

УДК 62-83:621.313

А.Ю. Смирнов ¹, Е.Н. Александрова ²,
А.О. Кашканов ³, А.А. Кралин ²

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ НА ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКЕ

¹ Опытное конструкторское Бюро Машиностроения
им. И.И. Африкантова

² Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

³ Волжский государственный университет водного транспорта

Описывается конструкция синхронной машины, в которой осуществляется электромеханическое преобразование энергии на третьей гармонике поля в зазоре, созданном многофазной обмоткой статора. По сравнению с образцом, в котором обеспечивается преобразование энергии на зубцовой гармонике, данная машина обеспечивает большее быстродействие и меньшие потери. Рассмотрены конструкции с двухполюсной и четырехполюсной обмоткой якоря, расположенные на восьми явно выраженных полюсах статора и ротором с постоянными магнитами. Изложен подход к проектированию на основе машинной постоянной Арнольда. Для экспериментальной проверки возможности работы синхронной машины на третьей гармонике изготовлен двигатель с одним статором и двумя вариантами роторов: с шестью и с двенадцатью полюсами с постоянными магнитами, работающими, соответственно, при двухполюсном и четырёхполюсном полях обмотки статора. Роторы собраны из восьми секций с кольцевым постоянным магнитом из феррита бария, с наружным диаметром 120 мм, внутренним 30 мм и осевой длиной 12 мм, намагниченным в осевом направлении, и двумя когтеобразными магнитопроводами, образующими полюса чередующейся полярности в каждой секции. В процессе экспериментальных исследований получены статические и предельные механические характеристики двигателя с обоими вариантами роторов, на основе чего подтверждена работоспособность двигателя.

Ключевые слова: высшие гармоники, индуктор, индукторная машина, обмотка якоря, обмоточный коэффициент, постоянный магнит, синхронный двигатель, статор, шаговый привод.

1. Введение

В системах точного позиционирования регулирующих органов получили применение синхронные двигатели индукторного типа, электро-механическое преобразование энергии в которых осуществляется не на первой, а на одной из зубцовых гармоник [1]. Физически это означает, что при полном обороте магнитного поля в зазоре, созданного многофазной обмоткой якоря (статора), ротор поворачивается не на 360° , а на одно зубцовое деление, т.е. на $360/Z$. За счет этой электромагнитной редукции обеспечивается высокая точность перемещения ротора в заданное положение, особенно в дискретном (шаговом) приводе [2]. Однако при такой конструкции машины для обеспечения приемлемой скорости вращения ротора и быстродействия механизма приходится существенно увеличивать выходную частоту преобразователя. Это вызывает рост магнитных потерь (потерь холостого хода) в двигателе и коммутационных потерь в ключах преобразователя.

II. Материалы и методы

Для расширения диапазона рабочих скоростей привода без увеличения частоты питания двигателя иногда целесообразно исключить развитые зубчатые структуры на роторе и на статоре. Сохранить достаточное для точности позиционирования число устойчивых положений ротора на оборот и обеспечить быстродействие привода в некоторых случаях можно за счет отказа от преобразования энергии на зубцовой гармонике магнитного поля в зазоре, и использовать одну из высших гармоник, в частности, третью [3]. Тогда одному обороту поля в такой машине будет соответствовать фактический поворот ротора на 120 электрических градусов, т.е. $120/p$ геометрических.

При этом индукторная машина может быть переменного-полусной, т.е. ее обмотка должна образовывать по окружности зазора полюса чередующейся полярности. Схему обмотки целесообразно изменить таким образом, чтобы обеспечить приемлемый обмоточный коэффициент для соответствующей высшей рабочей гармоники, т.е. третьей, и уменьшение обмоточного коэффициента по первой гармонике. Это требование целесообразно выполнить при использовании катушек с минимальным шагом по пазам, т.е. равным зубцовому делению ($\gamma = 1$). Оно приближает шаг по рабочей высшей гармонике к диаметральному шагу и позволяет сохранить преимущества по компоновке лобовых частей и статора в целом. При ограниченном количестве пазов, их число на полюс и фазу q не может быть большим. Допустимо дробное его значение, в том числе меньше единицы ($q < 1$), с числом зубцов магнитопровода якоря на 20-30 % большим или меньшим числа полюсов (рис. 1, а и б, соответственно). Применение дробных обмоток, как известно, позволяет повышать порядки зубцовых

гармонических электродвижущих сил (ЭДС) и улучшать за счет этого форму результирующей кривой потока в зазоре.

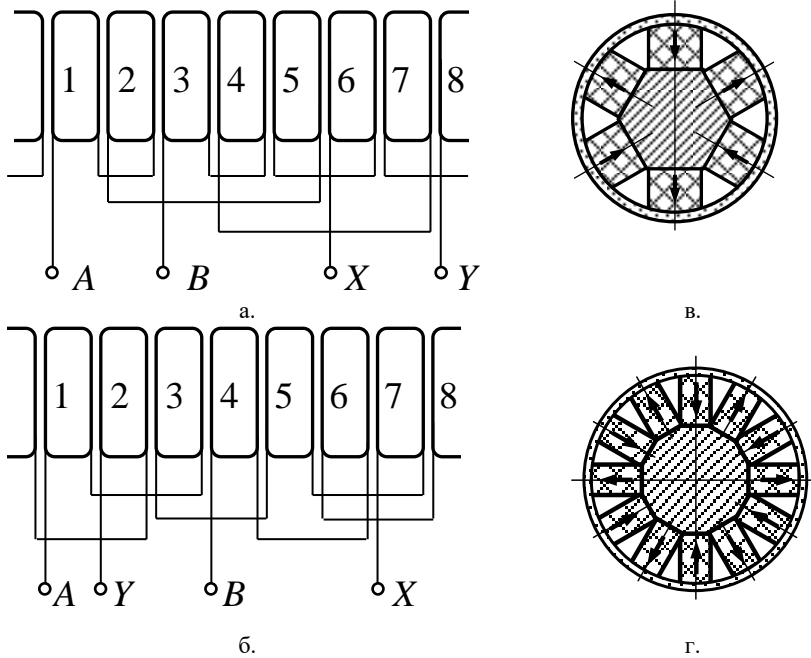


Рис. 1. Схема обмотки якоря и конструкции магнитоэлектрического индуктора для работы на третьей гармонике поля

Обмотка машины (рис. 1, а) создает двухполюсное вращающееся магнитное поле по первой гармонике и комплектуется шестиполюсным магнитоэлектрическим индуктором на роторе (рис. 1, в) [4]. Обмотка на рис. 1, б создает четырехполюсное вращающееся магнитное поле по первой гармонике и комплектуется двенадцатиполюсным индуктором (рис. 1, г). Обмотки имеют нечетный знаменатель дробности $q = \frac{2}{3}$ и $q = \frac{1}{3}$ и не содержат гармоник четных порядков. Первая из них обеспечивает подавление полей первой и зубцовых гармоник, увеличивая долю третьей гармоники в общей магнитодвижущей силе (МДС), а параметры второй (рис. 1, б) для этих гармоник идентичны (табл. 1). Обмоточный коэффициент дробных обмоток определен путем построения многоугольников МДС – диаграмм Гергеса [5].

Таблица 1.
Значения коэффициентов укорочения
и обмоточных коэффициентов для обмоток машины

Наименование параметра	Значение в схемах:	
	рис. 1, а	рис. 1, б
Коэффициент укорочения:		
• по первой гармонике	0,3830	0,7071
• по рабочей гармонике ($v = 3$)	0,9240	0,7071
Обмоточный коэффициент:		
• по первой гармонике	0,1464	0,7071
• по рабочей гармонике	0,8535	0,7071

III. Магнитоэлектрическая машина с преобразованием энергии на третьей гармонике

Анализируя возможные конструкции переменного-полюсных магнитоэлектрических машин с возбуждением со стороны ротора, для работы на высших гармониках МДС можно рекомендовать следующие магнитные системы:

- индуктор с составным звездообразным магнитопроводом (рис. 1, в, г);
- индуктор с когтеобразным магнитопроводом как наиболее технологичный (на рис. 2, шестиполюсный вариант, показаны две секции из нескольких такого ротора).

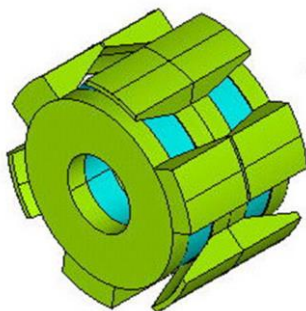


Рис. 2. Ротор переменного-полюсного синхронного двигателя с преобразованием энергии на третьей гармонике

При использовании ферритов, коэрцитивная сила по индукции H_{CB} которых обычно находится в пределах 200-300 кА/м, в машинах с зубчатым статором следует выбирать зазор δ не менее $1/10 \div 1/15$ зубцового деления статора t_z . Влияние повышенного магнитного сопротивления зазора при этом в значительной мере сглаживается магнитным сопротивле-

нием собственно постоянных магнитов, весьма большим в упомянутых группах магнитотвердых материалов.

Магниты критической и закритической групп обладают прямолинейной характеристикой размагничивания по индукции [6]. Максимум их удельной магнитной энергии приходится на середину прямой магнитного возврата, которая совпадает с характеристикой размагничивания, поэтому индукцию в зазоре целесообразно предварительно выбрать, исходя из соотношения:

$$B_{\delta} = K_{\text{пм}} \cdot \frac{B_r}{2}, \quad (1)$$

где B_r – паспортное значение остаточной индукции магнитотвердого материала, $K_{\text{пм}}$ – коэффициент, определяемый отношением площади магнитов к площади полюсных наконечников ротора у зазора: для ротора (индуктора) с составным звездообразным магнитопроводом без полюсных наконечников $K_{\text{пм}} = 1$. При наличии полюсных наконечников и для индуктора с участками локального насыщения на границах полюсных делений $K_{\text{пм}} = 0,85 \div 0,95$.

При проектировании тахогенераторов и генераторов с емкостной стабилизацией фазное напряжение и ЭДС можно приравнять:

$$E_0 = U_{\text{ном}}. \quad (2)$$

Тогда диаметр ротора и число витков в фазе окажутся связанными между собой зависимостью:

$$D^2 = \frac{p \cdot U_{\text{ном}}}{1,11 \cdot \pi \cdot K_{\text{пм}} \cdot \alpha_{\delta} \cdot \lambda \cdot \nu \cdot f \cdot K_{\text{обв}} \cdot w_1 \cdot B_r}, \quad (3)$$

где ν – номер рабочей гармоники, p – число пар полюсов индуктора, f – частота сети, α_{δ} – расчётный коэффициент полюсного перекрытия, λ – отношение диаметра ротора к аксиальной длине зазора, $K_{\text{обв}}$ – обмоточный коэффициент для рабочей гармоники, w_1 – число витков фазы обмотки якоря. Зависимость (3) вытекает из уравнения для ЭДС фазы обмотки:

$$E_0 = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot \nu \cdot f \cdot w_1 \cdot K_{\text{обв}} \cdot \Phi_m, \quad (4)$$

где Φ_m – полный поток возбуждения (на один полюс магнитной системы ротора):

$$\Phi_m = K_{\text{пм}} \cdot \frac{B_r}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \lambda \cdot \alpha_\delta}{2 \cdot p}. \quad (5)$$

Манипулируя отношением λ , можно определиться с базисными размерами с учетом возможных ограничений. Одним из ограничений является условие размещения магнитов внутри окружности ротора с диаметром D , обеспечивающих необходимую линейную нагрузку A . Во избежание размагничивания она должна несколько превышать таковую со стороны статора при максимально возможном токе якоря в условиях воздействия эксплуатационных перегрузок по току:

$$A = \frac{2 \cdot p \cdot H_{\text{св}} \cdot l_m \cdot K_{\text{зм}}}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot m \cdot w_1 \cdot I_{\text{max}}}{\pi \cdot (D + 2 \cdot \delta)}, \quad (6)$$

где $H_{\text{св}}$ – коэрцитивная сила магнитотвёрдого материала по индукции, l_m – общая длина магнитов с полюсными наконечниками (если они присутствуют) в направлении одной силовой линии поля возбуждения, p – число пар полюсов, образованных магнитами индуктора на роторе ($p = v \cdot p_1$), I_{max} – амплитуда максимального тока фазы обмотки якоря при протекании форсированных токов (в двигателе) или тока ударного короткого замыкания (в генераторе), $K_{\text{зм}}$ – коэффициент запаса МДС магнитов индуктора, принимаемый для обеспечения их устойчивости к размагничиванию меньшим единицы на 5-10 %.

Линейную нагрузку следует связать с требуемым моментом или мощностью через известные соотношения для машинной постоянной (Арнольда) [7]:

$$C_A = \frac{D^3 \cdot \Omega}{\lambda \cdot P} = \frac{2}{\pi \cdot \alpha_\delta \cdot K_B \cdot K_{\text{овн}} \cdot A \cdot B_\delta}, \quad (7)$$

где Ω – синхронная частота вращения (в радианах в секунду); P – расчетная мощность (в Ваттах), K_B – коэффициент формы поля, $K_B = 1,11$.

Из совместного решения (3), (6) и (7) определяются размеры и параметры D , λ , l_m , w_1 . С учётом этой процедуры можно предложить достаточно универсальный алгоритм проектирования магнитоэлектрических машин, область применения которого распространяется на любые магнит-

ные системы ротора с прямолинейной характеристикой размагничивания магнитов. Сначала выбираются схема обмотки якоря и конструктивная схема индуктора с постоянными магнитами на роторе, а также марка магнитов. Сделанный выбор определяет значения $K_{обв}$, $K_{пм}$, $H_{СВ}$, B_r , а значит, и B_{δ} . Расчетные мощность P или момент $M = P/\Omega$ зависят от соответствующих номинальных величин, которые являются исходными данными технического задания. Максимальный фазный ток I_{max} в цепи якоря определяется параметрами используемого преобразователя или пускозащитной аппаратуры.

После совместного решения (3), (6) и (7) по линейной нагрузке и назначенной плотности тока вычисляются пазовая МДС $F_{паза}$, необходимая для получения требуемых значений расчётной мощности или момента и площадь $S_{пр}$, занятая проводами обмотки в пазу:

$$F_{паза} = \frac{\pi \cdot D \cdot A \cdot K_n}{Z_1}; \quad (8)$$

$$S_{пр} = \frac{4 \cdot d_{из}^2 \cdot F_{паза}}{\pi \cdot d_r^2 \cdot K_3 \cdot j}, \quad (9)$$

где K_n – коэффициент насыщения. В силу присутствия в магнитной цепи линейных проводимостей высококоэрцитивных магнитов с проницаемостью близкой к магнитной проницаемости воздуха, этот коэффициент весьма близок к единице. Z_1 – число пазов обмотки якоря, установленное на стадии выбора её схемы, $d_{из}$ – диаметр изолированного обмоточного провода, d_r – его диаметр без изоляции, K_3 – коэффициент заполнения проводниками свободной от изоляции площади пазы, принимаемый в соответствии с рекомендациями, принятыми для всыпных или катушечных обмоток электрических машин [8], j – плотность тока в обмотке, соответствующая номинальному току якоря. Далее, с учетом формы пазов статора и спецификацию изоляции в них, определяется радиальная длина обмотанной части зубцов статора $h_{обм}$, в виде корня квадратного уравнения [9]:

$$h_{обм} = \frac{1}{a} \cdot \left(-\frac{b}{2} + \sqrt{\frac{b^2}{4} - a \cdot c} \right) \quad (10)$$

Коэффициенты a , b и c представляют собой соответственно квадратичную, линейную и независимую функции площади проводов и изоляции в пазу от его высоты. После решения (10) определяются высота пазов и зубцов, радиальный размер ярма и внешний диаметр.

IV. Результаты экспериментов

Экспериментальные статические характеристики двигателя с преобразованием энергии на третьей гармонике, полученные при различных значениях тока в двух соседних фазах двигателя, от 0,4 до 1,2 номинального тока, показаны на рис. 3. Статическая характеристика – форма угловой характеристики синхронной машины. Она определяет, как изменяется ее электромагнитный момент при отклонении угла поворота ротора от оси неподвижного поля статора, созданного при одном из дискретных сочетаний уровней тока в фазах обмотки якоря.

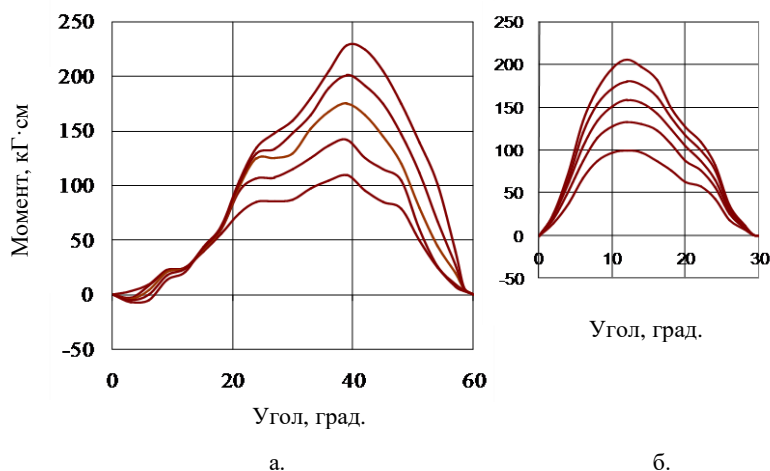


Рис. 3. Угловые (статические) характеристики переменного-полюсного индукторного двигателя с преобразованием энергии на третьей гармонике при двух- (а) и четырех- (б) полюсном поле якоря

Длина активной части испытанного двигателя составляла 195 мм, диаметр расточки – 90 мм, наружный диаметр – 215 мм. Ротор собран из восьми секций с когтеобразными магнитопроводами, расположенными по обеим сторонам кольцевого постоянного магнита из феррита бария марки 16БА190, намагниченного в осевом направлении (на рис. 2 – шестиполюсный вариант, изображены две секции из восьми). Размеры кольцевого магнита: $\varnothing 70 \times \varnothing 30 \times 12$ мм. Предельные механические характеристики показывают, как изменяется электромагнитный момент шагового двигателя с увеличением частоты переключений. Фазовый сдвиг между током и ЭДС для этих характеристик соответствует предельному углу нагрузки $\Theta = \pi/2$.

На рис. 4 показаны предельные механические характеристики индукторного двигателя с преобразованием энергии на третьей гармонике

поля якоря, с двух- (кривые 1 и 2, при различных вариантах схемы соединения катушек в фазах) и четырех- (кривые 3) полюсным полем по первой гармонике. Кривые получены при питании от источника номинального (сплошные линии) и половины от номинального (пунктирные линии) напряжения.

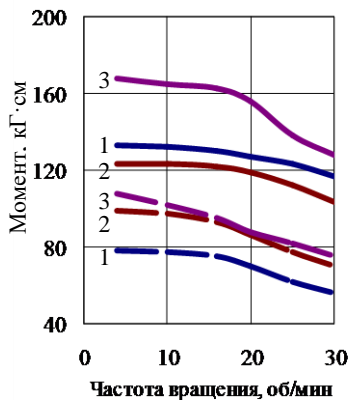


Рис. 4. Предельные механические характеристики двигателей с преобразованием энергии на третьей гармонике в шаговом приводе

V. Выводы

Несмотря на меньший момент по угловым характеристикам (рис. 3), двигатель с двенадцатиполюсным ротором и схемой обмотки якоря (рис. 1, г) обеспечивает более высокие моментные показатели. Это можно объяснить наложением реактивных моментов. При этом дискретность – число устойчивых положений ротора на оборот при переключении фаз обмотки, у этого варианта в два раза выше, чем у варианта с шестиполюсным ротором.

Таким образом, экспериментально проверена и подтверждена работоспособность синхронного двигателя с преобразованием энергии на третьей гармонике поля якоря. Благодаря увеличенному в три раза количеству устойчивых положений на оборот, такая машина может быть использована в шаговом приводе систем автоматизации с повышенными требованиями к точности позиционирования регулирующих органов [9, 10].

© Смирнов А.Ю., 2019

© Александрова Е.Н., 2019

© Кашканов А.О., 2019

© Кралин А.А., 2019

Библиографический список

- [1] Смирнов А.Ю. Анализ магнитоэлектрических машин с преобразованием энергии на высшей гармонике поля якоря // Электричество. 2014. № 9. С. 60-65.
- [2] Чиликин М.Г. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями. М.: Энергия, 1971. – 624 с.
- [3] Смирнов А.Ю., Зимин А.Ю. Проектирование одноимённо-полюсных индукторных двигателей с постоянными магнитами на роторе // Электричество. 2015. № 2. С. 54-59.
- [4] Смирнов А.Ю. Силовые электрические машины систем автоматизации энергетических установок: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук, Москва, 2007. – 39 с.
- [5] Попов В.И., Петров Ю.Н. Трёхфазные, специальные и совмещённые обмотки электрических машин переменного тока (основы теории и расчётов). Н. Новгород: Изд-во ВПИ, 1995. – 339 с.
- [6] Смирнов А.Ю. Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (специальный курс). М.: Форум, 2015. – 192 с.
- [7] Копылов И.П. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1980. – 496 с.
- [8] Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 400 с.
- [9] Юркевич, Г.П. Системы управления энергетическими реакторами. М.: ЭЛЕКС-КМ, 2001. – 344 с.
- [10] Емельянов И.Я., Воскобойников В.В., Масленок Б.А. Основы конструирования исполнительных механизмов управления ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 232 с.

**A.Yu. Smirnov¹, E.N. Aleksandrova²,
A.O. Kashkanov³, A.A. Kralin²**

**DEVELOPMENT AND TESTING
OF MAGNETOELECTRIC MACHINE WITH ENERGY
CONVERSION ON THIRD HARMONIC**

¹ Africantov Experimental Design Bureau for Mechanical Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

² Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

³ Volga State Academy of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The design of synchronous motor with energy conversion on the third harmonic of armature field in air gap, produced by multiphase stator winding, is describing. In comparison with machine on toothed harmonics of field energy conversion, this one provides more operation speed and smaller losses. Devices with two poles and with

four poles of armature winding on eight salient-pole stator and permanent magnet rotor examined. The approach to design this machines on the base of machine constant (Arnolds) is developed. To experimental test of operating availability synchronous machine with the third harmonic, motor with one stator and two various rotors: with twelve poles manufactured, for operating near two and four stator pole, accordingly. Rotors aggregated from eight sections with annular permanent magnet with outer diameter 70 mm, inner 30 mm and axial length 12 mm from barium ferrite material, magnetized in axial direction, and two claw-shaped magnetic wires, formed poles of alternate polarity. In duration of experimental searches the static and overall mechanic characteristics was received, vindicated operability of motor.

Keywords: armature winding, high harmonics, inductor machine, permanent magnet, rotor, stator, step drive, synchronous motor, winding coefficient.

References

- [1] A.Yu. Smirnov, «Magnetolectric machines with energy conversion at a higher harmonic component of armature field and their analysis», *Electrichestvo*, vol. 9, pp. 60-65, 2014.
- [2] M.G. Chilikin, *Diskretnyy elektroprivod s shagovymi dvigatelyami*. Moscow: Energiya, 1971 (in Russian).
- [3] A.Yu. Smirnov and A.Yu. Zimin, «Designing homopolar inductor motors with permanent magnets on the rotor», *Electrichestvo*, vol. 2, pp. 54-59, 2015.
- [4] A.Yu. Smirnov, «*Silovyye elektricheskiye mashiny sistem avtomatiki energeticheskikh ustanovok*», Cand. of Tech. S., thesis, Moscow, Russia, 2007 (in Russian).
- [5] V.I. Popov and Yu.N. Petrov, *Trokhfaznyye, spetsial'nyye i sovmeshchonnyye obmotki elektricheskikh mashin peremennogo toka (osnovy teorii i raschyotov)*. Nizhny Novgorod: VIPI, 1995 (in Russian).
- [6] A.Yu. Smirnov, *Induktornye mashiny. Proektirovanie i vychislitel'nyy analiz (spetsial'nyy kurs)*. Moscow: Forum, 2015 (in Russian).
- [7] I.P. Kopylov, *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin*. Moscow: Energiya, 1980 (in Russian).
- [8] G.K. Gerve, *Obmotki elektricheskikh mashin*. St. Petersburg: Ergoatomizdat, 1989 (in Russian).
- [9] G.P. Yurcevitsh, *Sistemy upravleniya energeticheskimi reaktorami*. Moscow: Publisher "ELEKS – KM", 2001 (in Russian).
- [10] I.Ya. Emel'yanov, V.V. Voskoboinikov and B.A. Maslenok, *Osnovy konstruirovaniya ispolnitel'nykh mekhanizmov upravleniya yadernykh reaktorov*. Moscow: Ergoatomizdat, 1987 (in Russian).