

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБМОТОК ВКЛЮЧЕНИЯ И ОТКЛЮЧЕНИЯ В БИСТАБИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРИВОДАХ ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Обґрунтовано можливість й доцільність спільного застосування обмоток вмикання та вимикання при виконанні відповідних операцій вакуумними відмикачами з бістабільними електромагнітними приводами. Наведено порівняльний аналіз розрахункових характеристик бістабільного електромагніта для вакуумного відмикача при роздільному та спільному застосуванню обмоток вмикання та вимикання.

Обоснована возможность и целесообразность совместного использования обмоток включения и отключения при выполнении соответствующих операций вакуумными выключателями с бистабильными электромагнитными приводами. Приведен сравнительный анализ расчетных характеристик бистабильного электромагнита для вакуумного выключателя с раздельным и совместным использованием обмоток включения и отключения.

Введение. Современные электроустановки средних напряжений (6 – 35 кВ) характеризуются большими значениями токов коротких замыканий (КЗ), которые достигают десятков тысяч Ампер. Отключающая способность выключателей, которые защищают эти цепи коротких замыканий, должна отвечать уровню токов КЗ в этих установках.

В настоящее время на рынке выключателей средних напряжений доминируют вакуумные выключатели [1]. К современным вакуумным выключателям предъявляются требования по надежности работы при различных режимах эксплуатации, а также снижения собственного потребления вакуумного выключателя (особое значение это имеет при использовании резервных источников питания, для вакуумного выключателя таким источником члвляется конденсатор).

Как показал обзор конструкций вакуумных вы-

ключателей средних напряжений с бистабильными электромагнитными приводами, в них используются две обмотки – включения и отключения, которые работают попеременно при выполнении соответствующих операций [2].

Целью данной работы является обоснование возможности и целесообразности совместного использования обмоток включения и отключения бистабильных электромагнитных приводов при выполнении операций включения и отключения выключателя.

Одна из известных конструкций бистабильного электромагнита привода вакуумного выключателя [3] в положении «отключено» схематически изображена на рис. 1. На рисунке обозначено: 1 – неподвижная часть магнитопровода; 2 – обмотка включения; 3 – обмотка отключения; 4 – постоянные магниты; 5 – подвижная часть магнитопровода (якорь).

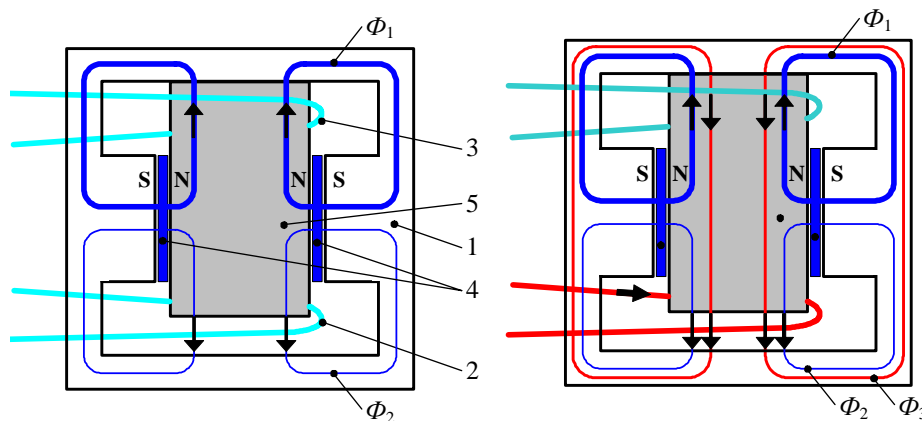


Рис. 1. Эскиз конструкции и схема магнитных потоков в бистабильном электромагните привода выключателя VM1 (ABB) в положении «отключено»: а – с обесточенными обмотками включения и отключения; б – с обесточенной обмоткой отключения и запитанной обмоткой включения.

Намагниченные встречно друг другу постоянные магниты, расположенные в зазоре между неподвижной частью магнитопровода и якорем, создают два магнитных потока – Φ_1 и Φ_2 . Если якорь расположен впрытик к верхнему горизонтальному участку неподвижной части магнитопровода (положение «отключено»), то магнитный поток Φ_1 намного превосходит поток Φ_2 , поэтому результирующая сила притяжения якоря к неподвижной части магнитопровода будет направлена вверх и якорь будет надежно удерживать-

ся в верхнем положении. Если же якорь окажется расположенным впрытик к нижнему горизонтальному участку неподвижной части магнитопровода (положение «овключено»), то поток Φ_1 станет намного меньше потока Φ_2 и результирующая сила притяжения якоря к неподвижной части магнитопровода будет направлена вниз и якорь будет надежно удерживаться в положении «включено». Таким образом, данный электромагнит имеет два устойчивых положения покоя, то есть является бистабильным.

Если через обмотку включения пропустить ток в направлении, показанном на рис. 1,б, то этот ток создаст магнитный поток Φ_3 , который в зазоре между якорем и нижним горизонтальным участком неподвижной части магнитопровода добавится к потоку Φ_2 , а поток в зазоре между якорем и верхним горизонтальным участком неподвижной части магнитопровода уменьшится, поскольку потоки Φ_1 и Φ_3 имеют противоположные направления. При определенном значении тока через обмотку включения суммарный поток в нижнем зазоре превысит поток в верхнем зазоре и, следовательно, сила притяжения якоря к неподвижной части магнитопровода снизу превысит силу притяжения якоря к неподвижной части магнитопровода сверху. В результате подвижная часть магнитопровода начнет двигаться в сторону второго положения покоя и останется в нем после обесточивания обмотки включения. Если после этого пропустить определенный ток через обмотку отключения, то это приведет к возвращению подвижной части магнитопровода в предыдущее положение покоя.

Недостатком рассмотренного электромагнитного привода является большое значение МДС срабатывания как при включении, так и при отключении аппарата, поэтому поиски технических решений, направленных на уменьшение МДС срабатывания бистабильных электромагнитов, являются актуальными.

Предлагаемый способ уменьшения МДС. Ниже рассматривается решение, направленное на уменьшение МДС срабатывания электромагнитного привода выключателя за счет совместного применения обмоток включения и отключения при выполнении соответствующих операций выключателем, а также приводятся результаты расчетов, подтверждающие эффективность этого решения.

Суть решения иллюстрируется схемой магнитных потоков в бистабильном электромагните на рис. 2 и заключается в том, что при осуществлении определенной операции, например, операции включения, ток пропускается не только через обмотку включения в направлении, показанном на рис. 1,б, но и через обмотку отключения в направлении, показанном на рис. 2.

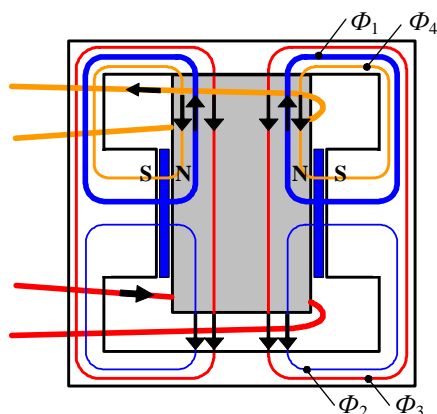


Рис. 2. Схема магнитных потоков в бистабильном электромагните при совместном использовании обеих обмоток при проведении операции включения

В этом случае в магнитопроводе кроме магнитных потоков Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 появится еще один поток – Φ_4 ,

который способствует уменьшению суммарного потока в верхнем зазоре, а следовательно к уменьшению силы притяжения якоря к верхнему горизонтальному участку неподвижной части магнитопровода. При этом ток через обмотку отключения, оказывающий размагничивающее действие на участке магнитной цепи с малым зазором, должен быть значительно меньше тока через обмотку включения, который может быть существенно уменьшен по сравнению с током в этой же обмотке при ее использовании без помощи обмотки отключения.

Для возвращения подвижной части в исходное положение следует пропустить ток через обмотку отключения в направлении, противоположном показанному на рис. 2, а через обмотку включения – а значительно меньший ток, чем в обмотке отключения) в направлении, противоположном показанному на рис. 1,б.

В подтверждение эффективности этого решения приведем результаты расчетов стационарных магнитных полей в магнитопроводе бистабильного привода выключателя с различными значениями МДС в нижней и верхней обмотках при выполнении выключателем операций включения и отключения.

Математическая формулировка задачи. Расчеты проводились для электромагнитного привода с осевой симметрией путем численного решения нелинейных дифференциальных уравнений осесимметричного магнитного поля.

Известно, что стационарное магнитное поле осесимметричного электромагнита описывается дифференциальным уравнением для векторного магнитного потенциала:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial A}{\partial r} - \frac{A}{r^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = -\mu(A) \cdot j(r, z), \quad (1)$$

где A – азимутная составляющая векторного магнитного потенциала; r, z – координаты области магнитного поля; μ – магнитная проницаемость в точке с координатами r, z , которая зависит от значения векторного магнитного потенциала в данной точке; j – плотность тока в точке с координатами r, z .

Областью решения данного является открытое пространство:

$$r \in (0, \infty); z \in (-\infty, \infty) \quad (2)$$

с граничным условием на оси:

$$A(0, z) = 0. \quad (3)$$

Уравнение (1) является нелинейным и не имеет аналитического решения при сложной конфигурации границ, в том числе и для рассматриваемого случая, потому для решения подобных уравнений применяются численные методы, которые реализуются на ЭВМ. В практике расчетов наибольшее распространение получил метод конечных элементов в компьютерном пакете FEMM (Finite Element Method Magnetics). Данный пакет не только позволяет рассчитывать магнитные поля, но и вычислять силы, действующие на отдельные замкнутые объекты.

Анализ полученных данных. В конструкции выключателей с бистабильными электромагнитными приводами обычно применяют рычажные передачи от электромагнитного привода к контактам главных це-

пей, расположенных в вакуумных дугогасительных камерах, причем тарельчатые пружины, которые создают контактное нажатие, регулируются на 2000 Н при начальном касании контактов и приблизительно на 2500 Н при полностью выбранном провале, который составляет 4 мм. Зазор контактов при полностью разомкнутых контактах, когда выключатель находится в положении «отключено», составляет 8 мм. Учитывая коэффициент передачи рычагов (1,5), и наличие трех полюсов, характеристика противодействующих сил (без учета сил трения и тяжести) выглядит так:

- полный ход электромагнита: $(4 + 8) \cdot 1,5 = 18$ мм;
- путь якоря до начального касания: $8 \cdot 1,5 = 12$ мм;
- провал, приведенный к оси электромагнита: $4 \cdot 1,5 = 6$ мм.

- сила начального контактного нажатия, приведенная к оси электромагнита: $(2000 \cdot 3) / 1,5 = 4000$ Н;
- сила конечного контактного нажатия, приведенная к оси электромагнита: $(2500 \cdot 3) / 1,5 = 5000$ Н.

Результаты расчета электромагнита, показанные на рис. 3, свидетельствуют о том, что даже при относительно больших значениях МДС, сила, которая действует на якорь при запитывании только одной обмотки оказывается не достаточной для перемещения якоря в противоположное положение покоя. В то же время при совместном использовании обеих обмоток, сила, действующая на якорь, изменяет знак и обеспечивает перемещение якоря в противоположное положение покоя даже при меньших суммарных значениях МДС, чем те которые указаны на рис. 3.

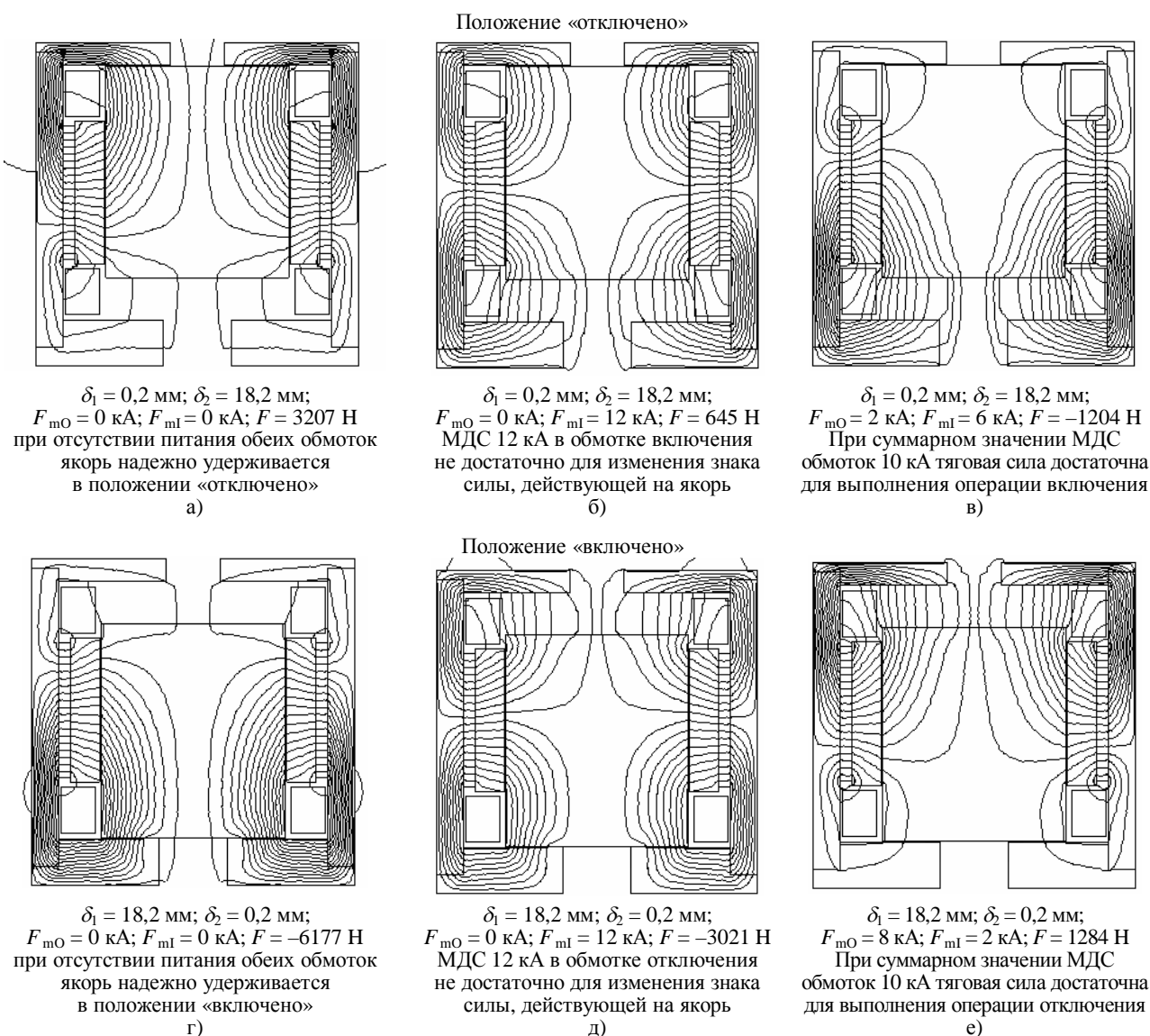


Рис. 3. Результаты расчета магнитного поля и тяговых при различных параметрах бистабильного электромагнита.
 F_{m0} – МДС обмотки отключения (O); F_{m1} – МДС обмотки отключения (I); F – тяговая сила

Следует иметь в виду, что сила сжатия тарельчатых пружин при замыкании главных контактов аппарата противодействует движению якоря электромагнита и к этой силе добавляются сила трения и сила тяжести контактов. В то же время, сила атмосферного давления, действующая на контакты и сила тяжести якоря способствуют движению якоря.

При размыкании главных контактов тарельчатые пружины, напротив, способствуют движению якоря электромагнита. Этому движению также способствует сила тяжести контактов, а сила трения, сила атмосферного давления, действующая на контакты в вакуумных камерах и сила тяжести якоря – противодействуют этому движению.

Анализ расчетов показывает, что при совместном использовании обмоток включения и выключения якорь начинает двигаться при значениях МДС, суммарно существенно меньших, чем значение МДС начала движения при использовании лишь одной обмотки. Но следует учитывать, что начало движения якоря не обязательно приводит к полностью выполненной операции включения, поскольку электромагниту приходится преодолевать большие противодействующие силы тарельчатых пружин после начального касания, вследствие чего при малых значениях МДС обмотки включения подвижная часть может остановиться в положении начального касания контактов.

При больших значениях МДС такое зависание якоря не наблюдается в связи с тем, что на начальном участке движения якорь получает большую кинетическую энергию. При этом силы тарельчатых пружин преодолевается за счет инерции якоря, а на конечном этапе движения еще и МДС постоянных магнитов.

Бистабильный электромагнит с осесимметричным магнитопроводом, как правило, не требует кинетической энергии для преодоления сил тарельчатых пружин даже при наличии тока только в одной обмотке включения в момент начального касания контактов.

На рис. 5 представлены результаты расчета магнитного поля в момент начального касания контактов ($\delta_1 = 12,2$ мм; $\delta_2 = 6,2$ мм) и при запитывании только одной обмотки включения ($F_{ml} = 8$ кА). Тяговая сила, действующая на якорь, при указанных параметрах равна -4270 Н, что достаточно для преодоления сил создаваемых в этот момент тарельчатыми пружинами ($2000 \cdot 3 / 1,5 = 4000$ Н) без участия сил инерции.

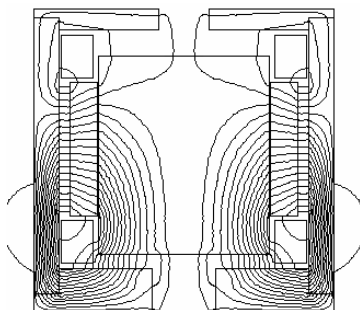


Рис. 5. Результаты расчета магнитного поля в момент начального касания контактов при использовании только одной обмотки включения

Совместное применение обмоток оказывается эффективным не только при выполнении операции включения, но и при выполнении операции отключения. Следует отметить, что начало движения якоря в направлении отключения обычно приводит к полностью выполненной операции отключения, поскольку электромагнитному приводу не приходится преодолевать другие противодействующие силы кроме сил трения.

Приведенные выше теоретические соображения получили экспериментальное подтверждение.

Выводы.

1. Большинство существующих бистабильных электромагнитных приводов, обеспечивает достаточно большую силу удержания при обесточенных обмотках, но имеет и определенные недостатки, главным из которых является значительная МДС срабатывания как при включении, так и при отключении аппарата, что

осложняет процессы коммутации обмоток, требует завышенных параметров накопительного конденсатора, и в ряде случаев делает невозможным выполнение автоматического повторного включения (АПВ) при использовании конденсатора как источника питания.

2. Другим недостатком существующих электромагнитных приводов является то, что процесс отключения может не произойти, если контакты изнашиваются настолько, что тарельчатые пружины, которые обеспечивают контактное нажатие, не сжимаются, следовательно не создают силу, которая способствует процессу размыкания.

3. Техническое решение относительно совместного использования обмоток при операции включения и отключения вакуумного выключателя позволяет существенно уменьшить МДС срабатывания как при включении, так и отключении и обойтись без накопительно конденсатора при оперативных срабатываниях, что обеспечивает гарантированное выполнение АПВ.

4. Проведенные расчеты подтверждают эффективность предложенного технического решения и это утверждение экспериментально подтверждено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокунин Г.А., Тилер Г. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения. – С.-Петербург: Издательство Сизова М.П., 2002. – 147 с.
2. Гречко А.М., Емельянов В.Л. Аналітичний огляд конструкцій та систем керування вакуумних вимикачів. Вестник НТУ «ХПИ», №12, с. 40-49.
3. Edgar Dullni, Harald Fink, Christian Reuber. Vacuum circuit-breaker with permanent magnetic actuator and electronic control. – <http://www.abb.com>.
4. Клименко Б.В., Гречко А.М., Ереско А.В. Электромагнитный привод с двухпозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего напряжения. – «Электротехника і Електромеханіка», 2007 р., №6, с. 40-43.

Bibliography (transliterated): 1. Evdokunin G.A., Tiler G. Sovremennaya vakuumnaya kommutatsionnaya tehnika dlya setej srednego napryazheniya. – S.-Peterburg: Izdatel'stvo Sizova M.P., 2002. – 147 s. 2. Grechko A.M., Emel'yanov V.L. Analitichnij oglyad konstrukcij ta sistem keruvannya vakuumnih vimikachiv. Vesnik NTU «HPI», №12, s. 40-49. 3. Edgar Dullni, Harald Fink, Christian Reuber. Vacuum circuit-breaker with permanent magnetic actuator and electronic control. – <http://www.abb.com>. 4. Klivenko B.V., Grechko A.M., Eres'ko A.V. 'Elektromagnitnyj privod s dvuhpozicionnoj magnitnoj zaschelkoj dlya vakuumnogo vyklyuchatelya srednego napryazheniya. – «Elektrotehnika i Elektromehaniка», 2007 r., №6, s. 40-43.

Поступила 25.01.2011

Бугайчук Виктор Михайлович

ТОВ «АВМ ампер»

Украина, Кременчуг, ул. Красина, 6

тел. (057) 3-30-98, e-mail: bvm@abm-amper.com,

Клименко Борис Владимирович, д.т.н, проф.

Емельянов Вадим Леонидович

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21

НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"

тел. (057) 707-62-81, e-mail: evl@kpi.kharkov.ua,

kbv@kpi.kharkov.ua

Bugaychuk V.M., Klymenko B.V., Emeljanov V.L.

Rationale for sharing on and off windings in a bistable electromagnetic actuator vacuum circuit breaker.

The possibility and feasibility of joint use of the windings on and off when the relevant transactions vacuum circuit breaker with bistable electromagnetic actuators. An analysis of the design characteristics of the bistable solenoid for vacuum circuit breaker you with separate windings, and sharing on and off.

Key words – bistable electromagnetic actuator, vacuum circuit breakers.