

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ХВОСТОВИКА ЯКОРЯ НА ТЯГОВУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ БРОНЕВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Загирняк М.В., д.т.н., проф.

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, 39600, Кременчуг, Украина

E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

Бранспиз Ю.А., д.т.н., проф., Пшеничный А.Н., к.т.н.

Восточноукраинский национальный университет имени В. Даля

кв. Молодежный, 20 а, 91034, Луганск, Украина

E-mail: branspiz@mail.ru

Дамьян Милявец, проф.

Университет Любляны, факультет электротехники

ул. Царска, 25, 1000, Любляна, Словения

E-mail: miljavec@fe.uni-lj.si

Показано, что снижение (демпфирование) тягового усилия в конце хода якоря броневое электромагнита возможно не только за счет применения специальной конструкции стопа, но и за счет изменения геометрической формы хвостовика якоря. Приведены результаты компьютерного моделирования с использованием программного продукта FEMM. Они подтверждают эффект демпфирования при использовании конических хвостовиков якоря.

Ключевые слова: броневой электромагнит, тяговое усилие, демпфирование, якорь.

Введение. Электромагниты постоянного тока броневое типа с осевой симметрией характеризуются относительно большими тяговыми усилиями в начале хода якоря. Эти усилия существенно возрастают по мере движения якоря и уменьшения рабочего зазора. Если такое увеличение тягового усилия не требуется, то на практике применяют специальные меры для снижения тяговых сил в конце хода якоря и соответственного снижения ударных нагрузок на стоп электромагнита. Для этого стоп броневое электромагнита делают с магнитным воротником специальной формы (рис. 1), что позволяет при малых зазорах уменьшать тяговое усилие, действующее на якорь, за счет насыщения шунта и, следовательно, увеличения эффективного зазора [1, 2]. При этом происходит увеличение падения магнитного потенциала на стальных участках магнитной цепи, уменьшающее долю магнитодвижущей силы (МДС) обмотки, которая приходится на рабочий зазор (как известно, тяговое усилие пропорционально квадрату этой доли МДС). Однако применение указанных магнитных шунтов дает тяговую характеристику броневое электромагнита с резким спадом (завалом) тяговой силы на конечных участках движения якоря, что при определенном характере механической силы сопротивления, приложенной к якорю, может вызвать нежелательную его вибрацию [3].

Вышеизложенное и технологические сложности изготовления указанных воротников делают актуальным поиск других способов уменьшения тягового усилия в конце хода якоря для броневое электромагнита. Один из таких способов и рассматривается в данной работе.

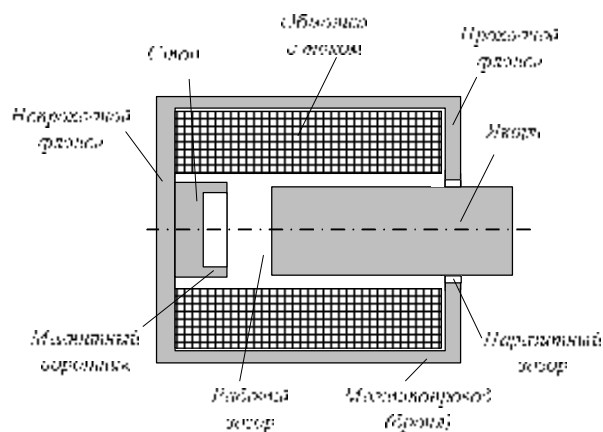


Рисунок 1 - Традиционная конструкция броневое электромагнита с магнитным воротником на стопе

Цель работы. Требуется осуществить демпфирование тягового усилия в конце хода якоря броневое электромагнита более простым путем по сравнению с известными способами такого демпфирования, а также не приводящем к «завалу» тяговой характеристики электромагнита.

Материал и результаты исследований. Очевидно, что для уменьшения тягового усилия в конце хода якоря необходимо уменьшить магнитный поток в рабочем зазоре. С этой целью предлагается использовать известное влияние паразитного зазора на тяговое усилие, развиваемое броневым электромагнитом. А именно, увеличивать этот зазор в конце хода якоря путем выполнения хвостовика якоря таким образом, чтобы на малых рабочих зазорах увеличивалось магнитное сопротивление магнитному потоку, который проходит через паразитный зазор. Этого можно достигнуть, если хвостовик якоря

выполнить в виде конуса [4]. Тогда в начале хода якоря тяговое усилие соответствует усилию броневое электромагнита с цилиндрическим якорем, а в конце хода происходит уменьшение магнитного потока через якорь (а тем самым – и через рабочий зазор) из-за увеличения паразитного зазора (рис. 2).

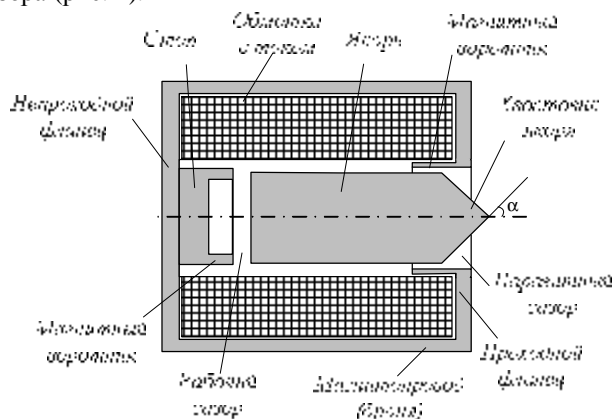


Рисунок 2 - Предлагаемое изменение конструкции якоря броневое электромагнита

В самом деле, предварительный расчет распределения магнитных потоков в броневом электромагните с коническим хвостиком якоря, основанный на использовании программного продукта FEMM [5], показал следующее (рис. 3): по мере движения якоря перед его остановкой с ростом эффективной величины паразитного зазора существенно увеличивается падение магнитного потенциала на этом зазоре. Такое увеличение, в свою очередь, приводит к падению доли МДС обмотки на рабочем зазоре и пропорционального ее квадрату тягового усилия.

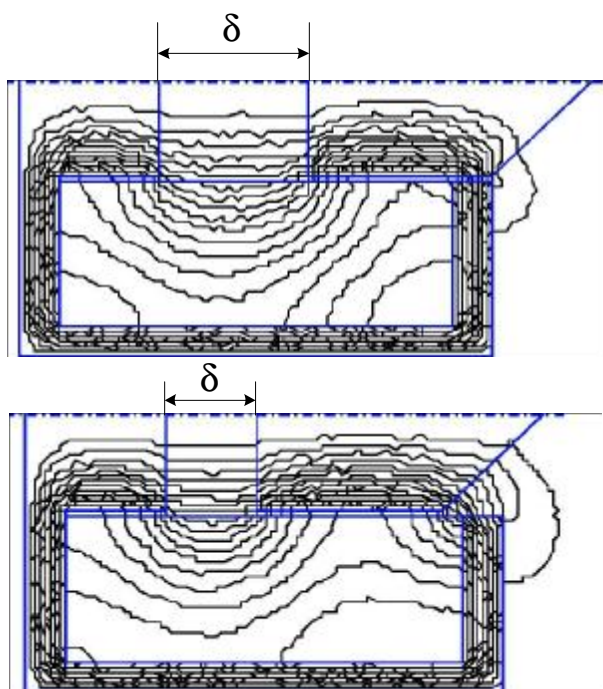


Рисунок 3 - Картины магнитного поля в электромагните

Известно [1, 2], что для относительно малых рабочих зазоров имеет место магнитное насыщение железа электромагнита, что также приводит к увеличению падения доли МДС обмотки на рабочем зазоре. Такое насыщение может происходить и в конструкциях с конусным хвостиком якоря.

Магнитное насыщение (то есть нелинейность кривой намагничивания) сказывается также и на результатах численного расчета тягового усилия броневое электромагнита (завышает их). Это объясняется тем, что требуемый численный расчет распределения магнитного поля при использовании программного продукта FEMM связан с заданием кривой намагничивания железа лишь на ограниченном диапазоне напряженности магнитного поля [6].

Исходя из этого, задачей данной работы было проверка на основе вычислительного эксперимента:

- указанного эффекта уменьшения тягового усилия в конце хода якоря, имеющего хвостик конусообразной формы;
- возможности получения тяговой характеристики броневое электромагнита заданного вида благодаря применению якоря с коническим хвостиком и магнитных воротников на стопе и (или) проходном фланце (рис. 2);

Решение осуществлялось с использованием рекомендаций по учету нелинейности магнитной характеристики, приведенных в [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОГО УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Для проверки указанного способа демпфирования якоря броневое электромагнита был использован вычислительный эксперимент, основанный на компьютерном моделировании магнитного поля в рассматриваемой электромагнитной системе постоянного тока с осевой симметрией с помощью программного продукта FEMM [5].

Заметим, что в FEMM силовое действие постоянного магнитного поля на выделенный элемент конструкции электромагнита (в нашем случае – якорь) определяется поверхностным интегралом (по наружной поверхности S_e выделенного элемента конструкции) вида

$$\vec{F} = 0.5 \int_{S_e} [\vec{H}(\vec{n} \cdot \vec{B}) + \vec{B}(\vec{n} \cdot \vec{H}) - \vec{n}(\vec{H} \cdot \vec{B})] dS, \quad (1)$$

где \vec{H} и \vec{B} – соответственно напряженность и индукция магнитного поля на наружной поверхности выделенного элемента конструкции; \vec{n} – единичный вектор нормали к дифференциально малой площадке dS (направлен наружу из объема, ограниченного поверхностью интегрирования S_e).

В случае якоря, отделенного от магнитопровода электромагнита немагнитной средой, поверхность S_e может рассматриваться как поверхность в немагнитной среде, для которой имеет место

соотношение

$$\bar{B} = \mu_0 \bar{H}, \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

С учетом (2) интегрирование по (1) может быть переписано к известному выражению [7] вида

$$\bar{F} = \mu_0^{-1} \int_{S_e} [\bar{B}(\bar{n} \cdot \bar{B}) - 0.5 \bar{n} B^2] dS, \quad (3)$$

которое нашло широкое применение в теории электромагнитных устройств.

Для элементов же конструкций, поверхность которых контактирует с магнитной средой, использование формулы (1) вместо указанной формулы (3), или тождественной ей при условии (2) формулы

$$\bar{F} = \int_{S_e} [\bar{H}(\bar{n} \cdot \bar{B}) - 0.5 \bar{n}(\bar{H} \cdot \bar{B})] dS$$

требует дополнительного обоснования.

Таким образом, расчет силового действия магнитного поля на якорь броневое электромагнита сводится в FEMM к вычислению интеграла по (3), который в данном случае является адекватным реальности.

Непосредственно в указанном вычислительном эксперименте были рассмотрены следующие характерные варианты броневых электромагнитов: модель № 1 – цилиндрический якорь без конического хвостовика и стоп не имеет магнитного воротника; модель № 2 – цилиндрический якорь без конического хвостовика и стоп с магнитным воротником

(рис. 1); модель № 3 – цилиндрический якорь с коническим хвостовиком и стоп не имеет магнитного воротника; модель № 4 – цилиндрический якорь с коническим хвостовиком и стоп имеет магнитный воротник; модель № 5 – цилиндрический якорь с коническим хвостовиком, стоп имеет магнитный воротник и на проходном фланце также имеется магнитный воротник (рис. 2).

Расчет осуществлялся для электромагнита следующих размеров: наружный диаметр (по броне) 56 мм; длина электромагнита (по броне) 48 мм; толщины проходного и непроходного фланцев 4 мм; толщина брони 3 мм; высота стопа (без воротника) 15 мм; высота воротника 5 мм; диаметр стопа 20 мм; диаметр якоря 15 мм; длина шунта проходного фланца 10 мм; паразитный зазор 0,5 мм. Для всех моделей принято: сталь магнитопровода марки Ст3; магнитодвижущая сила катушки 2000 А; рабочий ход якоря 10 мм. Конусный хвостовик якоря принят высотой 10 мм (ход якоря); угол при вершине конуса 90°.

Здесь отметим, что для кривой намагничивания $B(H)$ принятого материала магнитопровода (Ст3) на участке за диапазоном значений напряженности магнитного поля, на котором она задана, принималась, согласно [6], линейная аппроксимация вида

$$B = \mu_0 H - B_n + \mu_0 H_n. \quad (4)$$

Формула (4) соответствует следующей аппроксимации для магнитной проницаемости принятой марки стали на указанном участке кривой намагничивания

$$\mu = \mu_0 \left(1 - \frac{B_n - H_n \mu_0}{\mu_0 H} \right)$$

где H_n и B_n – последние (максимальные) значения напряженности и индукции магнитного поля, ограничивающие диапазон задания кривой намагничивания.

В результате вычислительного эксперимента для всех моделей были получены тяговые характеристики, представленные на рис. 4.

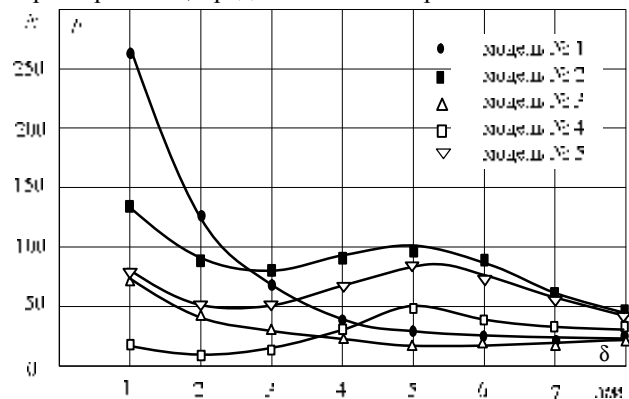


Рисунок 4 - Результаты компьютерного эксперимента по расчету тяговой характеристики для различных модификаций конструкции броневое электромагнита (МДС обмотки 2000 А)

ВЛИЯНИЕ КОНУСНОСТИ ХВОСТОВИКА ЯКОРЯ НА ТЯГОВУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ БРОНЕВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Для исследования влияния конусности хвостовика якоря на эффект демпфирования тяговой характеристики броневое электромагнита был также осуществлен расчет для модели №3 с изменяющимся углом α (рис. 2) образующей конуса: 15° – модель №3*; 45° – модель №3; 60° – модель №3**. В результате вычислительного эксперимента для этих моделей получены тяговые характеристики, приведенные на рис. 5.

Расчет проводился для значения магнитодвижущей силы обмотки 1620 А, которое соответствует плотности тока в ней 3 А/мм², допустимой по перегреву обмотки физической модели, использованной для экспериментальной проверки расчетных данных.

Соответствующий эксперимент проводился на физической модели электромагнита (рис. 6) с такими же геометрическими параметрами как и у модели электромагнита для вычислительного эксперимента. Результаты измерений дали хорошее совпадение с расчетными данными (менее чем 10%), и подтвердили эффекта демпфирования якоря в конце его хода по предлагаемому способу.

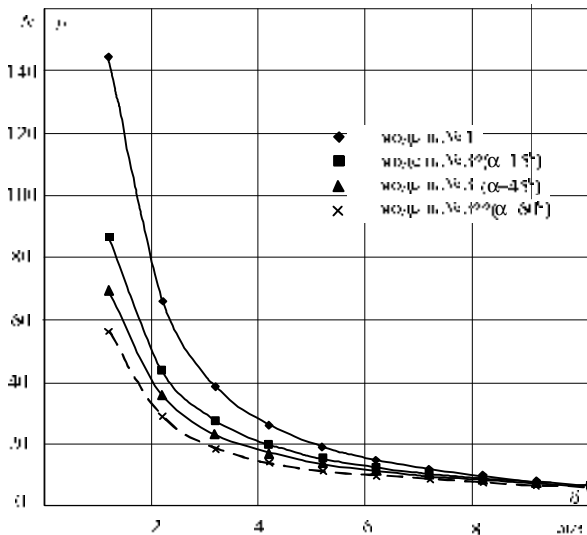
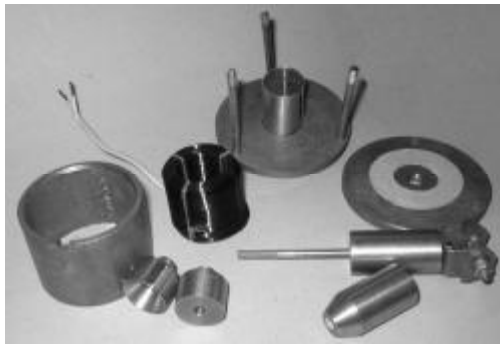


Рисунок 5 - Расчетные тяговые характеристики броневого электромагнита с коническим хвостовиком якоря при различном угле конусности (магнитодвижущая сила обмотки 1620 А)



а)



б)

Рисунок 6 - Физическая модель электромагнита в разобранном виде (а) и установка (б) для экспериментальных исследований

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из кривых, приведенных на рис. 4, применение конусного хвостовика якоря существенно снижает тяговое усилие в конце хода

якоря, практически не изменяя его в момент начала движения. Причем, если стоп и проходной фланец не имеют магнитных воротников (модель № 3), то тяговая характеристика имеет плавный характер. Это отличает ее от тяговой характеристики для модели № 4, имеющей резкий спад (завал) тяговой характеристики на конечном участке движения якоря. Этот спад можно уменьшить применением магнитного воротника на проходном фланце (модель № 5), но и в этом случае сохраняется неравномерность тяговой характеристики, которая также характерна и для традиционного способа демпфирования (модель № 2). Исследование влияния угла при вершине конуса хвостовика якоря показало (рис. 5), что увеличение этого угла приводит к снижению тягового усилия, но тяговая характеристика сохраняет прежний вид.

Заметим, что на практике требуется согласовывать тяговую характеристику электромагнита с характеристикой противодействующей силы. Такое согласование проще осуществлять в случае многовариантной возможности изменения тяговой характеристики электромагнита незначительными изменениями в размерах принятой его конструкции. Предлагаемая конструкция броневого электромагнита с конусным хвостовиком в совокупности с магнитными воротниками на стопе и проходном фланце и дает такую вариантность.

Отметим, что программный продукт FEMM позволяет в каждом конкретном случае проверить возможность получения требуемого характера изменения тягового усилия в зависимости от рабочего зазора. При этом, подбирая соответствующие параметры конусного хвостовика (высота конуса, угол при его вершине) и параметры магнитных воротников на стопе и проходном фланце, можно согласовать тяговую характеристику с характеристикой противодействующей силы.

Выводы.

Выполнение хвостовика якоря в виде конуса как в броневом электромагните традиционной конструкции (плоский стоп), так и в его конструкциях с магнитными воротниками на стопе и (или) проходном фланце позволяет:

- добиться требуемого демпфирования тягового усилия перед остановом якоря без «завала» тяговой характеристики в конце хода якоря;
- обеспечить достаточные силы на якорь на этапе начала его движения.

Программный продукт FEMM дает возможность согласовать противодействующую и тяговую силы броневом электромагните, якорь которого выполнен с коническим хвостовиком при соответствующем выборе конусности хвостовика и геометрических размеров магнитных шунтов на стопе и проходном фланце.

Учет магнитных свойств железа в предложенной конструкции броневом электромагните позволяет осуществлять адекватный расчет распределения магнитного поля в нем, что может быть использовано для определения рациональных (по

некоторому критерию) размеров элементов магнитной системы электромагнита на основе расчета этого распределения по методу FEMM. Это является задачей дальнейших исследований авторов по тематике данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов.– М.: Энергия, 1974.– 392 с.
2. Чунихин А.А. Электрические аппараты. Общий курс.– М.: Энергоатомиздат, 1988.– 720 с.
3. Пик Р., Уэйгер Г. Расчет коммутационных реле. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.– 584 с.
4. Патент 21253 Україна. МПК Н 01 F 7/00. Броньований електромагніт / Бранспіз Ю.А., Пшеничний А.М.; заявл. 14.07.2006; опубл. 15.03.2007. Бюл. №3.
5. Meeker D. Finite element method magnetics: User's manual [Электронный ресурс]. 2003. – С. 79. – Режим доступа: <http://femm.berlios.de>.
6. Загирняк М.В., Бранспіз Ю.А., Пшеничний А.Н. Учет нелинейности магнитной характеристики железа при расчете электромагнитов // Технічна електродинаміка. – 2008. – Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – Частина 7.– С.3-6.
7. Стрэттон Дж.А. Теория электромагнетизма.– М.-Л.: ОГИЗ-Гостехиздат, 1948.– 539 с.

ВПЛИВ КОНСТРУКЦІЇ ХВОСТОВИКА ЯКОРЯ НА ТЯГОВУ ХАРАКТЕРИСТИКУ БРОНЬОВОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТУ

М.В. Загірняк, д.т.н., проф.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, 39600, Кременчук, Україна

E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

Ю.А. Бранспіз, А.М. Пиєничний

Східноукраїнський національний університет імені В.Даля

квт. Молодіжний, 20 а, 91034, Луганськ, Україна

E-mail: branspiz@mail.ru

Дам'ян Милявець

Університет Любляни, факультет електротехніки

вул. Царська, 25, 1000, Любляна, Словенія

E-mail: miljavec@fe.uni-lj.si

Показано, що зниження (демпфування) тягового зусилля в кінці ходу якоря броньового електромагніту можливе не лише за рахунок застосування спеціальної конструкції стопа, але й за рахунок зміни геометричної форми хвостовика якоря. Наведено результати комп'ютерного моделювання з використанням програмного продукту FEMM. Вони підтверджують ефект демпфування при використанні конічних хвостовиків якоря.

Ключові слова: броньовий електромагніт, тягове зусилля, демпфірування, якір.

INFLUENCE OF A KEEPER SHANK DESIGN ON THE SHELL-TYPE ELECTROMAGNET TRACTION CHARACTERISTIC

Zagirnyak M., Doc. Sc. (Tech.), Prof.

Kremenchuk Mykhaylo Ostrohradskyi National University

Pershotravneva St., 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine

E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

Branspiz Y, Doc. Sc. (Tech.), Prof., Pshenychnyi A., Cand. of Sc. (Tech.)

East-Ukrainian Volodymyr Dal National University

kvt. Molodezhniy, 20-a, 91034, Lugansk, Ukraine

E-mail: branspiz@mail.ru

Miljavec D., Ph.D.

University of Ljubljana, Faculty of electrical engineering

Tzarska, 25, 1000, Ljubljana, Slovenia

E-mail: miljavec@fe.uni-lj.si

It is shown that decrease (damping) of tractive force at the end of the keeper travel is possible not only due to application of a special stationary pole design, but also due to change of the keeper shank geometric form. Results of computer modeling with the use of FEMM software product are produced. They confirm the damping effect when non-cylindrical keeper shanks are used.

Key words: armored electromagnet, hauling effort, damping, anchor.