

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАРТИН ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОВОРОТНОГО ТИПА

Илюхина Н.С., Фролов А.А.\* , Илюхин А.С.

*Тулский государственный университет,  
ТулГУ, пр. Ленина, 92, Тула, 300012, Россия  
\* e-mail: neymles@rambler.ru*

На основании анализа картин электромагнитных полей электромеханического преобразователя поворотного типа сформулированы основные допущения, построены схема замещения и математическая модель электромагнита. Проведено исследование динамических характеристик преобразователя.

*Ключевые слова:* электромеханический преобразователь, электромагнит поворотного типа, электромагнитный рулевой привод, вихревой ток, метод конечных элементов, картины электромагнитных полей.

Электромеханические устройства получили широкое распространение в системах автоматического управления вследствие высокого их быстродействия и надежности конструкций. Они используются в качестве исполнительных и управляющих элементов систем автоматического управления и силовых следящих систем.

Электромеханический преобразователь (ЭМП) представляет собой единую динамическую систему «усилитель мощности — электромагнит» [1]. Причем конструктивная реализация усилителя мощности и электромагнита определяется режимом работы системы управления в целом, требованиями к ее динамическим характеристикам и т.д.

Принципиальные схемы электромагнита и усилителя мощности представлены на рис. 1.

Эффективное проектирование ЭМП возможно на основе математического описания, отражающего основные явления, присущие релейным электромагнитам (вихревые токи, насыщение материала магнитопровода, соизмеримость величин краевых потоков с рабочими потоками, нелинейность характеристик электрических цепей и т.д.).

Для построения математической модели электромагнита необходимо сформулировать допущения на основании анализа распределения магнитного поля в статоре, обмотках и воздушных зазорах электромагнита.

Традиционные методы построения картины магнитного поля, такие, как графоаналитический метод или моделирование на электропроводной бумаге либо слишком трудоемки, либо не обеспе-

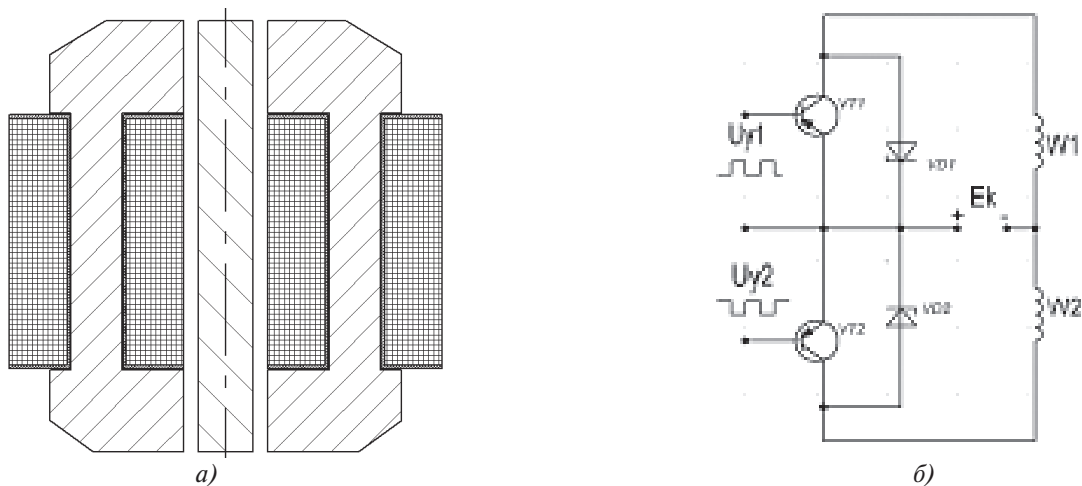


Рис. 1. Принципиальные схемы: *a* — электромагнита поворотного типа; *б* — выходного каскада усилителя мощности

чивают требуемую точность результатов. Компьютерное моделирование позволяет значительно упростить процесс построения картин магнитного поля в воздушных зазорах и материале магнитопровода и дает достаточную точность. В настоящей работе использовался пакет программ ANSYS.

Базовым методом пакета является метод конечных элементов (Finite element method), широко используемый для решения технических задач, связанных с полями различной физической природы, таких, как электромагнитные, тепловые, прочностные, гидродинамические, акустические и др. Одна из программ этого пакета — Maxwell позволяет строить картины магнитного поля и определять полевые и цепные параметры, используя уравнения Максвелла в конечной области пространства с соответствующими граничными условиями и, когда это необходимо, с определенными пользователем начальными условиями с целью получения гарантированно единственного решения. Чтобы получить набор алгебраических уравнений, которые будут решены, геометрия задачи автоматически разбивается на четырехгранные элементы (тетраэдры). Все эти объемные объекты модели автоматически объединяются в сетку генератором сетки (mesher). Набор всех тетраэдров называется сеткой конечных элементов модели или просто сеткой. В каждом четырехграннике переменные величины поля для вычисляемой области определяются многочленами второго порядка. Таким образом, в областях с резким пространственным изменением поля плотность сетки должна быть увеличена для получения хорошей точности решения.

Моделирование производилось в продольном сечении магнитопровода при двух значениях угла поворота якоря:

На рис. 2 и 3 приведены эквипотенциальные линии магнитного потока и тепловая картина вектора магнитной индукции

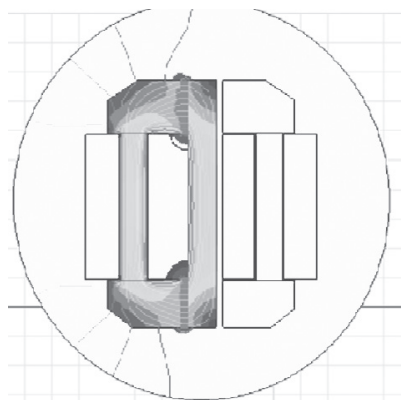


Рис. 2. Эквипотенциальные линии магнитного потока и тепловая картина вектора магнитной индукции при  $\delta = 0$ ,  $i_1 = 0,34$  А,  $i_2 = 0$

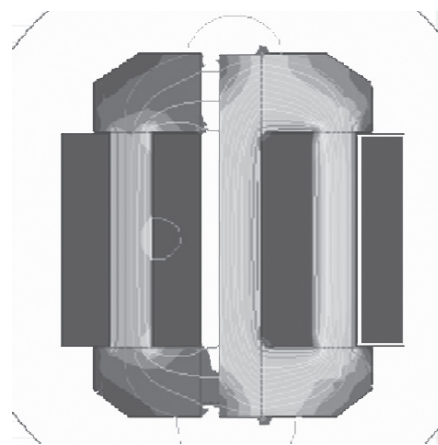


Рис. 3. Эквипотенциальные линии магнитного потока и тепловая картина вектора магнитной индукции при  $\delta = 0,12$  рад,  $i_1 = 0,14$  А,  $i_2 = 0,153$  А

тора магнитной индукции при соответствующих значениях угла поворота якоря и тока в обмотках.

1. Якорь в нейтральном положении, угол поворота якоря  $\delta = 0$ , ток в первой обмотке  $i_1 = 0,34$  А, ток во второй обмотке  $i_2 = 0$ .

2. Якорь находится в положении на упоре  $\delta = 0,12$  рад,  $i_1 = 0,14$  А,  $i_2 = 0,153$  А.

Наибольшее значение вектора магнитной индукции наблюдается на границе статора с рабочим зазором, а также на внутренней части статора, вблизи катушки, и на краях статора. Здесь модуль вектора магнитной индукции достигает значения 1,5 Тл (рис. 2). В местах, где модуль вектора магнитной индукции достигает наименьшего значения, материал практически не насыщается, т.е. слабо влияет на формирование магнитного потока. Рассеяние магнитного потока вблизи воздушного зазора практически отсутствует при положении якоря на упоре. При наибольшей длине воздушного зазора имеются краевые эффекты в области рабочего зазора и катушки. При положении якоря на одном из упоров магнитное поле в сердечнике противоположной катушки практически отсутствует, поэтому взаимной индуктивностью обмоток можно пренебречь (рис. 3). Численная оценка величины рассеяния осуществлялась по значению магнитного потенциала в соответствующих областях.

Анализ спектра поля показывает, что силовые линии охватывают достаточно большое пространство вокруг электромагнита, однако уже на некотором удалении от сердечников (равном линейному размеру сердечника) поле ослабевает настолько, что его можно не учитывать. Наиболее сильным является поле вблизи катушек, а также по краям магнитопровода. Вблизи катушек поле сравнитель-

но однородно, падение магнитного потенциала вдоль длины катушки за счет потоков рассеяния отсутствует, что позволяет считать магнитодвижущую силу (МДС) обмоток электромагнитов данного класса сосредоточенной. Существенное искажение поля наблюдается только вблизи воздушного зазора, где часть рабочего потока выпучивается.

Анализ численных значений потоков, полученных в результате моделирования электромагнитного поля в магнитной системе нейтральных электромагнитов, показывает, что в большинстве случаев потоки рассеяния и выпучивания оказываются соизмеримыми с рабочими потоками и их необходимо учитывать при расчете статических и динамических характеристик. Поток рассеяния в рассматриваемом электромагните практически не изменяется при движении якоря, что позволяет сделать предположение о постоянстве проводимости рассеяния.

На основании анализа картин электромагнитного поля в схеме замещения магнитной цепи нейтрального электромагнита поворотного типа должны быть учтены:

- магнитодвижущие силы обмоток электромагнита, представленные в виде сосредоточенных источников МДС;
- магнитные сопротивления участков магнитопровода — в виде нелинейных сопротивлений;
- сопротивления потоков рассеяния и выпучивания — в виде соответствующих линейных магнитных сопротивлений.

Обобщенная схема замещения магнитной цепи, построенная на основании анализа картин электромагнитного поля и с учётом особенностей функционирования электромагнита (см. рис. 1), представлена на рис. 4.

С учетом схемы замещения и принятых допущений на основании интегральных принципов [1] получена нелинейная математическая модель электромагнита поворотного типа:

$$\begin{aligned}
 J \frac{d^2\delta}{dt^2} + h \frac{d\delta}{dt} + c\delta &= M_{дв} - M_H; \\
 \frac{d\psi_1}{dt} + i_1 r_1 + U_{y1} &= E_1; \\
 \frac{d\psi_2}{dt} + i_2 r_2 + U_{y2} &= E_2; \\
 \frac{d\psi_{в1}}{dt} + i_{в1} r_{в1} &= 0; \\
 \frac{d\psi_{в2}}{dt} + i_{в2} r_{в2} &= 0; \\
 M_{дв} &= \frac{\partial W'}{\partial \delta};
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 W' &= \int_0^{i_1} \psi(i_1, 0, 0, 0, \delta) di_1 + \int_0^{i_{в1}} \psi(i_1, i_{в1}, 0, 0, \delta) di_{в1} + \\
 &+ \int_0^{i_2} \psi(i_1, i_{в1}, i_2, 0, \delta) di_2 + \int_0^{i_{в2}} \psi(i_1, i_{в1}, i_2, i_{в2}, \delta) di_{в2}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Здесь  $J$  — приведенный момент инерции якоря;  $h$  — коэффициент вязкого трения;  $c$  — коэффициент жесткости пружины;  $M_{дв}, M_H$  — движущий момент и момент нагрузки;  $\psi_{1,2}, \psi_{в1,2}$  — потокосцепления обмоток и контуров вихревых токов;  $i_{1,2}, i_{в1,2}$  — токи в обмотках и вихревые токи.

Математическая модель (1)—(2) использовалась при создании программного обеспечения и после-

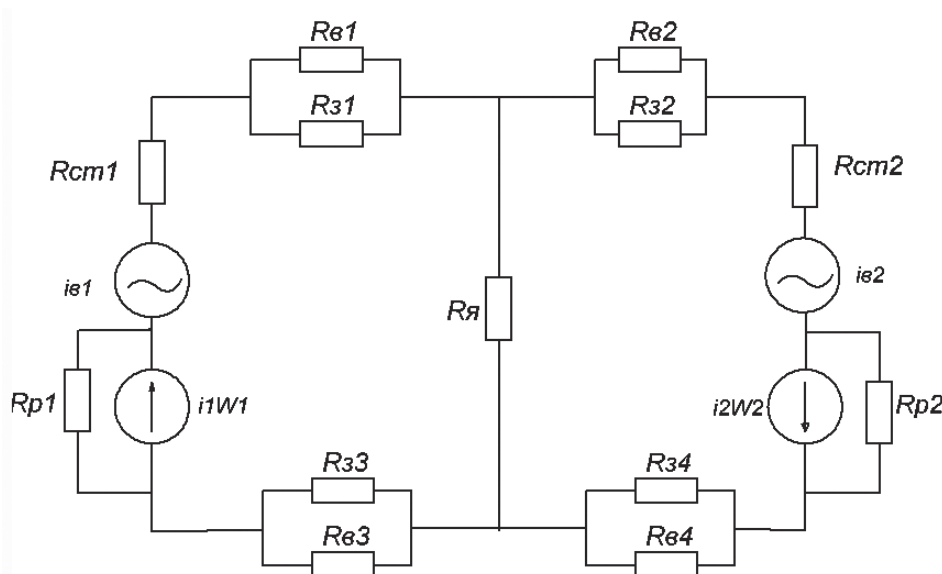


Рис. 4. Обобщенная схема замещения магнитной цепи

дующего исследования статических и динамических характеристик ЭМП поворотного типа.

На рис. 5,а приведены статические характеристики втяжного электромагнита со следующими конструктивными и эксплуатационными параметрами:

$$l_1 = 0,03\text{ м}; \quad l_2 = 0,007\text{ м}; \quad l_3 = 0,007\text{ м}; \quad l_4 = 0,03\text{ м};$$

$$S_1 = 0,0000385\text{ м}^2; \quad S_2 = 0,00006\text{ м}^2;$$

$$S_3 = 0,000088\text{ м}^2; \quad S_4 = 0,000038\text{ м}^2;$$

$$\delta_{\text{max}} = 0,2355\text{ рад}; \quad x_z = 0,295\text{ мм};$$

$$E = 16\text{ В}; \quad W = 1250; \quad r_0 = 24\text{ Ом};$$

$$Y = 0,00000315\text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2.$$

Исследование динамических характеристик ЭМП проводилось численно с использованием нелинейной модели, при изменении температуры окружающей среды в диапазоне  $\pm 50\text{ }^\circ\text{C}$  и напряжения источника питания в пределах установленных допусков ( $E_k = 16_{-2}^{+5}\text{ В}$ ).

На рис. 5,б представлены переходные процессы привода по углу поворота якоря  $\delta = f(t)$  и токам в обмотках  $I_{1,2} = f(t)$  при нормальных условиях эксплуатации ( $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ).

На рис. 6 приведены графики зависимостей времени срабатывания и отпускания от ЭДС источника питания при трех значениях температуры:

$$T = 20^\circ\text{C}, \quad T = -50^\circ\text{C}, \quad T = 50^\circ\text{C}.$$

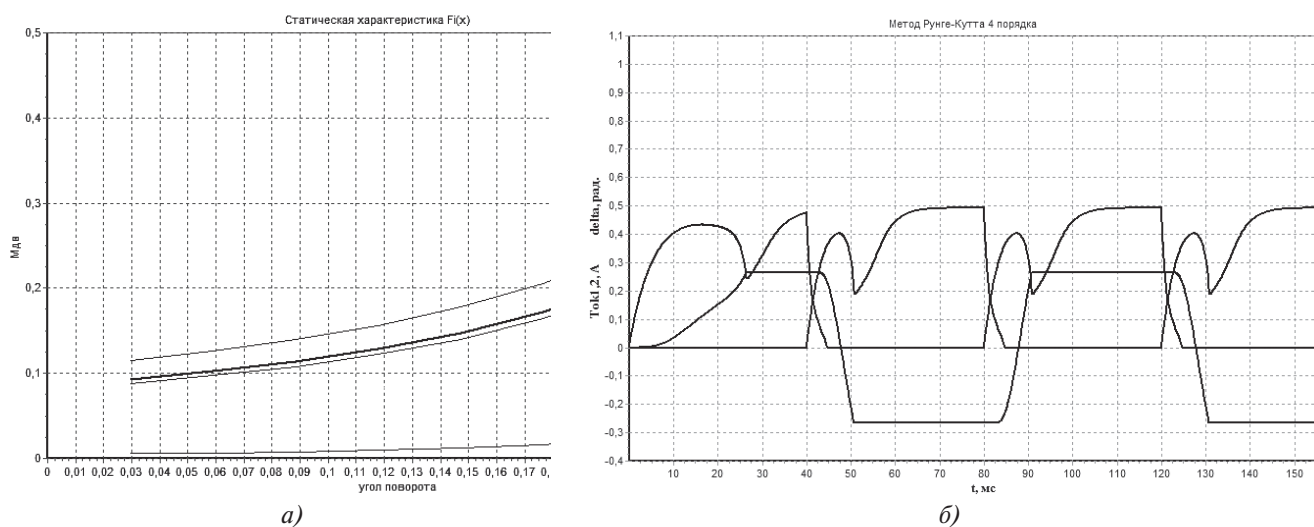


Рис. 5. Статические и динамические характеристики поворотного электромагнита при  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$

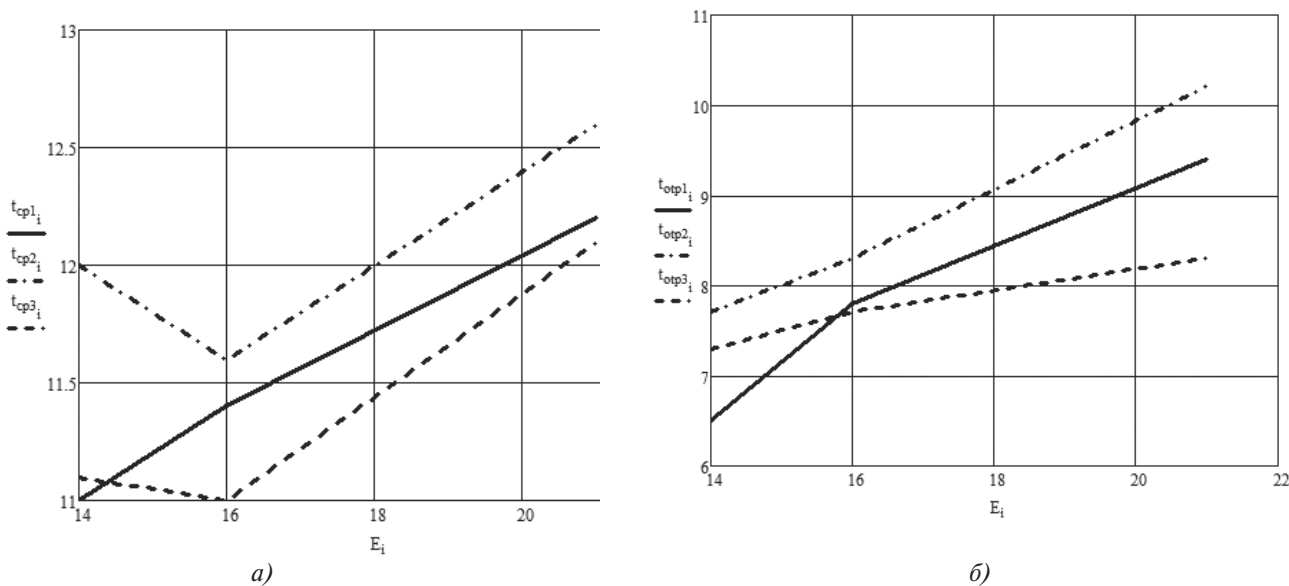


Рис. 6. Зависимость времени срабатывания (а) и отпускания (б) от ЭДС источника питания при трех значениях температуры ( $t_{cp1}$  при  $T = 20^\circ\text{C}$ ,  $t_{cp2}$  при  $T = -50^\circ\text{C}$ ,  $t_{cp3}$  при  $T = 50^\circ\text{C}$ )

Первое срабатывание электромагнита, т.е. срабатывание из нейтрального положения на упор, является самым тяжелым энергетически.

На рис. 7 приведены графики зависимостей времени первого срабатывания и отпускания от ЭДС источника питания при трех значениях температуры:  $T = 20^\circ\text{C}$ ,  $T = -50^\circ\text{C}$ ,  $T = 50^\circ\text{C}$ .

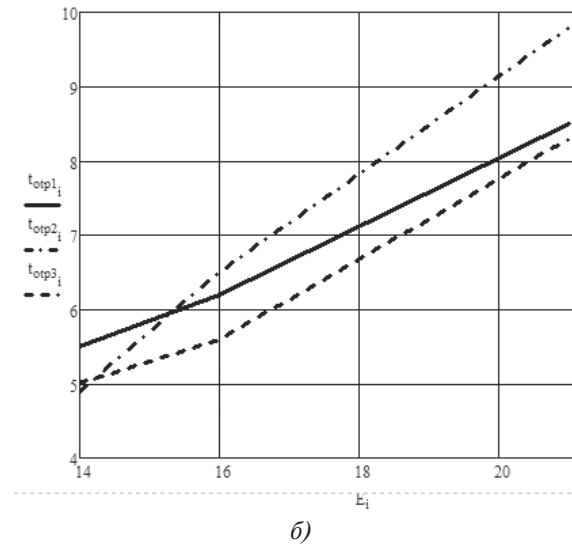
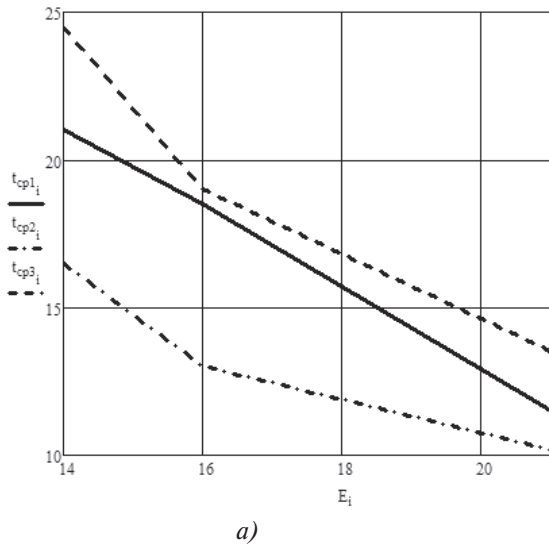


Рис. 7. Зависимость времени первого срабатывания (а) и первого отпускания (б) от ЭДС источника питания при трех значениях температуры ( $t_{отп1}$  при  $T = 20^\circ\text{C}$ ,  $t_{отп2}$  при  $T = -50^\circ\text{C}$ ,  $t_{отп3}$  при  $T = 50^\circ\text{C}$ )

Выполненные расчёты и анализ переходных процессов в релейных электромагнитных приводах показали, что время срабатывания  $t_{cp}$  и время отпускания  $t_{отп}$  якоря электромагнита сильно зависят от параметров как магнитной, так и электрической частей системы. Изменение условий эксплуатации существенно влияет на динамику привода, особенно в момент первого, энергетически наиболее тяжелого, срабатывания из нейтрального положения на упор. При  $T = 50^\circ\text{C}$ ,  $r_{обм} = 26,9 \text{ Ом}$  первого срабатывания не происходит.

**Выводы**

1. Разработанное программное обеспечение было апробировано при различных конструктивных и эксплуатационных параметрах.

2. Электромагнит поворотного типа исследовался при трех значениях температуры:

$$T = 20^\circ\text{C}, T = -50^\circ\text{C}, T = 50^\circ\text{C}.$$

Увеличение температуры до  $T = 50^\circ\text{C}$  существенно влияет на быстродействие, вплоть до несрабатывания электромагнита.

3. Проведено исследование влияния изменения ЭДС источника питания поворотного электромаг-

нита в пределах установленных допусков ( $E_k = 16_{-2}^{+5} \text{ В}$ ). При увеличении ЭДС быстродействие электромагнита при повторных срабатываниях практически не меняется, но существенно уменьшается время первого срабатывания.

4. Полученная математическая модель и разработанное программное обеспечение могут быть использованы при анализе характеристик существующих и проектировании новых электромагнитов. При этом математическая модель, используемая при расчете характеристик, учитывает особенности конфигурации магнитного поля каждой конкретной конструктивной реализации электромагнита.

**Библиографический список**

1. Елецкая Г.П., Илюхина Н.С., Панков А.П. Электро-механические системы. — Тула: ТулГУ, 2009. — 214 с.
2. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учеб. пособие для студентов вузов. — М.: Академия, 2005. — 336 с.
3. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока: Учеб. пособие для студентов вузов. — М.: Госэнергоиздат, 1960. — 446 с.
4. Илюхина Н.С., Фролов А.А. Расчёт статических и динамических характеристик двухобмоточного электромагнита втяжного типа // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 5. Ч. 1. С. 67-72.



## INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC FIELD PATTERNS OF ELECTROMECHANICAL TRANSDUCERS OF ROTARY TYPE

Ilyukhina N.S., Frolov A.A.\* , Ilukhin A.S.

*Tula state University,  
92, Lenin av., Tula, 300012, Russia  
\* e-mail: neymles@rambler.ru*

### Abstract

This work aims at the analysis of the rotary electromagnet structure through the research of electromagnetic field patterns by finite element method. Based on the results of the analysis we built a general equivalent circuit of a magnetic circuit, enunciated assumptions necessary to build non-linear mathematical model as well as electromagnet of rotary type design.

The analysis of numerical values streams obtained as a result of electromagnetic field modelling in a system with neutral electromagnets shows that in most cases stray and bulging fluxes appear to be commensurable with working fluxes, and, thus, they need to be taken into account when calculating the static and dynamic characteristics. In the electromagnet under consideration, the stray flux is almost constant during the movement of the armature. It allows supposition on stray conductivity uniformity.

On the basis of the analysis of electromagnetic fields patterns and assumptions, we build a non-linear the electromagnet mathematical model.

Research of electromagnet dynamic characteristics was carried out numerically using non-linear model for ambient temperature variation of  $\pm 50^{\circ}\text{C}$  and power source voltage within the specified tolerance range.

Mathematical model obtained and developed software can be implemented to analyse currently available as well as newly designed electromagnets. The developed mathematical model takes into account the peculiarities of magnetic field configuration of each electromagnet design implementation.

**Keywords:** electromechanical transducer, electromagnet of rotary type, electromagnetic steering gear, eddy currents, finite elements method, electromagnetic fields patterns.

### References

1. Eletskaia G.P., Ilyukhina N.S., Pankov A.P. *Elektromekhanicheskie sistemy* (The electromechanical systems), Tula, TulGU, 2009, 214 p.
2. Bul' O.B. *Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov. Magnitnye tsepi, polya i programma FEMM* (Calculation methods of electric apparatus magnetic systems. Magnetic circuits, fields and FEMM program), Moscow, Akademiya, 2005, 336 p.
3. Gordon A.V., Slivinskaya A.G. *Elektromagnitny postoyannogo toka* (Electromagnets of a direct current), Moscow, Gosenergoizdat, 1960, 446 p.
4. Ilyukhina N.S., Frolov A.A. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2011, vol. 5, no. 1, pp. 67-72.