L$	(22)	мм	261
$t_z$	(10)	мм	10,45
$d_{отн}$	15,25	—	24
$d$	(26)	мм	0,4
$b_z$	$0,5t_z - 2d$	мм	4,4
$h_{пр}$	(11)	мм	4,0
$D_{маг}$	(24)	мм	125
$d_{маг}$	(25)	мм	50

Для катушек обмотки статора необходимо, чтобы расстояние между гребенчатыми зубцовыми зонами соседних полюсных выступов составляло не менее одного зубцового деления ротора (и статора). Исходя из этого условия число зубцов на поверхности гребенчатых зубцовых зон каждого полюсного наконечника составит (ц.ч. — целая часть):

$$n = \text{ц.ч.} \frac{\frac{\infty}{e} \frac{Z}{Z_S} \frac{\ddot{\circ}}{\ddot{\circ}}}{\frac{\infty}{e} \frac{Z}{Z_S} \frac{\ddot{\circ}}{\ddot{\circ}}} \text{ или } n = \text{ц.ч.} \frac{\frac{\infty}{e} \frac{Z}{Z_S} \frac{\ddot{\circ}}{\ddot{\circ}}}{\frac{\infty}{e} \frac{Z}{Z_S} \frac{\ddot{\circ}}{\ddot{\circ}}} - 1.$$

Выбор числа зубцов в соответствии с первым из этих равенств позволяет получить больший момент, а в соответствии со вторым — упростить укладку катушек в пазы. Во избежание действия сил

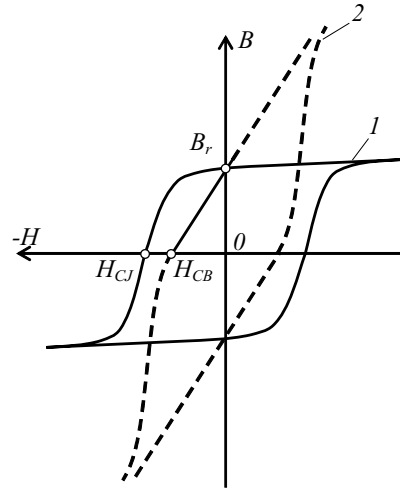


Рис. 3. Характеристики магнитотвёрдого материала по намагниченности (1) и индукции (2) и точки их нормируемых значений

одностороннего тяжения на пакеты ротора и чрезмерного усложнения процесса сборки статора, обусловленного большим числом полюсных выступов  $Z_S$ , число пар полюсов обмотки должно быть чётным и не слишком большим. Целесообразно ограничиться значением  $p=2$  при числе пазов на полюс и фазу  $q=0,5$  или  $q=1$ ,  $Z_S = 2mpq = 6, 12$ .

Значение МДС и площадь пазов, необходимых для размещения проводников обмотки, определяются исходя из линейной нагрузки  $A$  и выбранной плотности тока. Радиальный размер гребенчатых зубцовых зон, ограничивающих поверхность ротора диаметром  $D_S$ , складывается из высоты пазовой части  $h_{п1}$  и полюсных наконечников  $h_{п.н}$ , замыкающих магнитную цепь зубцов (рис. 4). Ширина зубцов на статоре  $b_{zs}$  выбирается такой же, как на роторе, а ширина полюсов статора  $b_{п.н}$  — с учетом условия размещения обмотки в пазах при приемлемом уровне насыщения этих участков магнитной цепи.

После определения зазора рассчитывается высота обмотанной части полюсных выступов статора как функция константы, линейной и квадратичной зависимостей от высоты площади, занятой проводниками и изоляцией в пазу [5, 6], а затем определя-

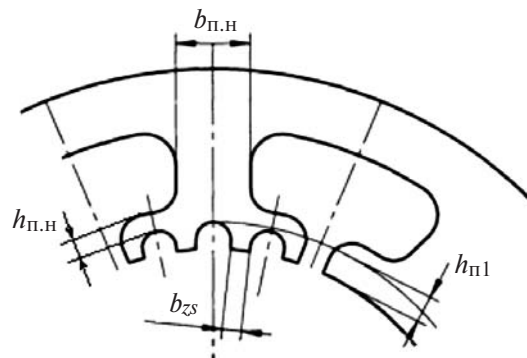


Рис. 4. Размеры зубцовой зоны статора

ются обмоточные данные и остальные недостающие размеры магнитопровода статора.

**Вывод.** Электромагнитный момент одноимённо-полюсной машины с магнитоэлектрическим ротором, магниты которого намагничены в осевом направлении, не зависит от отношения длины ротора к его диаметру. Это позволяет предложить методику проектирования одноимённо-полюсных индукторных двигателей с постоянными магнитами на роторе, по которой основные размеры ротора определяются с учётом как момента нагрузки на валу, так и момента инерции подвижных частей привода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями/Под ред. М.Г. Чиликина. — М.: Энергия, 1971, 624 с.
2. Балагуров В.А., Галгеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. — М.: Энергоатомиздат, 1988, 280 с.
3. Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.И., Власов А.И., Кузнецов В.А. Универсальный метод расчёта электромагнитных

процессов в электрических машинах. — М.: Энергоатомиздат, 1986, 216 с.

4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. — М.: Энергия, 1980, 928 с.

5. Смирнов А.Ю. Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (специальный курс): Учебное пос. для вузов. — М.: Изд-во «Форум», 2013, 192 с.

6. Смирнов А.Ю., Уснунц-Кригер Т.Н. Проектирование индукторных двигателей с самовозбуждением для частотного привода.— Электричество, 2012, № 5, с. 50—56.

[22.09.14]

*Авторы: Смирнов Александр Юрьевич окончил электротехнический факультет Горьковского политехнического института (ныне Нижегородский государственный технический университет — НГТУ им. Р.Е. Алексева) в 1980 г. В 2001 г. защитил докторскую диссертацию «Силовые электрические машины систем автоматики энергетических установок» в Московском энергетическом институте. Профессор кафедры ТОЭ НГТУ им. Р.Е. Алексева.*

*Зимин Андрей Юрьевич — аспирант кафедры ТОЭ НГТУ им. Р.Е. Алексева.*

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 1, pp. 54—59.*

## Designing Homopolar Inductor Motors with Permanent Magnets on the Rotor

A. YU. SMIRNOV and A. YU. ZIMIN

*A method for determining the basic sizes of a homopolar inductor machine (the rotor diameter and length) excited from annular permanent magnets placed on the rotor is presented. The sizes are determined taking into account both the motor electromagnetic loads (the armature linear load and induction in the air gap) and the inertia moment at which the most favorable dynamic properties of the motor in a step drive are achieved. A conclusion is drawn that the electromagnetic torque of a homopolar machine with a magnetolectric rotor the magnets of which are magnetized in the axial direction does not depend on the rotor length to diameter ratio. As a result, a procedure for designing homopolar inductor motors with permanent magnets on the rotor can be proposed, according to which the main rotor sizes are determined taking into account both the load torque on the shaft and the inertia moment of the drive movable parts.*

*Key words: inductor machine, permanent magnets, basic sizes, inertia moment, step drive*

#### REFERENCES

1. Diskretnyi elektroprivod s shagovymi dvigatelyami/Под ред. М.Г. Чиликина (Discrete Drive with Stepper/Edit. by M.G. Chilikin). Moscow, Publ. Energiya, 1971, 624 p.
2. Balagurov V.A., Galteev F.F. Elektricheskiye generatory s postoyannymi magnitami (Electrical Generators with Constant Magnets). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1988, 280 p.
3. Ivanov-Smolenskii A.V., Abramkin Yu.V., Vlasov A.I., Kuznetsov V.A. Universaln'nyi metod rascheta elektromagnitnykh protsessov v elektricheskikh mashinakh (Universal Method Calculating

Electromagnetic Processes in Electrical Machines). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1986, 216 p.

4. Ivanov-Smolenskii A.V. Elektricheskiye mashiny (Electrical machines). Moscow, Publ. Energiya, 1980, 928 p.

5. Smirnov A.Yu. Induktornye mashiny. Proektirovaniye i vychislitel'nyi analiz (spets. kurs) (Inductor machines. Design and computational analysis special rate). Moscow, Publ. Forum, 2013, 192 p.

6. Smirnov A.Yu., Vsnunts-Kriger T.N. Elektrichestvo (Electricity), 2012, No. 5, pp. 50—56.

*Authors: Smirnov Aleksandr Yur'yevich (Nizhnii Novgorod, Russia) — Doctor Techn. Sci., Professor of the N. Novgorod State Technical University (NSTU).*

*Zimin Andrei Yur'yevich (Novashino, N.Novgorod oblast, Russia) — Ph. D. Student, NSTU.*

