

## ВЛИЯНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ДЕМПФЕРА НА ДИНАМИКУ ДВУХПОЗИЦИОННОГО ПОЛЯРИЗОВАННОГО АКТУАТОРА

*Розглядається можливість зниження швидкості руху якоря актуатора вакуумних викивачів за допомогою рідинного демпфера. У статті наведено порівняльні розрахунки динаміки руху приведеної маси якоря з урахуванням протидіючих сил гідравлічного демпфера.*

*Рассматривается возможность снижения скорости движения якоря актуатора вакуумных выключателей при помощи жидкостного демпфера. В статье приведены сравнительные расчеты динамики движения приведенной массы якоря с учетом противодействующих сил гидравлического демпфера.*

В настоящее время наиболее перспективными на рынке вакуумных выключателей средних напряжений являются выключатели с бистабильными двухпозиционными актуаторами фирмы АББ [1]. Такие выключатели просты по конструкции, не требуют профилактического обслуживания и надежны в эксплуатации. Конструкция актуатора фирмы АББ защищена патентом, поэтому исследовались альтернативные конструкции актуаторов [2, 3], динамика которых была рассмотрена в [4-12]. Характерной особенностью работы таких актуаторов является отсутствие противодействующих сил (за исключением сил трения) на большей части пути якоря (противодействующая сила появляется в момент касания контактов). Такая особенность противодействующей характеристики приводит к тому, что скорость движения контактов в момент из замыкания достаточно велика и может достигать значений более 1 м/с. Учитывая значительные движущие массы, можно показать [13-16], что в системе будут возникать большие динамические напряжения. Известно, что такие напряжения зависят от квадрата скорости движения системы. Поэтому, целью данной статьи являлось исследование влияния гидравлического демпфера на скорость замыкания контактов, а так же оценка влияния демпфера на параметры включения актуатора (время включения, динамика изменения движущей силы, ток катушек).

Возможная конструкция выключателя с демпфером показана на рис. 1.

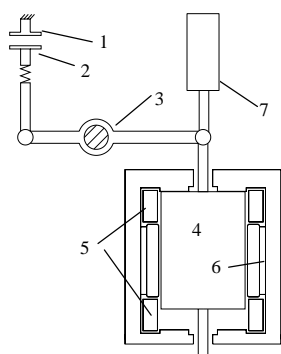


Рис. 1. Схема механики привода: 1 – неподвижный контакт; 2 – подвижный контакт; 3 – тяги; 4 – якорь; 5 – катушки; 6 – постоянные магниты; 7 – гидравлический демпфер

Гидравлический демпфер представляет собой металлический цилиндр, заполненный жидкостью в котором может перемещаться поршень, связанный с якорем актуатора (рис. 1).

В процессе теоретического исследования влияния гидравлического демпфера на динамику актуато-

ра были решены следующие задачи:

- рассчитана сила сопротивления движению поршня в зависимости от величины зазора между поршнем и корпусом демпфера, а так же скорости движения поршня;

- рассчитана динамика движения актуатора при различных величинах демпфирующей силы.

Первая проблема связана с решением уравнения Навье-Стокса, которое совместно с уравнением несжимаемости дает решение поставленной задачи [17]:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\nabla \times \vec{u}) \times \vec{u} + \nabla \left( \frac{u^2}{2} + U \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \nabla p - \frac{\eta}{\rho} \cdot \left[ \nabla^2 \vec{u} + \frac{1}{3} \cdot \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) \right] = 0; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0,$$

где  $\vec{u}$  – вектор скорости;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $\eta$  – вязкость;  $U$  – потенциальная энергия объемных сил.

Очевидно, что демпфирующая сила зависит от вязкости жидкости, зазора между поршнем и корпусом, скорости движения поршня.

Если в (1)  $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0$ , или  $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \approx 0$ , (2)

то можно предположить, что движение жидкости отслеживает движение поршня без задержки, а процесс движения жидкости будет квазистатическим. Это условие будет выполняться в случае медленного и плавного нарастания скорости поршня или в случае движения поршня с постоянной скоростью. В противном случае, членом  $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$  пренебрегать нельзя. Очевидно, что условие  $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \neq 0$  выполняется в случае удара подвижной части выключателя о поршень. Для выяснения динамической зависимости демпфирующей силы от скорости перемещения поршня была решена мультифизическая задача динамики движения поршня и уравнения (1). Причем, движение поршня задавалось описанием закона его движения:

$$z := a \cdot (1 + \tanh(b \cdot (t - c))), \quad (3)$$

где  $a, b, c$  – коэффициенты.

На рис. 2 показана расчетная модель и вид характеристики перемещения поршня.

Изменяя масштабный коэффициент времени (3), можно изменять величину хода и скорости движения поршня. Расчеты проводились для квазистатического и динамического режимов по (1-3).

На рис. 3 показаны значения скорости движения поршня и демпфирующей силы для квазистатического режима.

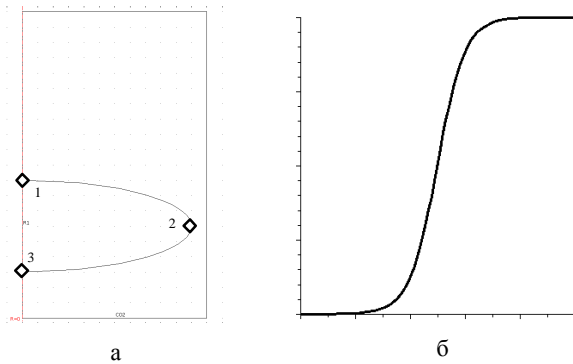


Рис. 2. Расчетная модель демпфера (а) и вид характеристики хода поршня (б)

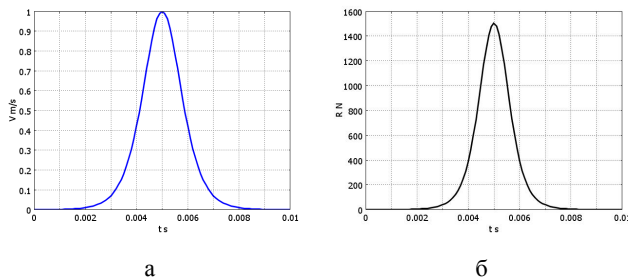


Рис. 3. Значение скорости (а) и демпфирующей силы (б) для квазистатического режима

Из рис. 3 следует, что сила существенно зависит от скорости и повторяет характер ее кривой.

Несколько иначе выглядят аналогичные зависимости для динамического режима (рис. 4).

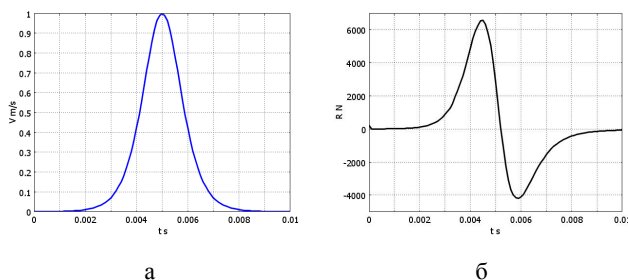


Рис. 4. Значение скорости (а) и демпфирующей силы (б) для динамического режима

При той же скорости движения динамическая сила демпфирования больше квазистатической более чем в 4 раза, а по виду повторяет характер ускорения (рис. 4). На рис. 5 показано значение давления на поверхности поршня в динамическом режиме в точках, показанных на рис. 2.

На основании анализа полученных данных можно заключить:

- демпфирующая сила может достигать значительных величин даже при относительно небольших скоростях;

- движущиеся части выключателя должны быть связаны с демпфером на всем пути, не допуская ударных нагрузок, так как в этом случае гидравлический демпфер ведет себя как жесткая преграда, существенно увеличивая динамические нагрузки на привод.

Учитывая данные полученные выше, был проведен расчет зависимости силы демпфирования в функции скорости движения поршня и величины зазора между корпусом и поршнем демпфера. Расчет прово-

дился по схеме (рис. 2,а), причем, задавалось движение не поршня, а жидкости обтекающей его с постоянной скоростью. На рис.6 приведена картина поля скоростей жидкости при обтекании поршня для одного из значений скорости жидкости на входе системы.

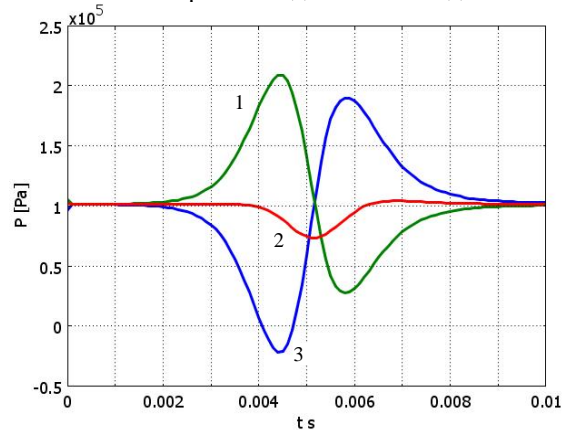


Рис. 5. Динамическое давление на поверхности поршня (см. рис. 2,а)

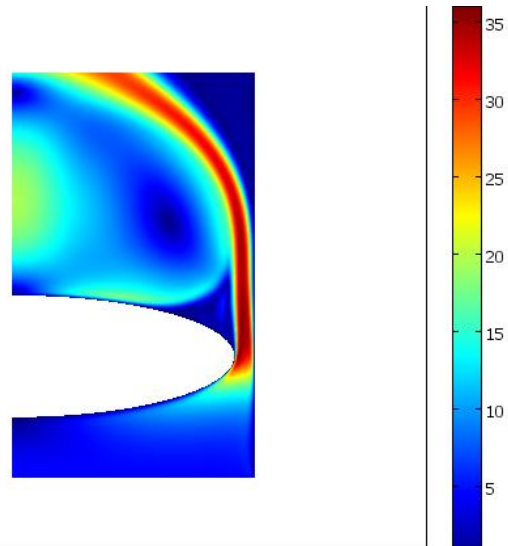


Рис. 6. Картина поля скоростей обтекания жидкостью поршня

Аналогичные расчеты были проведены для различных зазоров между поршнем и корпусом в функции скорости.

Такая зависимость хорошо аппроксимируется функцией вида:

$$R = a \cdot u + b \cdot u^2, \quad (4)$$

где  $R$  – демпфирующая сила;  $u$  – модуль скорости движения поршня.

На рис. 7 показан результат расчета и аппроксимирующая функция (4) для одного из вариантов расчетов.

Как следует из рис. 7, аппроксимация вида (4) хорошо описывает расчетные данные.

Дальнейшие расчеты по определению демпфирующей силы проводились для нескольких величин зазоров между поршнем и корпусом: 0.2 мм; 0.15 мм; 0,1 мм; 0,01 мм. На рис. 8 показаны результаты таких расчетов.

По рис. 8 можно заключить, что демпфирующие силы могут принимать достаточно большие значения и, следовательно, существенно влиять на скорость движения якоря актуатора вакуумных выключателей.

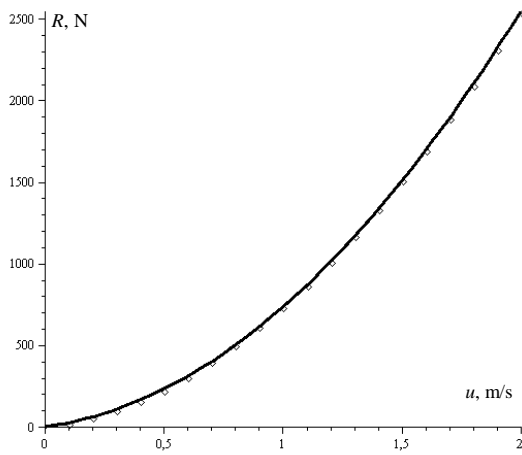


Рис. 7. Расчетные значения (точки) и аппроксимирующая функция (сплошная линия)

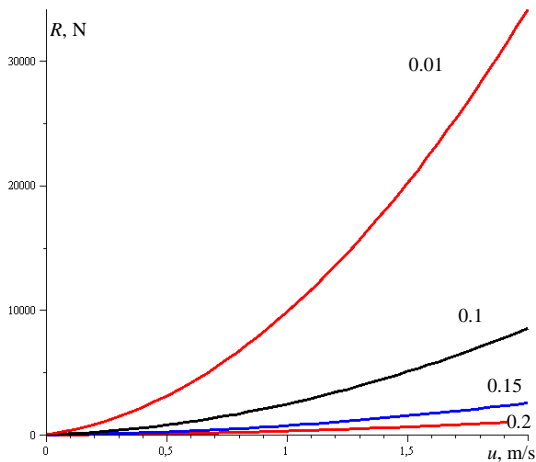


Рис. 8. Зависимость демпфирующей силы от скорости потока и зазора

Для расчета влияния демпфера на динамику актуатора вакуумного выключателя в уравнении движения была учтена демпфирующая сила, уравнение которой задается в виде (4). Остальные уравнения (система уравнений электромагнитного поля в неоднородно, нелинейной, проводящей, движущейся среде с учетом постоянных магнитов и уравнения электрической цепи, с учетом приведенного по потокоцеплению магнитного потока) остаются без изменений [5-12].

$$\begin{cases} \frac{d(m(z(t)) \cdot u(t))}{dt} = Q(z(t)) - P(z(t)) - R(u(t)); \\ \frac{dz(t)}{dt} = u(t); \\ z(0) = 0, u(0) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где  $Q$  – электромагнитная сила;  $P$  – противодействующая сила;  $R$  – демпфирующая сила.

Результаты расчета динамики актуатора приведены для двух режимов:

- отсутствие демпфера;
- при максимальной силе демпфирования (рис. 8).

Все остальные значения будут находиться в этом интервале. Расчетные значения показаны на последующих рисунках.

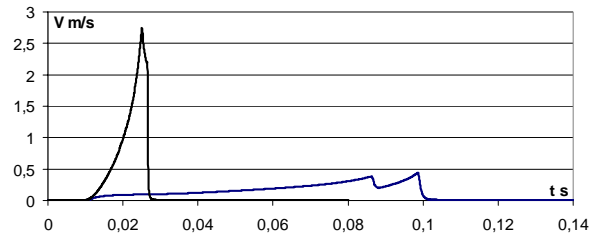


Рис. 9. Временная зависимость скорости движения якоря

Как следует из рис. 9, скорость контактов в момент соударения удалось уменьшить более чем в семь раз, что снижает кинетическую энергию удара более чем в 49 раз. Кроме того, существенно снижена скорость удара самого якоря актуатора, что так же является положительным результатом. Время включения при этом возросло с 25 мс до 86 мс, но данный параметр не является особо существенным. Положительный результат демпфирования сказывается так же и на динамической тяговой характеристике, показанной на рис. 10.

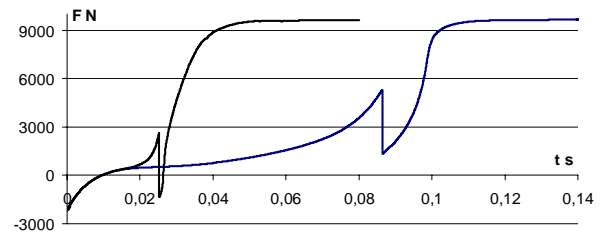


Рис. 10. Суммарная сила, действующая на якорь актуатора

В случае демпфирования отсутствует отрицательный скачок силы в момент замыкания контактов, вызванный малым значением ампервитков системы за счет высокой скорости движения якоря (велика противоЭДС движения). Подтверждением этому служат значения токов в катушках "включения" и "отключения", показанные на рис. 11.

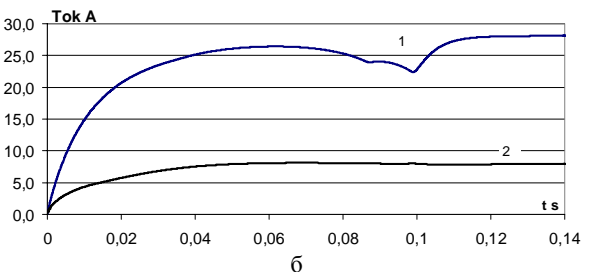
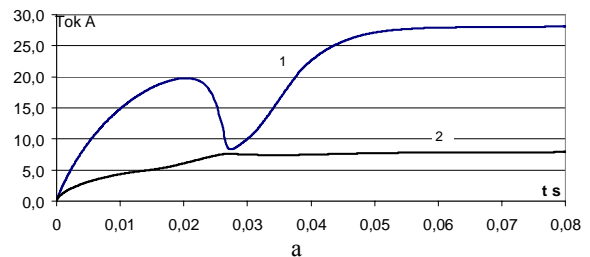


Рис. 11. Значения токов в катушке включения 1 и катушке отключения 2 актуатора без демпфера (а) и с демпфером (б)

Как следует из рис. 11, в случае демпфирования ток в катушках по форме ближе к току установившегося значения и больше по величине в переходном режиме, что и обуславливает большие значения тяговой силы.

## ВЫВОДЫ

Гидравлический демпфер позволяет существенно снизить скорость замыкания контактов. Демпфирование должно осуществляться на всем пути движения якоря, что исключает ударные нагрузки. Созданные мультифизические модели динамики актуатора и жидкостного демпфера позволяют провести теоретический расчет параметров демпфирования и найти конструктивные решения повышающие надежность работы вакуумного выключателя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакуумный выключатель VM1 с электромагнитным приводом [Электронный ресурс] / Режим доступа: www.abb.com.
2. 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.
3. 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.
4. Байда Е.И. Расчет переходных процессов в электромагнитном механизме на основании уравнений электромагнитного поля // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2008. – № 6. – С. 39-43.
5. Байда Е.И. Влияние проводимости материала на динамические характеристики электромагнитных механизмов постоянного тока // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2010. – № 1. – С. 3-5.
6. Байда Е.И. Моделирование динамических характеристик электромагнитных механизмов постоянного тока с магнитной защелкой // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2010. – № 2. – С. 3-5.
7. Байда Е.И. Моделирование процесса отключения электромагнита постоянного тока с магнитной защелкой // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2010. – № 3. – С. 6-9.
8. Байда Е.И. Расчет динамики двухпозиционного электромагнита постоянного тока с магнитной защелкой // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2010. – № 4. – С. 10-12.
9. Байда Е.И. Влияние формы напряжения источника питания на динамические характеристики электромагнита постоянного тока // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2010. – № 5. – С. 3-4.
10. Байда Е.И. Влияние добавочного сопротивления на время трогания двухпозиционного электромагнита с магнитной защелкой вакуумного выключателя среднего напряжения // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2011. – № 4. – С. 13-15.
11. Байда Е.И. Математические модели подключения бистабильных поляризованных актуаторов к источникам энергии // *Вісник НТУ "ХПИ"*. – 2012. – № 49. – С. 9-13.
12. Байда Е.И. Динамика нечеткого срабатывания бистабильного электромагнитного актуатора на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2012. – № 5. – С. 18-20.
13. Беляев Н.М. Сопротивление материалов / Беляев Н.М. // – 15-е изд. – М.: Наука, 1976. – 607 с.
14. Снитко Н.К. Строительная механика: Учебник для вузов / Снитко Н.К. // – 3-е изд., перераб. – М.: Высш. школа, 1980. – 431 с.
15. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. Главная редакция физ.-мат. литературы / Феодосьев В.И. // – М.: Наука, 1972. – 544 с.
16. Сахаров В.П. Проектирование электрических аппаратов (Общие вопросы проектирования). Учебное пособие для студентов электротехнических вузов / Сахаров В.П. // М.: Высшая школа, 1966. – 599 с.

17. Френкель Я.И. Курс теоретической механики / Френкель Я.И. // – Ленинград: Типография "Красный печатник", 1939. – 386 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Vakuumnyj vyklyuchatel' VM1 s `elektromagnitnym privodom [Elektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: www.abb.com. 2. Klimenko B.V., Bugajchuk V.M., Grechko A.M. Opytnyj obrazec dvuhpozicionnogo privoda vakuumnogo vyklyuchatelya srednego napryazheniya // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2005. - № 2. - С. 23-27. 3. Klimenko B.V., Bugajchuk V.M., Grechko A.M., Vyrovets S.V. Bystrodejstvuyushij `elektromagnitnyj privod s vytesneniem magnitnogo polya dlya vakuumnogo vyklyuchatelya srednego napryazheniya // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2006. - № 4. - С. 22-26. 4. Bajda E.I. Raschet perhodnyh processov v `elektromagnitnom mehanizme na osnovanii uravnenij `elektromagnitnogo polya // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2008. - № 6. - С. 39-43. 5. Bajda E.I. Vliyanie provodimosti materiala na dinamicheskie harakteristiki `elektromagnitnyh mehanizmov postoyannogo toka // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2010. - № 1. - С. 3-5. 6. Bajda E.I. Modelirovanie dinamicheskikh harakteristik `elektromagnitnyh mehanizmov postoyannogo toka s magnitnoj zaschelkoj // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2010. - № 2. - С. 3-5. 7. Bajda E.I. Modelirovanie processa otklyucheniya `elektromagnita postoyannogo toka s magnitnoj zaschelkoj // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2010. - № 3. - С. 6-9. 8. Bajda E.I. Raschet dinamiki dvuhpozicionnogo `elektromagnita postoyannogo toka s magnitnoj zaschelkoj // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2010. - № 4. - С. 10-12. 9. Bajda E.I. Vliyanie formy napryazheniya istochnika pitaniya na dinamicheskie harakteristiki `elektromagnita postoyannogo toka // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2010. - № 5. - С. 3-4. 10. Bajda E.I. Vliyanie dobavochnogo soprotivleniya na vremya trovaniya dvuhpozicionnogo `elektromagnita s magnitnoj zaschelkoj vakuumnogo vyklyuchatelya srednego napryazheniya // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2011. - № 4. - С. 13-15. 11. Bajda E.I. Matematicheskie modeli podklyucheniya bistabil'nyh polyarizovannyh aktuatorov k istochnikam `energii // *Visnik NTU "HPI"*. - 2012. - № 49. - С. 9-13. 12. Bajda E.I. Dinamika nechetkogo srabatyvaniya bistabil'nogo `elektromagnitnogo aktuatora na baze vysokokoer'civnyh postoyannyh magnitov // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2012. - № 5. - С. 18-20. 13. Belyaev N.M. Soprotivlenie materialov / Belyaev N.M. // - 15-e izd. - М.: Nauka, 1976. - 607 s. 14. Snitko N.K. Stroitel'naya mehanika: Uchebnik dlya vuzov / Snitko N.K. // - 3 e izd., pererab. - М.: Vyssh. shkola, 1980. - 431 s. 15. Feodos'ev V.I. Soprotivlenie materialov. Glavnaya redakciya fiz.-mat. literatury / Feodos'ev V.I. // - М.: Nauka, 1972. - 544 s. 16. Saharov V.P. Proektirovanie `elektricheskikh apparatov (Obschie voprosy proektirovaniya). Uchebnoe posobie dlya studentov `elektrotehnicheskikh vuzov / Saharov V.P. // М.: Vysshaya shkola, 1966. - 599 s. 17. Frenkel' Ya.I. Kurs teoreticheskoy mehaniki / Frenkel' Ya.I. // - Leningrad: Tipografiya "Krasnyj pechatnik", 1939. - 386 s.

Поступила 24.04.2013

*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

*Bajda E.I.*

### **Impact of a hydraulic damper on two-position polarized actuator dynamics.**

A feasibility of reducing a vacuum circuit-breaker actuator armature speed by means of a liquid damper is analyzed. The paper presents comparative calculations of the armature reduced mass motion dynamics with allowance for the hydraulic damper counter forces.

**Key words – hydraulic damper, dynamics, motion, vacuum circuit-breaker.**