

Исследование и анализ электромагнитных систем с постоянным потокосцеплением с помощью физической модели

С. Н. Запольских

кандидат технических наук, доцент, Вятский государственный университет.
Россия, г. Киров. ORCID: 0000-0001-5042-6403. E-mail: zapose8@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены основные принципы работы систем с индуктивными накопителями энергии, в которых вначале происходит предварительное накопление магнитной энергии, а затем преобразование ее в другие виды энергии при постоянном потокосцеплении, для таких систем упрощается конструкция и повышаются энергетические показатели. В настоящее время элементная база и микропроцессорные технологии достигли достаточно высокого уровня, чтобы в полном объеме осуществить практическое применение такого принципа преобразования энергий и проводить исследования электромагнитных систем с постоянным потокосцеплением. Рассматривается физическая модель, в которой дифференциальные и интегральные уравнения, описывающие физические процессы, происходящие в системах с постоянным потокосцеплением, решаются аналитическими методами. Полученные результаты подтверждают повышение энергетических характеристик. Такие исследования на физической модели необходимы для разработки последующих более точных численных математических моделей и для изучения электромагнитных систем с постоянным потокосцеплением. Результаты работы также могут быть использованы в учебных целях.

Ключевые слова: электромеханические системы, моделирование, накопители магнитной энергии, системы с постоянным потокосцеплением.

Современные возможности управления и появление мощной и быстродействующей коммутационной техники способствует исследованию и разработке систем с предварительным накоплением магнитной энергии или с индуктивными накопителями энергии, работающих при постоянном потокосцеплении. В таких электромагнитных системах необходимы переключения больших электрических токов с высокой частотой. Современная элементная база позволяет осуществить такой режим работы. Это подтверждает бурное развитие инверторных источников питания, которые сделали, по сути дела, революцию в сварочном производстве, позволив уменьшить размеры и повысить мощность сварочных источников благодаря повышению частоты понижающих трансформаторов до 10^5 Гц с помощью коммутирующих элементов. Кроме того, коммутирующие элементы в сварочных инверторах хорошо управляются микропроцессорами, что позволило настраивать огромное количество различных режимов сварки. Современные коммутирующие элементы передают мощность порядка 10 кВт (один транзистор) и обеспечивают частоту коммутации 75 кГц, разрабатываются приборы с более высокими характеристиками. Такие достижения наблюдаются наряду с применением современных математических пакетов программ высокого уровня типа MathCAD, позволяющих записывать математические выражения в привычном виде, как принято в математической, физической и технической литературе. Это позволяет не тратить время на составление рутинных расчетных выражений и алгоритмов, а прямо физические формулы, уравнения и любые другие выражения последовательно записывать в программы численных моделей. Такие пакеты полезны для обучения студентов и помогут значительно продвинуться в численном моделировании, там, где необходимо использование дифференциальных и интегральных уравнений, в частности при разработке электромагнитных систем с постоянным потокосцеплением.

В электромеханических преобразователях и трансформаторах мощности магнитное поле и основная магнитная энергия создаются в рабочих немагнитных зазорах, и через эту магнитную энергию согласно современным представлениям осуществляются энергетические преобразования. Электрическая энергия источников питания электрических двигателей преобразуется в магнитную и механическую энергию. В электрических генераторах механическая энергия привода преобразуется в магнитную и электрическую энергию нагрузки. В традиционных машинах такое преобразо-

вание осуществляется одновременно. Например, в электрических генераторах нагрузка остается подключенной к обмотке в течение всего цикла работы, а механическая энергия привода преобразуется в магнитную энергию, которая одновременно преобразуется в электрическую энергию нагрузки. Системы с индуктивными накопителями энергии с предварительным накоплением магнитной энергии, работающие при постоянном потокосцеплении, отличаются тем, что преобразование энергий в них разделяется во времени. Вначале происходит накопление магнитной энергии, а затем преобразование ее в другие виды энергии.

Теория энергопреобразования в электромагнитных двигателях принадлежит русским ученым Н. П. Ряшенцеву и В. Н. Ряшенцеву (1985 г.) [5]. Они показали, что для повышения эффективности преобразования энергии электромагнитных двигателей необходимо: во-первых, уменьшить начальную индуктивность, во-вторых, проводить энергопреобразование при постоянном потокосцеплении. Способ энергопреобразования при постоянном потокосцеплении в электромагнитной машине может быть реализован следующим образом: в крайнем положении вторичной части при минимальной индуктивности или максимальном магнитном сопротивлении рабочих зазоров к обмотке подключается источник питания. Когда накопится достаточное количество магнитной энергии в рабочих зазорах, источник питания отключается, а обмотка замыкается накоротко. Далее происходит процесс преобразования накопленной магнитной энергии в работу электромагнитной силы. Было показано, что для таких систем работа электромагнитной силы определяется выражением

$$W = \frac{\Psi^2}{2} \left(\frac{1}{L_0} - \frac{1}{L_m} \right), \quad (1)$$

где Ψ – потокосцепление, L_0 и L_m – индуктивность в начале такта при максимальном магнитном сопротивлении и в конце такта при минимальном магнитном сопротивлении в рабочих зазорах.

Согласно этому выражению, может быть преобразована очень большая энергия.

Принцип преобразования энергии при постоянном потокосцеплении впервые на практике был реализован тоже русскими учеными и инженерами, среди которых Н. П. Ряшенцев, Г. Г. Угаров и А. В. Львицын (1989 г.) в линейных электромагнитных двигателях с удержанием якоря [4]. В таких двигателях осуществляется искусственная задержка якоря на этапе трогания якоря, когда магнитное сопротивление в рабочих зазорах максимальное или индуктивность обмотки минимальная, другим небольшим электромагнитом. В результате этого повышается электрический ток и накапливается магнитная энергия. Для такого двигателя было получено повышение энергии удара в четыре раза, а повышение КПД более чем в два раза.

Современные достижения в технике позволяют разрабатывать электромагнитные системы с постоянным потокосцеплением в направлении схемных решений с использованием мощных и быстродействующих коммутирующих элементов, управляемых по сигналам датчиков положения вторичной части или датчиков, выполняющих их функцию, управляемых микропроцессором.

Целью работы является оценка возможностей электромагнитных систем, работающих в режиме с постоянным потокосцеплением с помощью физической модели, для которой были бы учтены основные свойства объекта, а решения дифференциальных и интегральных уравнений физических процессов получены в аналитическом виде. Другой целью является получение информации о системах с постоянным потокосцеплением для разработки последующих программ численных моделей. Такая модель также должна быть полезной и являться основой для построения различных типов электромеханических устройств, включая электрические машины постоянного тока и асинхронные двигатели, работающие в режиме постоянного потокосцепления. Моделирование на физических моделях и моделирование на численных моделях требует более глубокого знания и понимания физических законов и математики, как и любое другое программирование в первую очередь требует знания и понимания самого объекта программирования.

Конструктивной основой модели взят электромагнитный двигатель (рис. 1а). Такое электромеханическое устройство также может работать в режиме электрического генератора. Из таких элементов могут быть построены электрические двигатели или генераторы непрерывного вращательного и линейного движения.

Уравнения, описывающие электромагнитные процессы, представлены известным уравнением электрической цепи

$$iR = U(x) - \frac{d\Psi}{dt} \quad (2)$$

и уравнения магнитной цепи (рис. 1б)

$$R_M(x, \Phi)\Phi = (R_{M\delta}(x) + R_{MM}(\Phi))\Phi = wi, \quad (3)$$

где $U(x)$ – напряжение на зажимах обмотки; i – электрический ток; $\Psi = w\Phi$ – потокосцепление; w – число витков; Φ – магнитный поток; R – активное сопротивление; $R_M(x, \Phi)$ – полное магнитное сопротивление; $R_{M\delta}(x)$ – магнитное сопротивление рабочих зазоров, $R_{MM}(\Phi)$ – магнитное сопротивление стальных сердечников магнитной цепи.

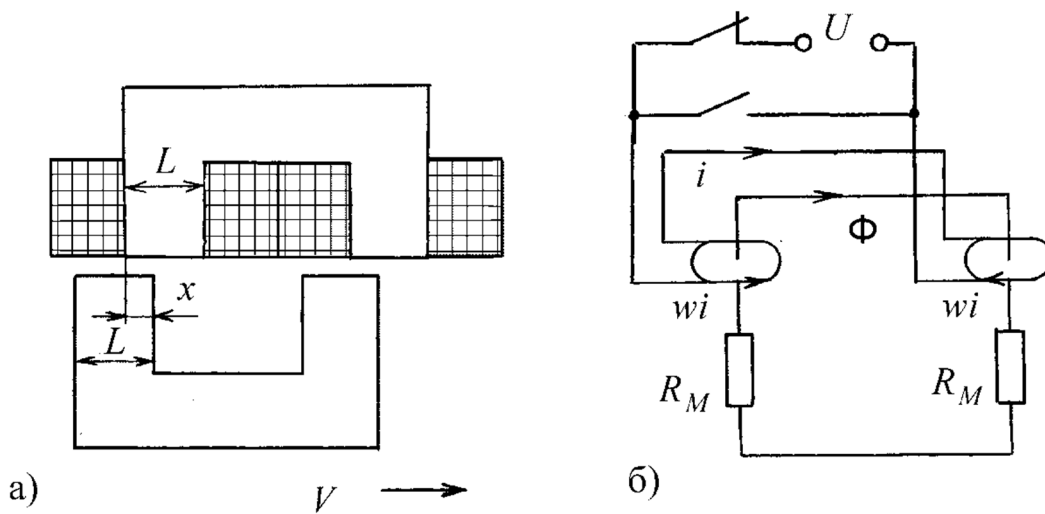


Рис. 1. Электромагнитный двигатель: а – конструктивная схема; б – эквивалентные схемы электрической и магнитной цепей

Уравнение (3) является следствием закона полного тока

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_{k=1}^N i_k, \tag{4}$$

где \vec{H} – напряженность магнитного поля; L – замкнутый контур интегрирования, охватывающий токи i_k .

Чтобы получить решение системы уравнений (2) и (3), в аналитическом виде пренебрегается потерями в обмотках и магнитном материале сердечников. Кроме того, скорость движения V вторичной части считаем постоянной, а магнитное сопротивление в рабочих зазорах – линейной функцией перемещения x и времени t :

$$R_M = R_{M0} \left(1 - \frac{x}{L} \right) = R_{M0} \left(1 - \frac{t}{T} \right), \tag{5}$$

где R_{M0} – магнитное сопротивление рабочих зазоров в начальном положении вторичной части при максимальном магнитном сопротивлении, L – длина полюсов; T – длительность такта.

Напряжение задается в виде импульса длительностью t_p и амплитудой U_p . Режим работы $t_p \rightarrow 0$ соответствует импульсному режиму работы с накоплением магнитной энергии в начале такта и энергопреобразованию при постоянном потокосцеплении. Режим $t_p = T$ характеризует традиционный режим работы двигателя, с непрерывной подачей энергии от источника питания.

Из уравнений (2) и (3) получены выражения для магнитного потока и электрического тока:

$$\Phi = \begin{cases} \frac{\Phi_{\max}}{t_H} t \text{ нпу } t \leq t_H \\ \Phi_{\max} \text{ нпу } t_H < t \leq T \end{cases}; \tag{6}$$

$$i = \begin{cases} \frac{R_M \Phi_{\max}}{wt_H} t \text{ нпу } t \leq t_H \\ \frac{R_M \Phi_{\max}}{w} \text{ нпу } t_H < t \leq T \end{cases}. \tag{7}$$

Магнитный поток ограничен из-за насыщения магнитного материала сердечников:

$$\Phi \leq \Phi_{\max} = B_{\text{нас}} S_{\min}, \quad (8)$$

где $B_{\text{нас}}$ – индукция магнитного поля, соответствующая магнитному насыщению в самом узком сечении стальных сердечников S_{\min} .

Выражение для амплитуды импульса напряжения получено из уравнения (2).

$$U = \frac{2w\Phi_{\max}}{t_p}. \quad (9)$$

Из этого уравнения следует, что при уменьшении длительности импульса напряжения его амплитуда увеличивается. Параметры импульса напряжения: длительность и амплитуда, так как они связаны с магнитным потоком, могут быть использованы для изменения магнитного потока в стальных сердечниках и для управления, таким образом, мощностью и частотой работы двигателями в системах управления с обратной связью. В качестве датчика обратной связи в этом случае может использоваться обычная обмотка из тонкого провода, расположенная вплотную на одном из стальных сердечников, магнитный поток в котором может рассчитываться по формуле (2). Для выявления других параметров автоматического управления в системах с обратной связью необходимо проводить еще исследования, которые как раз и можно будет осуществить с помощью информации, полученной с помощью разрабатываемых физических и численных математических моделей.

Баланс энергий в виде бесконечно малых величин в общем виде, согласно (2) и (3), может быть записан:

$$Uidt = d(R_M \Phi^2) - \Phi^2 dR_M, \quad (10)$$

где $dW_{\text{ИСТ}} = Uidt$ – работа, совершаемая источником питания; $dW_{\text{МАГ}} = d(R_M \Phi^2)$ – магнитная энергия в рабочих зазорах; $dW_{\text{МЕХ}} = -\Phi^2 dR_M$ – работа электромагнитной силы, которая включает в себя механическую работу и кинетическую энергию подвижных частей.

Интегрируя выражение (10) по времени от момента $t = 0$ до $t < t_p$, получим:

$$\frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{t_p^2} \left(t^2 - \frac{2}{3} \cdot \frac{t^3}{T} \right) = \frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{t_p^2} \left(t^2 - \frac{t^3}{T} \right) + \frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{3t_p^2 T} t^3. \quad (11)$$

В этом уравнении:

$$\frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{t_p^2} \left(t^2 - \frac{2}{3} \cdot \frac{t^3}{T} \right) - \text{работа источника питания};$$

$$\frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{t_p^2} \left(t^2 - \frac{t^3}{T} \right) - \text{накапливаемая магнитная энергия};$$

$$\frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{3t_p^2 T} t^3 - \text{работа электромагнитной силы}.$$

В момент окончания действия импульса напряжения, когда $t = t_p$, получим:

$$R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{t_p}{T} \right) = R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{t_p}{T} \right) + \frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{3T} t_p. \quad (12)$$

Интегрируя уравнение (10) по времени от момента $t = 0$ до $t_p < t \leq T$, получим:

$$R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{t_p}{T} \right) = R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{t}{T} \right) + \frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{3T} t_p + \frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{T} (t - t_p). \quad (13)$$

В этом уравнении:

$$R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{t_p}{T} \right) - \text{работа источника питания};$$

$R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right)$ – расходуемая магнитная энергия;

$\frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{3T} t_P + \frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{T} (t - t_P)$ – работа электромагнитной силы.

С помощью полученных уравнений теперь можно сравнить режимы работы: непрерывный традиционный режим и режим с постоянным потокосцеплением. Для непрерывного режима работы, когда $t_P = T$, из уравнения (12) следует, что работа источника питания равна лишь 1/3 части магнитной энергии, которая может накопиться в электромагнитной системе двигателя, то есть:

$$\frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{3}. \quad (14)$$

Эта энергия преобразуется в такую же работу электромагнитной силы.

Для импульсного режима работы с постоянным потокосцеплением, когда длительность импульса напряжения стремится к нулю, уравнение (13) запишется:

$$R_{M0} \Phi_{\max}^2 = R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right) + \frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{T} t. \quad (15)$$

Из этого уравнения следует, что источник питания совершает работу, равную магнитной энергии, которую может запасти электромагнитная система

$$R_{M0} \Phi_{\max}^2. \quad (16)$$

Запасенная таким образом магнитная энергия, убывая как

$$R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right), \quad (17)$$

преобразуется в работу электромагнитной силы, в конце такта равную запасенной магнитной энергии.

Таким образом, в двигателях с постоянным потокосцеплением по сравнению с двигателями с непрерывным питанием работа электромагнитной силы возрастает в три раза, что получилось немного меньше, чем в опытных данных [4]. В разрабатываемых численных моделях возрастание работы электромагнитной силы получается выше [1; 2]. Кроме того, повышение работы электромагнитной силы приводит к уменьшению времени такта работы двигателя. Поэтому для возвратно-поступательных двигателей и двигателей непрерывного движения, в которых перемещение состоит из нескольких циклов энергопреобразования, мощность дополнительно возрастает еще за счет увеличения числа тактов, совершаемых за единицу времени.

В этой физической модели электрические и магнитные потери не учитывались, поэтому информация о возрастании КПД не получена. В разрабатываемых численных моделях потери учитываются, и КПД в электромагнитных системах с постоянным потокосцеплением по сравнению с традиционными системами тоже возрастает. Особенно сильное возрастание КПД получается в электромагнитных системах с малым коэффициентом модуляции магнитного сопротивления или модуляции индуктивности при использовании изобретения [3], в котором остающаяся магнитная энергия в конце такта используется в последующем цикле работы. Для электромагнитных двигателей коэффициент модуляции равен приблизительно трем. То есть магнитное сопротивление или индуктивность при перемещении якоря из начального положения в конечное положение изменяется в три раза. Результаты, получаемые с помощью численных моделей, будут опубликованы в последующих работах.

Формула (1) показывает, что причина возрастания работы электромагнитной силы в электромагнитных двигателях заключается только в уменьшении индуктивности или повышении магнитного сопротивления в начале такта. Результаты проведенных исследований показывают, что работа электромагнитной силы при переходе к режиму работы с постоянным потокосцеплением возрастает всего лишь в три раза. Дальнейшее повышение работы возможно, как для традиционных двигателей, так и для двигателей с постоянным потокосцеплением, только за счет повышения накопительных свойств электромагнитной системой магнитной энергии, то есть повышением магнитного сопротивления рабочих зазоров или уменьшением индуктивности в начале такта. Повы-

шение накопительных свойств электромагнитных систем можно получить в системах с несколькими обмотками.

Работа электрического генератора постоянного тока, содержащая две обмотки, в режиме постоянного потокосцепления представлена на рис. 2. При разомкнутой обмотке вторичной части подается электрический ток и создается магнитный поток Φ (рис. 2а), после чего эта обмотка замыкается накоротко. Затем замыкается накоротко обмотка вторичной части и при ее вращении магнитный поток «увлекается» этой короткозамкнутой обмоткой (рис. 2б). При повороте вторичной части на угол π (рис. 2в), когда максимально «деформируются» силовые линии магнитного поля, накапливается магнитная энергия, а магнитное сопротивление R_{MD} достигает максимального значения, подключается нагрузка, и вся запасенная магнитная энергия преобразуется в электрическую энергию нагрузки. При обратном вращении вторичной части, если нагрузка не подключена и обмотка вторичной части остается короткозамкнутой, машина будет уже работать в режиме электрического двигателя. В таких машинах магнитное сопротивление достигает более высоких значений, чем в электромагнитных двигателях. Недостатком такой машины может быть необходимость использования скользящих контактов для подключения подвижной обмотки, по которой должен протекать большой электрический ток.

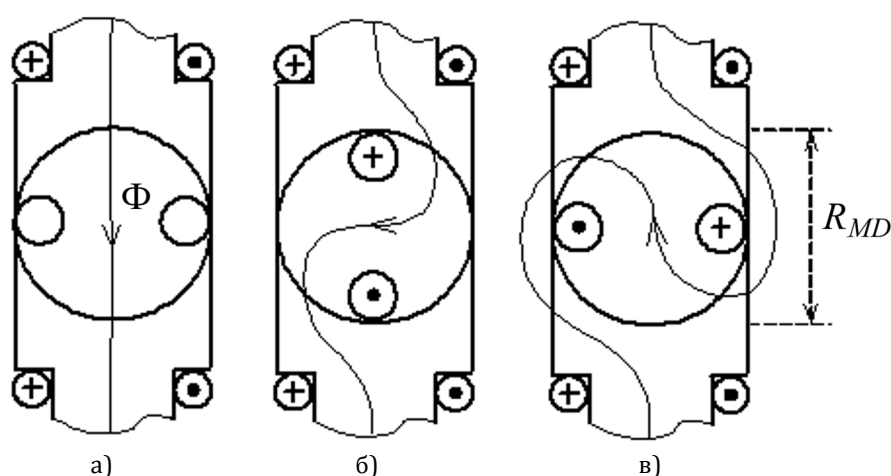


Рис. 2. Последовательность цикла работы электрической машины постоянного тока с постоянным потокосцеплением

Таким образом, с помощью физической модели рассмотрен процесс преобразования энергии от источника питания через магнитную энергию в работу электромагнитной силы для электромагнитных двигателей, работающих в режиме с постоянным потокосцеплением. Полученные результаты согласуются с опытными данными. Рассмотрены возможности повышения работы электромагнитной силы и мощности двигателя. Рассмотрены особенности таких машин. Исследования на физической модели необходимы для разработки последующих, более точных численных математических моделей. Результаты работы также могут быть использованы в учебных целях.

Список литературы

1. Запольских С. Н., Борисов А. А., Бобров А. С. Физические принципы преобразования энергий в электромагнитных системах с предварительным накоплением магнитной энергии // Advanced science, 2017. № 1. Физико-математические науки.
2. Запольских С. Н., Борисов А. А., Хлебов А. Г. Исследование энергетических характеристик электромагнитных систем с предварительным накоплением магнитной энергии на численных моделях // Advanced science, 2017. № 2. Физико-математические науки.
3. Патент РФ № 2560079. Электрический двигатель / С. Н. Запольских, А. А. Борисов. БИ, 2015. № 23.
4. Ряшенцев Н. П., Угаров Г. Г., Львицин А. В. Электромагнитные прессы. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1989. 216 с.
5. Ряшенцев Н. П. Электромагнитный привод линейных машин / Н. П. Ряшенцев, А. Н. Ряшенцев. Новосибирск : Наука, 1985. 153 с.

Research and analysis of electromagnetic systems with constant flow coupling using a physical model

S. N. Zapolskyh

PhD of Technical Sciences, associate professor of the Department of engineering physics,
Vyatka State University. Russia, Kirov. ORCID: 0000-0001-5042-6403. E-mail: zapose8@yandex.ru

Abstract. The basic principles of operation of systems with inductive energy storage are considered, in which at first there is a preliminary accumulation of magnetic energy, and then its transformation into other types of energy with constant flow coupling, for such systems the design is simplified and energy indicators are increased. Currently, the element base and microprocessor technologies have reached a sufficiently high level to fully implement the practical application of this principle of energy conversion and conduct research on electromagnetic systems with constant flux coupling. We consider a physical model in which differential and integral equations describing physical processes occurring in systems with constant flow coupling are solved by analytical methods. The results obtained confirm the increase in energy characteristics. Such research on the physical model is necessary for the development of subsequent more accurate numerical mathematical models, and for the study of electromagnetic systems with constant flux coupling. The results of the work can also be used for educational purposes.

Keywords: electromechanical systems, modeling, magnetic energy storage, systems with constant flow coupling.

References

1. Zapol'skih S. N., Borisov A. A., Bobrov A. S. *Fizicheskie principy preobrazovaniya energij v elektromagnitnyh sistemah s predvaritel'nym nakopleniem magnitnoj energii* [Physical principles of energy conversion in electromagnetic systems with preliminary accumulation of magnetic energy] // Advanced science. 2017. No. 1. Physical and Mathematical Sciences.
2. Zapol'skih S. N., Borisov A. A., Hlebov A. G. *Issledovanie energeticheskikh karakteristik elektromagnitnyh sistem s predvaritel'nym nakopleniem magnitnoj energii na chislennyh modelyah* [Investigation of energy characteristics of electromagnetic systems with preliminary accumulation of magnetic energy on numerical models] // Advanced science. 2017. No. 2. Physical and Mathematical Sciences.
3. Patent of RF no. 2560079. Electric motor / S. N. Zapol'skih, A. A. Borisov. BI, 2015, No. 23. (in Russ.)
4. Ryashencev N. P., Ugarov G. G., L'vicin A. V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic press]. Novosibirsk. Nauka, Sib. dep. 1989. 216 p.
5. Ryashencev N. P. *Elektromagnitnyj privod linejnyh mashin* [Electromagnetic drive of linear machines] / N. P. Ryashencev, A. N. Ryashencev. Novosibirsk. Nauka. 1985. 153 p.