

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МАГНИТОПРОВОДА БИСТАБИЛЬНЫХ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ АКТУАТОРОВ НА ВРЕМЯ ИХ ТРОГАНИЯ

У статі розглянуто вплив відносної магнітної проникності та провідності матеріалу магнітопроводу на час рушення бістабільного двохпозиційного актуатора вакуумного вимикача.

В статтє рассматривается влияние относительной магнитной проницаемости и проводимости материала магнитопровода на время трогания бистабильного двухпозиционного актуатора вакуумного выключателя.

В процессе производства опытных образцов актуаторов вакуумных выключателей средних напряжений [1, 2] (рис. 1) приходится сталкиваться с проблемой отсутствия требуемой марки стали для изготовления магнитопровода и неодинаковость параметров постоянных магнитов. В этой связи возникает вопрос: "Насколько влияют значения магнитной проницаемости и удельного электрического сопротивления материала на параметры трогания актуатора, какими магнитами можно заменить требуемые"? Ответить на этот вопрос можно путем расчета динамики трогания системы, описанной в [3], при подключении обеих катушек актуатора к источнику постоянного напряжения.

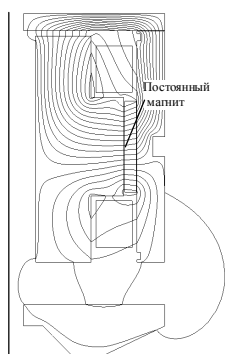


Рис. 1. Поле актуатора в начальном положении якоря

Целью данной статьи является определение степени влияния характеристик материала магнитопровода и постоянных магнитов на параметры трогания поляризованного бистабильного актуатора.

Для проведения таких расчетов в качестве "хорошего" материала принимался материал с максимальной относительной магнитной проницаемостью равной 6000 единиц. Для "плохого" материала максимальная относительная магнитная проницаемость принималась равнялась 2000 единицам. Удельное электрическое сопротивление изменялось от $20 \cdot 10^{-8}$ до $2500 \cdot 10^{-8}$. Последнее значение сопротивления определялось исходя из предположения о том, что магнитопровод выполнен шихтованным. В этом случае вычисление значения эквивалентного сопротивления вихревым токам может быть определено на основании усредненных потерь удельных потерь при переменном магнитном потоке.

Допущения, принимаемые при расчете:

- кривая относительной магнитной проницаемости материала аппроксимировалась экспоненциальной

функцией при помощи метода наименьших квадратов для Ст.10;

- при аппроксимации максимальная магнитная проницаемость совпадала с начальной, т.е. не учитывался характер кривой намагничивания на начальных участках;

- удельное сопротивление стали, эквивалентное шихтованному магнитопроводу, определялось исходя из удельных потерь при синусоидальном характере потока и усредненном значении магнитной индукции по сечению магнитопровода;

- потери на гистерезис не учитывались.

На рис. 2 приведен вид относительной магнитной проницаемости, аппроксимированный экспоненциальной функцией, подобранной на основе метода наименьших квадратов.

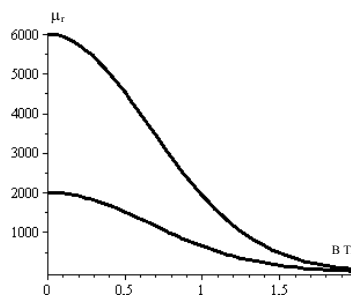


Рис. 2. Кривые относительной магнитной проницаемости

Варианты расчета показаны в табл. 1.

Таблица 1

Сочетание расчетных вариантов

| | |
|----------------------------|----------------------------|
| $\mu_{\min}-\sigma_{\min}$ | $\mu_{\min}-\sigma_{\max}$ |
| $\mu_{\max}-\sigma_{\min}$ | $\mu_{\max}-\sigma_{\max}$ |

На рис. 3 показаны значения электромагнитной силы в зависимости от времени на начальном этапе движения актуатора при подключении его катушек к источнику постоянного напряжения 220 В с постоянными магнитами NdFeB.

На основании рис. 3 можно заключить: уменьшение максимальной магнитной проницаемости в три раза снижает начальную электромагнитную силу на 313 Н (на 14 %); изменение времени трогания (ноль электромагнитной силы) изменяется при этом с 8,4 мс до 8,85 мс, т.е. незначительно; увеличение проводимости в 125 раз (сплошной магнитопровод) увеличивает время трогания с 8,85 мс до 14,85 мс, т.е. в 1,6 раза.

На рис. 4 показаны суммарные значения тока ка-

тушек в зависимости от значения проводимости (значение магнитной проницаемости практически не влияет на ток катушек).

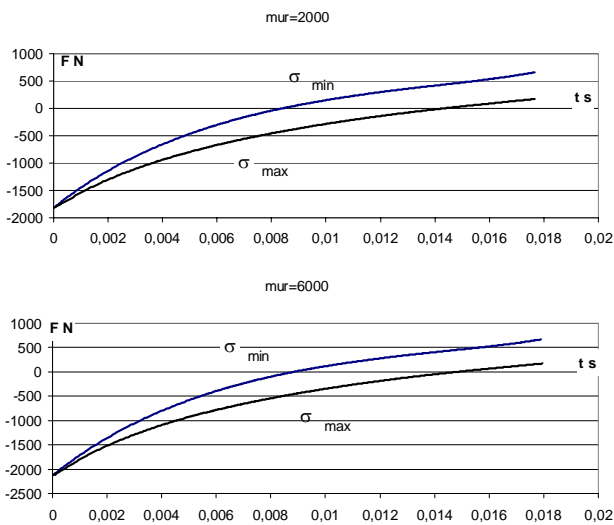


Рис. 3. Значения электромагнитной силы для принятых вариантов расчета

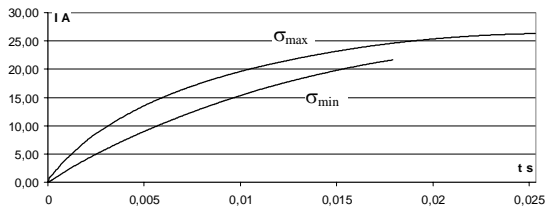


Рис. 4. Значения токов катушек в зависимости от проводимости магнитопровода

Из рис. 4 следует, что значения проводимости существенно влияет на скорость нарастания тока и его значения, которые могут значительно отличаться в начальные моменты времени. Изменение скорости нарастания магнитного потока в зависимости от величины проводимости показаны на рис. 5.

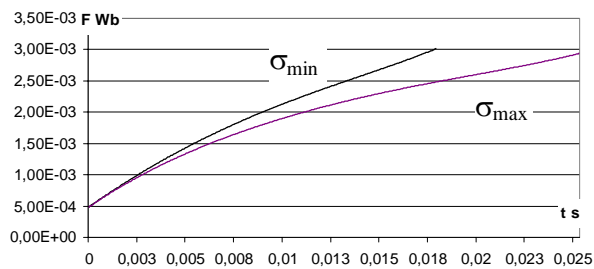


Рис. 5. Скорость нарастания магнитного потока в функции проводимости материала магнитопровода при относительной начальной магнитной проницаемости равной 6000 единиц

Очевидно, что более быстрое нарастание магнитного потока обеспечивает меньшее время трогания актуатора.

Определенный интерес представляют значения мощности потерь в магнитопроводе в процессе трогания бистабильного поляризованного актуатора.

Потери в магнитопроводе определяются как:

$$P = \int_V \vec{E} \cdot \vec{j} \cdot dV, \quad (1)$$

где \vec{E} – напряженность электрического поля в магнитопроводе; \vec{j} – плотность вихревых токов в магнитопроводе; V – объем магнитопровода.

Известно, что напряженность электрического поля может быть определена:

$$\vec{E} = -\frac{\partial A_\varphi(r, z, t)}{\partial t} \cdot \vec{e}_\varphi, j_\varphi = -\sigma \cdot \frac{\partial A_\varphi(r, z, t)}{\partial t} \cdot \vec{e}_\varphi, \quad (2)$$

где $A_\varphi(r, z, t)$ – векторный магнитный потенциал, полученный в результате расчета нестационарного электромагнитного поля; σ – проводимость материала магнитопровода.

Тогда

$$P = \int_V \sigma \cdot \left(\frac{\partial A_\varphi(r, z, t)}{\partial t} \right)^2 \cdot dV. \quad (3)$$

Результаты расчета приведены на рис. 6.

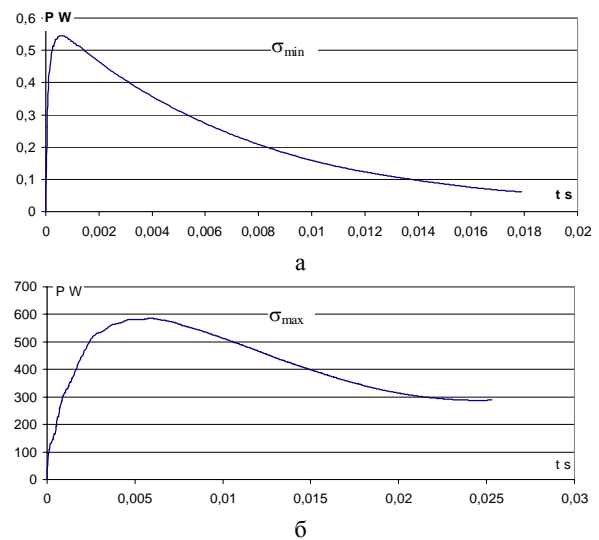


Рис. 6. Мгновенные потери в магнитопроводе: а – минимальная проводимость; б – максимальная проводимость

Несмотря на значительную разницу в мгновенных значениях, общие потери энергии в сплошном магнитопроводе за время включения невелики и составляют примерно 11 Дж.

Как следует из проведенных расчетов, несмотря на значительные относительные отличие расчетных вариантов по времени трогания, их абсолютные значения невелики – порядка одного полупериода переменного тока. Это можно объяснить спецификой конструкции магнита с двумя относительно большими воздушными зазорами, которые уменьшают эквивалентную индуктивность системы. Помимо этого, в начальном и конечном положениях якоря магнитная система находится в состоянии насыщения (рис. 7), что так же уменьшает эквивалентную индуктивность системы.

В процессе трогания актуатора наблюдается крайне неравномерное распределением магнитной индукции по сечению магнитопровода (поток сосредоточен по внутреннему периметру магнита) (рис. 8).

Как показывают расчеты, наибольшее значение на характеристики магнита, как статические, так и динамические, оказывает выбор постоянного магнита. Исследование проводилось для трех видов магнитов: керамический магнит с нелинейной характеристикой – $H_c = 191262$ А/м; магнит SmCo ($H_c = 693000$ А/м); магнит на основе NdFeB – $H_c = 883300$ А/м. На рис. 9 показана зависимость силы в конечном (а) и начальном (б) положениях якоря от значения H_c .

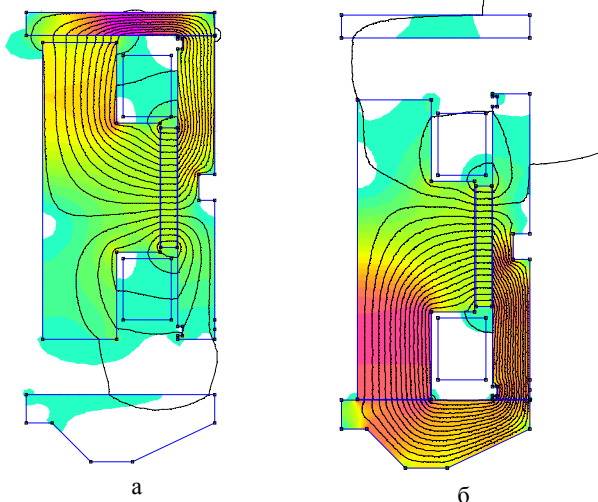


Рис. 7. Значения магнитной индукции в начальном (а) и конечном (б) положениях якоря

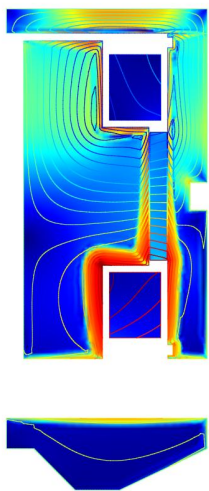


Рис. 8. Распределение магнитной индукции в начальный момент времени (5 мс)

Выводы. Основное влияние на время трогания оказывает значение проводимости материала магнитопровода; трехкратное уменьшение магнитной проницаемости снижает начальную силу всего на 14 %; шихтовка магнитопровода снижает ток катушек всего на 20 % в переходном режиме, требуя при этом изменения конструкции актуатора и удорожания производства; несмотря на значительную величину мгновенных потерь в сплошном магнитопроводе, общие потери энергии невелики; быстроедействие магнита обеспечивается конструкцией актуатора (наличие двух воздушных зазоров и насыщением материала магнитопровода в начальном и конечном положениях якоря); распределение магнитного потока по сечению магнитопровода в переходных

режимах крайне неравномерное; наибольшее влияние на работу актуатора оказывают параметры постоянных магнитов, которые нуждаются во входном контроле.

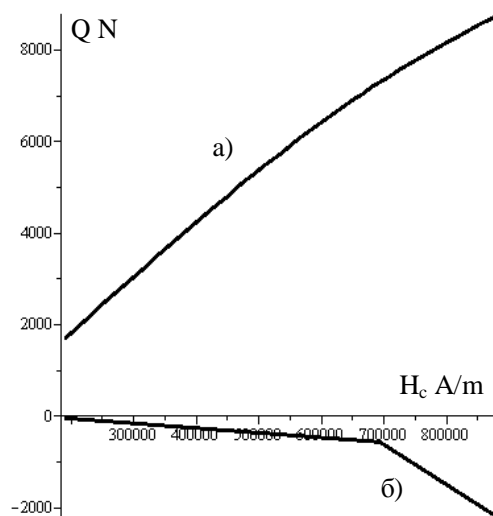


Рис. 9. Значение конечной силы в зависимости от коэрцитивной силы постоянных магнитов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименко Б.В., Бугайчук В.М., Гречко А.М. Опытный образец двухпозиционного привода вакуумного выключателя среднего напряжения // *Электротехника і електромеханіка*. – 2005. – № 2. С. 23-27.
2. Клименко Б.В., Бугайчук В.М., Гречко А.М., Выровец С.В. Быстродействующий электромагнитный привод с вытеснением магнитного поля для вакуумного выключателя среднего напряжения // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2006. – № 4. – С. 22-26.
3. Байда Е.И. Моделирование динамических характеристик электромагнитных механизмов постоянного тока с магнитной защёлкой. // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2010. – № 2. – С. 3-5.

Bibliography (transliterated): 1. Klimenko B.V., Bugajchuk V.M., Grechko A.M. Opytnyj obrazec dvuhpozicionnogo privoda vakuumnogo vyklyuchatelya srednego napryazheniya // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2005. - № 2. S. 23-27. 2. Klimenko B.V., Bugajchuk V.M., Grechko A.M., Vyrovets S.V. Bystrodejstvuyuschij `elektromagnitnyj privod s vytesneniem magnitnogo polya dlya vakuumnogo vyklyuchatelya srednego napryazheniya // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2006. - № 4. - S. 22-26. 3. Bajda E.I. Modelirovanie dinamicheskikh harakteristik `elektromagnitnyh mehanizmov postoyannogo toka s magnitnoj zaschelkoj. // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2010. - № 2. - S. 3-5.

Поступила 10.02.2013

Байда Евгений Иванович, к.т.н., доц.
кафедра "Электрические аппараты"
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
61002, Харьков, ул. Фрунзе 21
тел. (057) 7076976, e-mail: baida_kpi@i.ua

Baida E.I.

Influence of bistable polarized actuator core magnetic permeability and resistivity on breakaway time.

The paper analyzes influence of specific permeability and resistivity of magnetic core material on breakaway time for a vacuum circuit breaker bistable two-position actuator.

Key words – specific permeability, resistivity, breakaway time, bistable two-position actuator.