

Проектирование магнитоэлектрических машин с кольцевой обмоткой якоря

СМИРНОВ А.Ю.

НГТУ им. Алексеева, Н. Новгород, Россия

Предложена методика проектирования синхронных машин с кольцевой обмоткой якоря и постоянными магнитами на роторе. Эти машины могут иметь преимущество перед обычными машинами с барабанной обмоткой в магнитных системах двухполюсных машин с развитым внешним диаметром. Используются уравнения связи между объёмом рашотки статора, моментом и электромагнитными нагрузками через машинную постоянную (Арнольда), а также уравнения для линейной нагрузки, для магнитной проводимости постоянных магнитов в функции паспортных параметров магнитотвёрдого материала, для ЭДС фазы. Учитывается заполнение пазов проводниками прямоугольного сечения, катушечной и корпусной изоляцией. Численная проверка, выполненная путём расчёта угловых (статических) характеристик методом конечных элементов, показала, что спроектированные двигатели с приемлемой кратностью максимального момента удовлетворяют исходным техническим требованиям, что подтверждает достоверность методики. При проведении численной проверки оценено влияние зубцовых гармоник, обусловленных зубчатостью статора, и даны рекомендации по уменьшению этого влияния. Результаты по моменту и мощности сопоставленные с традиционной машиной с барабанной обмоткой якоря, подтвердили возможность достижения указанных преимуществ.

Ключевые слова: синхронная машина, кольцевая обмотка, якорь, индуктор, постоянный магнит, зубцовая зона, электромагнитный момент, метод конечных элементов

Из истории техники известно множество примеров, когда считавшиеся ранее устаревшими технические решения благодаря изменившимся условиям и задачам вновь становились востребованными. В электромеханике в качестве такого примера можно привести машины с кольцевой обмоткой якоря. Берущие начало своего создания от ранних конструкций машин постоянного тока Пачиннотти – Грамма второй половины XIX в. [1, 2], они являются альтернативой машинам с барабанной обмоткой, повсеместно применяемым с конца XIX в. по настоящее время.

Несмотря на очевидные недостатки: худшее использование меди из-за наличия только одной рабочей стороны в катушках вместо двух; технологической сложности намотки и крепления обмотанных магнитопроводов внутри корпуса, машины с кольцевой обмоткой якоря обладают рядом положительных качеств. Наиболее примечательные из них:

отсутствие зависимости длины вылета лобовых частей от числа полюсов;

лучшие условия теплоотвода от лобовых частей благодаря хорошему их прилеганию к поверхности сердечника;

возможность перераспределения нерабочих статорных катушек вдоль противоположной зазору по-

верхности сердечника с целью конструирования эффективных охладителей;

высокая механическая прочность при воздействии ударных токов КЗ.

Первое свойство определяет возможную область применения машин с кольцевой обмоткой в современной технике. Это высокооборотный привод с двухполюсной (максимум четырёхполюсной) обмоткой якоря с большим моментом инерции вращающихся масс. В этих условиях компоновки или обеспечения заданных технических характеристик требуется машина ограниченной осевой длины с минимальным числом пар полюсов: газодувки и вентиляторы, турбодетандеры, накопители механической энергии.

При конструировании машины, предназначенной для работы в приводе с большим моментом инерции вращающихся масс, постоянные магниты целесообразно вынести на внешний ротор, расположив статор с обмоткой внутри него. Такая компоновочная схема широко применяется в вентиляторах. Она обеспечивает надёжное крепление магнитов и их интенсивное охлаждение за счёт теплопередачи через внешнюю обдуваемую поверхность ярма. Опыт эксплуатации показывает, что перегрев является наиболее частой причиной размагничива-

ния магнитов из РЗМ в электрических машинах, более вероятной, чем воздействие токов КЗ.

Следуя положениям классической электромеханики, диаметр и длину окружности якоря машины можно связать с её энергетическими или силовыми характеристиками через машинную постоянную, причем чаще других используется машинная постоянная Арнольда [3–5]:

$$C_A = \frac{D^3 \lambda}{0,1047 M} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_{об} B_\delta A}. \quad (1)$$

Она позволяет установить зависимость между удельным по отношению к расчётному моменту объёмом ротора или расточки статора машины и принятыми электромагнитными нагрузками: средним значением индукции в зазоре B_δ и линейной токовой A . Первая характеризует магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения (индуктором) в зазоре, вторая есть удельная (на единицу длины окружности зазора) МДС обмотки якоря. В (1) M – расчётный электромагнитный момент машины; D – длина окружности якоря со стороны рабочего зазора; λ – отношение активной длины (длины рабочего зазора в аксиальном направлении) к диаметру окружности якоря; m – число фаз; k_B – коэффициент формы индукции в зазоре; $k_{об}$ – обмоточный коэффициент, в кольцевой обмотке он равен коэффициенту распределения и мало отличается от единицы при числе катушек в катушечных группах больше трёх; α_δ – длина полюсной дуги по отношению к полюсному делению.

В кольцевой обмотке линейная нагрузка в два раза меньше, чем в барабанной обмотке, и составляет

$$A = \frac{m w_\phi I}{\pi D}, \quad (2)$$

где w_ϕ – число витков фазы обмотки. Разумные пределы выбора линейной нагрузки в машинах с различной интенсивностью охлаждения составляют от 20000 до 45000 А/м – при естественном охлаждении и до 180 кА/м – в машинах с принудительным охлаждением.

При создании поля возбуждения посредством высококоэрцитивных постоянных магнитов на основе сплавов неодима или самария (а только так с приемлемыми удельными показателями можно обеспечить бесконтактное исполнение) в машине с радиально намагниченными магнитами будет создана индукция в зазоре B_δ примерно 0,35–0,45 Тл. Выбор более высоких значений в двухполюсной конструкции с радиально намагниченными магнитами ограничен насыщением участков ярма ротора.

Меньшие значения относятся к машинам малой мощности и микромашинам, для которых можно рекомендовать конструкцию с беспазовым (гладким) якорем с обмоткой из провода круглого сечения (рис. 1). Характеристики такой машины в комплектации магнитами из РЗМ менее подвержены влиянию увеличения воздушного зазора из-за размещения в нём проводников обмотки.

В ответственных двигателях и генераторах средней и большой мощности предпочтительнее схема с пазовым якорем и жёсткой обмоткой, намотанной проводом прямоугольного сечения. Катушки из нескольких витков наматываются в полузакрытые (со стороны рабочего зазора) пазы и укладываются в один ряд вдоль меньшей стороны сечения. Такая схема обеспечивает высокую механическую прочность и надёжность конструкции в целом. Для

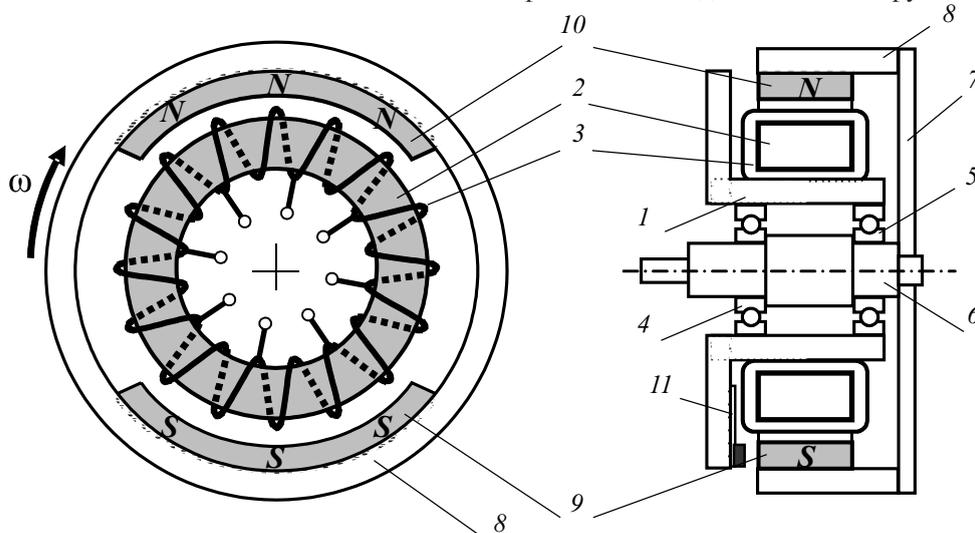


Рис. 1. Двигатель с кольцевой обмоткой якоря (малой мощности): 1 – втулка-фланец; 2, 3 – магнитопровод якоря с обмоткой; 4, 5 – подшипники; 6 – вал; 7 – несущий диск ротора; 8 – ярмо ротора; 9, 10 – постоянные магниты; 11 – датчик положения ротора

уменьшения вылета лобовых частей обмотку целесообразно выполнять проводом максимально плоского сечения, имеющего большую разность размеров проволоки по большей и меньшей сторонам (ГОСТ 434-78). Технология укладки предусматривает увеличение высоты прямоугольной части пазов, необходимое для поворота проводов на 90° при намотке катушек (рис. 2, размер b). Размер c включает общую высоту проводников секции, проводниковую и корпусную изоляцию, а также толщину прокладки на дне паза, если таковая устанавливается.

При формировании межкатушечных соединений в области лобовых частей применяется пайка (или сварка) продолжений катушечных сторон под углом 90° . В катушечные группы объединяются катушки, занимающие фазные зоны 60° , но возможно и формирование катушечных групп с фазными зонами 120° . Монтаж внутрифазных соединений в этом случае заметно упрощается, при несколько худшем использовании меди.

Значения чисел катушек в пазах w_k и в фазе w_ϕ связаны через ЭДС фазы и число пазов (зубцов) Z , в которые укладывается обмотка:

$$E_\phi = (1,07 \div 1,15)U_H = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_\phi k_{об} B_\delta \frac{\pi D^2 \lambda}{2p}; \quad (3)$$

$$w_k = \frac{w_\phi}{maZ} = ЦЧ \left[\frac{1}{maZ} \frac{\sqrt{2} E_\phi p}{\pi^2 f k_{об} B_\delta D^2 \lambda} \right], \quad (4)$$

где ЦЧ – целая часть; a – число параллельных ветвей.

Выбираются параметры сечений прямоугольного провода $a_{пр}$ и $b_{пр}$ соответственно по меньшей и большей сторонам. Высота катушечных сторон

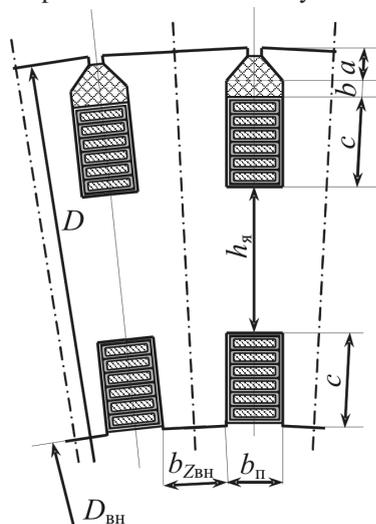


Рис. 2. Схема размещения проводов и изоляции кольцевой обмотки в пазах якоря

(размер c на рис. 2) зависит от размера прямоугольного провода по меньшей стороне сечения $a_{пр}$ и числа витков в пазу:

$$c = w_k a_{пр} \Delta_B + \Delta_k. \quad (5)$$

При определении внутреннего диаметра $D_{вн}$ рассчитывается радиальный размер яра $h_я$. С учетом баланса потоков в зазоре и в яре при индукции $B_я = 1,45 \div 1,55$ Тл радиальный размер яра

$$h_я = \frac{\pi D \alpha_\delta}{(1,45 \div 1,55) 4p} B_\delta = \frac{(0,5 \div 0,54) D \alpha_\delta}{p} B_\delta. \quad (6)$$

Тогда внутренний диаметр магнитопровода статора выражается через зависимость

$$D_{вн} = D \left(1 - \frac{0,654 \alpha_\delta B_\delta}{p} \right) - a - b - 2c. \quad (7)$$

Этот размер следует проверить на возможность размещения проводов выбранного сечения с изоляцией со стороны внутренней окружности магнитопровода $b_{п} = b_{пр} + \Delta_{из}$:

$$\pi D_{вн} \geq Z(b_{п} + b_{звн}), \quad (8)$$

где $\Delta_{из}$ – двусторонняя толщина витковой и корпусной изоляции, включая пропитку и технологический зазор на укладку; $b_{звн}$ – ширина зубцов на внутренней поверхности магнитопровода якоря. Минимальное значение этого размера зависит от условий надёжного механического крепления магнитопровода с обмоткой на втулке внутреннего якоря.

В случае невыполнения (8) следует пересчитать (5)–(7) для стандартного провода с другими размерами сечения.

Размер магнита в радиальном направлении намагничивания (толщина) увязывается с его способностью создавать магнитное поле с индукцией B_δ в рабочем зазоре при нагревом до рабочей температуры состояния машины.

Для определения толщины магнита используется примитивная модель, в схему замещения которой входят только последовательно соединённые линейные проводимости постоянного магнита, зазора с потоком рассеяния, учтённым посредством соответствующего коэффициента. В модели не учитывается влияние насыщения ферромагнитных участков магнитной цепи, кроме того, предполагается отсутствие влияния реакции якоря на поток постоянных магнитов [6].

Из уравнения, вытекающего из закона полного тока для этой схемы,

$$l_M H_{CB} = \frac{l_M H_{CB} B_\delta}{B_0} + \frac{4\delta B_\delta}{\mu_0 k_\sigma}, \quad (9)$$

где k_σ – коэффициент рассеяния потока магнитов, можно определить размер зазора δ , при котором создаётся принятое значение индукции в зазоре B_δ , если приравнять с некоторым коэффициентом запаса ($K_{\text{зап}}=1,1\div 1,15$) МДС магнитов и МДС обмотки:

$$H_{CB} l_M = K_{\text{зап}} \frac{m\sqrt{2}}{\pi r} w_\phi K_{\text{об}} I_H, \quad (10)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; H_{CB} – коэрцитивная сила материала постоянного магнита на кривой размагничивания по индукции, определённая для заданной рабочей температуры.

Результаты проекторочного расчёта статора с обмоткой:

Номинальный (потребный) момент на валу M , Н·м	20
Отношение активной длины к диаметру окружности якоря λ	1,11
Линейная нагрузка A , А/м	21000
Индукция в зазоре под полюсом B_δ , Тл	0,36
Число пазов (зубцов) магнитопровода якоря Z	24
Число витков в фазе w_ϕ	64
Диаметр магнитопровода D , м	0,180
Число витков в секции w_K	8
Провод ПММ, размеры сечения $a_{\text{пр}} \times b_{\text{пр}}$, мм	6,7x0,9
Радиальный размер яра статора $h_{\text{я}}$, мм	24,5
Плотность тока в обмотке j , А/мм ²	8
Номинальный ток фазы I_H , А	48
МДС обмотки $F_{\text{обм}}$, А	3110
Коэрцитивная сила (сплав КС-25 ДЦ, ГОСТ 21559-76) H_{CB} , А/мм	680
Толщина магнита l_M , мм	8,5
Воздушный зазор δ , мм	3,0
Наружный диаметр (внешнего ротора) D_p , мм	243

Для уменьшения внешнего диаметра, момента инерции и массы внешнего ротора, а также машины в целом толщину его стенки следует выбирать

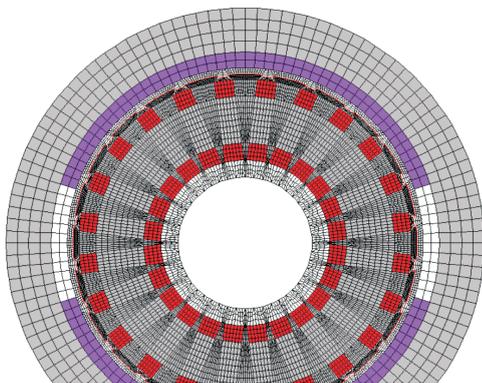


Рис. 3. Сеточная модель СДПМ с кольцевой обмоткой на внутреннем роторе

минимальной, определяемой по значению индукции в межполюсных промежутках (2,0–2,1 Тл).

Представленные результаты проектирования масштабной модели генератора для автономного блока преобразования энергии, проведённого по предлагаемой методике, – один из нескольких выполненных проектов.

Методика проектирования проверена на сеточной модели (рис. 3), синтезированной в программной среде ANSYS/APDL. Модель позволяет оперативно изменять геометрические параметры осевого сечения и обмоточные данные. Её расчётная область охватывает также цилиндрическое пространство внутри зубцовой зоны с нерабочими сторонами катушек.

Характеристики поля, рассчитанного с применением модели, использовались для определения электромагнитного момента в виде статических характеристик на периоде изменения, при различных значениях плотности тока, при произвольной начальной фазе фазных токов (рис. 4,а). Характери-

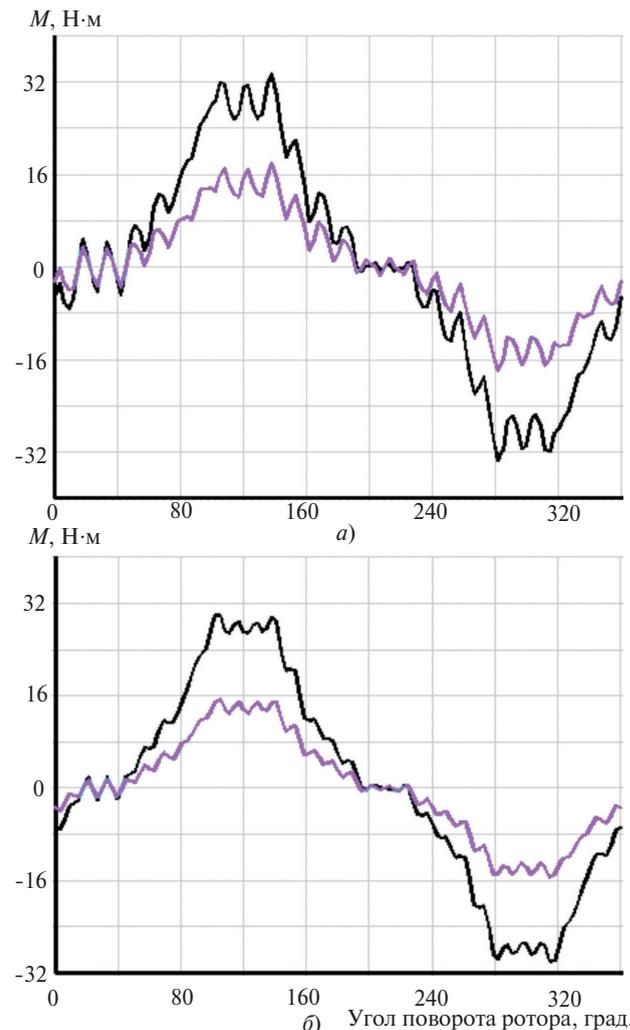


Рис. 4. Угловые (статические) характеристики машины при значениях $Z=24$ (а) и $Z=30$ (б) пазов обмотки якоря (при той же МДС)

стики – аналог угловых, но в них присутствуют составляющие момента, обусловленные зубчатостью статора, – построены при отличающихся в два раза значениях плотности тока в обмотке (8 и 4 А/мм²). По первому значению можно определить, что при кратности максимального момента 1,7 машина развивает мощность до 9,5 кВт. При этом достигается плотное (в отличие от лобовых частей барабанной обмотки) прилегание катушек к магнитопроводу практически по всему периметру, что существенно улучшает передачу тепла от обмотки к магнитопроводу, снижая вероятность локального перегрева отдельных частей изоляции катушек (как правило, изоляции лобовых частей).

Влияние зубцовых гармоник подавляется подбором длины полюсной дуги α_δ , коррекцией её в пределах одного зубцового деления статора по условию укладки проводников, сокращением относительной (по отношению к зазору) ширины открытия паза, увеличением числа пазов. Увеличение пазов с 24 до 30 в машине с параметрами, приведенными выше, при том же значении МДС позволяет уменьшить амплитуды зубцовых гармоник в несколько раз (рис. 4,б, размеры пазов уменьшены под размещение шести проводов сечением 6×1 мм в каждом пазу). В большинстве ситуаций практического применения вынужденные колебания ротора, обусловленные знакопеременными моментами от действия зубцовых гармоник, поглощаются приводом при работе на номинальных оборотах и оказывают лишь кратковременное влияние в процессе пуска.

Тактико-технические характеристики машины с кольцевой обмоткой и её аналога с барабанной обмоткой сопоставлены при разработке высокооборотного двигателя [7], предназначенного для работы в составе системы кондиционирования воздуха летательных аппаратов. Прототип с барабанной обмоткой и внешним ротором развивает вращающий момент от 1,74 до 1,84 Н·м при активной длине 140 мм и габаритной осевой длине 200 мм ($Z=18$, $\delta=1,5$ мм). Среднему значению момента 1,79 Н·м этого двигателя соответствует мощность 9 кВт, развиваемая на частоте вращения 48000 об/мин при плотности тока 9,12 А/мм². Расчёты показывают, что при тех же внешних габаритах аналог с кольцевой обмоткой развивает момент до 1,98 Н·м и мощ-

ность до 9,95 кВт за счёт увеличенной до 150 мм активной длины и лучших условий теплоотвода.

Выводы. 1. В двухполюсных магнитных системах магнитоэлектрических машин с развитым внешним диаметром использование кольцевой обмотки якоря может обеспечить ряд преимуществ перед аналогом – машиной с барабанной обмоткой.

2. Методика определения основных размеров кольцевого якоря при проектировании базируется на том же уравнении баланса электромагнитных и объёмно-моментных характеристик, выраженных через машинную постоянную, как и при проектировании других электрических машин.

3. Поверочные расчёты двигателей и генераторов, выполненные на сеточных моделях методом конечных элементов, подтверждают достоверность изложенной методики проектирования и возможность дальнейшего её использования для разработки электромеханических систем ответственных машин и механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рихтер Р. Электрические машины. Т. 1. Расчётные элементы общего назначения. Машины постоянного тока/Пер. с нем. под ред. Ю.С. Чечет. М.; Л.: Объединённое научно-техническое изд-во НТКП СССР. Главная редакция энергетической литературы, 1935, 598 с.
2. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч.1. М.: Энергия, 1972, 815 с.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1980, 928 с.
4. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. и др. Проектирование электрических машин: Учебное. пос. для вузов/Под ред. И.П.Копылова. М.: Энергия, 1980, 496 с.
5. Смирнов, А.Ю. Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (специальный курс): Учебное пос. для вузов. М.: Форум, 2015, 192 с.
6. Елифанов О.К., Оськин А.Б., Хрущёв В.В. Особенности проектирования униполярного индукторного моментного двигателя с осевым магнитным потоком постоянных магнитов. – Электротехника, 2007, № 7, с. 43–51.
7. Смирнов А.Ю. Проектирование высокооборотных генераторов большой мощности с постоянными магнитами на роторе. – Электричество, 2017, № 11, с. 40–45.

[29.10.2021]

А в т о р: Смирнов Александр Юрьевич – доктор техн. наук, профессор кафедры теоретической и общей электротехники Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) им. Р.Е.Алексева.



Designing of Permanent Magnet Machines with an Annular Armature Winding

SMIRNOV Alexander Yu. (Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russia) – Associate Professor, Professor of Theoretical and General Electronics Dept., Dr. Sci. (Eng.)

Design strategy of synchronous machines with annular armature winding and rotor placed PMs is discussing, which can provide advantages instead of general ones with drum armature winding in two-pole machine magnetic systems with developed outer diameter. The derivations between of stator bore volume, torque and electromagnetic loads via Magnetic constant (Arnold's), equations for linear load, for PMs magnetic conductivity in dependence from rated parameters of magnetically hard material, for phase's EMF. Slots filling by areas of rectangular wires and of coil and major insulation are taking into consideration. Numerical testing, executed via torque-angle (static) curves calculation by means of finite-element method, shows that the motors, that designed with appropriated torque multiplicity are satisfying to initial technical requirements, that is confirms methodic validity. During numerical testing tooth harmonics, provided by stator tooth structure, influence was evaluating and was given recommendations for reduction this influence. The results of power and torque characteristics comparison with traditional machine supplied by drum winding represented, which confirms capability of declared advantages receipt.

Key words: *synchronous machine, annular winding, armature, inductor, permanent magnet, tooth zone, electromagnetic torque, electromagnetic torque, finite-element method*

REFERENCES

1. **Rikhter R.** *Elektricheskiye mashiny. T. 1. Raschotnyye elementy obshchego naznacheniya. Mashiny postoyannogo toka/Per. s nem. pod red. Yu.S. Chechet* (Electric machines. T. 1. Design elements of general purpose. DC machines / Per. with him. ed. Yu.S. Chechet). M.; L.: Ob'yedinonnoye nauchno-tekhnicheskoye izd-vo NTKP SSSR. Glavnaya redaktsiya energeticheskoy literatury, 1935, 598 p.
2. **Kostenko M.P., Piotrovskiy L.M.** *Elektricheskiye mashiny. CH.1* (Electric cars. Part 1). M.: Energiya, 1972, 815 p.
3. **Ivanov-Smolenskiy A.V.** *Elektricheskiye mashiny: Uchebnyk dlya vuzov* (Electric machines: Textbook for universities). M.: Energiya, 1980, 928 p.
4. **Kopylov I.P., Goryainov F.A., Klokov B.K. et al.** *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin: Uchebnoye. pos. dlya vuzov/Pod red. I.P.Kopylova* (Design of electrical machines: training. pos. for universities/Ed. I.P. Kopylov). M.: Energiya, 1980, 496 p.
5. **Smirnov A.Yu.** *Induktornyye mashiny. Proyektirovaniye i vychislitel'nyy analiz (spetsial'nyy kurs): Uchebnoye pos. dlya vuzov* (Induction machines. Design and computational analysis (special course): Educational settlement. for universities). M.: Forum, 2015, 192 p.
6. **Yepifanov O.K., Os'kin A.B., Khrushchov V.V.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2007, No. 7, pp. 43–51.
7. **Smirnov, A.Yu.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 11, pp. 40–45.

[29.10.2021]