

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА С ОДНОПОЗИЦИОННОЙ МАГНИТНОЙ ЗАЩЕЛКОЙ

Гречко А.М.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"  
тел. (057) 707-62-81, e-mail: grechko@kpi.kharkov.ua.

*Проведені дослідження динамічних характеристик електромагнітного приводу з однопозиційною магнітною защелкою для вакуумного вимикача середньої напруги.*

*Проведены исследования динамических характеристик электромагнитного привода с однопозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего напряжения.*

### ВВЕДЕНИЕ

При проектировании аппаратов с электромагнитными приводами (ЭМП) об их работоспособности судят по статической тяговой характеристике электромагнита – стремятся к тому, чтобы данная характеристика на протяжении всего хода якоря располагалась выше характеристики противодействующих усилий. Однако статическая тяговая характеристика определяется при установившемся значении тока в обмотке электромагнита. В процессе перемещения подвижной системы ток будет отличаться от установившегося значения. Вследствие этого динамическое тяговое усилие отличается от статического при одном и том же положении якоря. Поэтому создание аппаратов, обладающих высокой механической и электрической износостойкостью и достаточным быстродействием, непосредственно связано с исследованием динамических процессов в них.

Расчет динамики электромагнита дает возможность установить рациональные соотношения параметров конструкции с точки зрения ее надежности и износостойкости.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На современном этапе развития электроаппаратостроения в условиях повышения мощностей электроустановок приобретает особую актуальность уменьшение потребляемой мощности аппаратов и экономия дефицитных электротехнических материалов. Применительно к ЭМП с магнитными защелками для вакуумных выключателей средних напряжений эту задачу можно сформулировать следующим образом. Требуется разработка быстродействующего ЭМП, питающегося от оперативного источника питания; причем ток, потребляемый от источника питания, необходимо снижать, а время срабатывания – уменьшать. Однако, при уменьшении тока в обмотке ЭМП, для создания МДС срабатывания необходимо увеличить число витков обмотки. Но это в свою очередь влечет за собой увеличение индуктивности обмотки и соответствующее увеличение времени срабатывания. Практика показывает, что наиболее высокое быстродействие ЭМП достигается при сравнительно малых числах витков и больших токах в обмотке. ЭМП с магнитными защелками потребляют энергию от питающей сети только при срабатывании. Поэто-

му, учитывая предъявляемые требования и опыт эксплуатации ЭМП с магнитными защелками, питание обмоток целесообразно осуществить от накопителя энергии, среди которых самым простым, доступным и дешевым является емкостной накопитель энергии (ЕНЭ). Импульсное питание обмоток позволяет уменьшить диаметр обмоточного провода, сэкономить тем самым дефицитную медь и уменьшить габариты ЭМП, обеспечив при этом необходимое значение МДС срабатывания.

В работах [1-3] была рассмотрена конструкция ЭМП с однопозиционной магнитной защелкой, определены рациональные размеры магнитопровода с точки зрения развиваемой силы удержания якоря при обесточенных обмотках, установлено оптимальное значение полного времени размыкания контактов вакуумного выключателя с точки зрения минимального значения интеграла Джоуля. Таким образом, следующим этапом исследований и, соответственно, целью данной работы является: определение времен включения и отключения ЭМП; нахождение закономерности влияния различных параметров на быстродействие ЭМП; определение чувствительности времен срабатывания к этим параметрам.

### ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В общем случае динамика электромагнитов характеризуется следующими двумя уравнениями:

$$U = i \cdot R + \frac{d\psi}{dt}, \quad (1)$$

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = F(i, \delta) - Q_c(\delta, v)$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к намагничивающей обмотке;  $i$ ,  $R$ ,  $\psi$  – ток, сопротивление и потокосцепление катушки электромагнита;  $m$  – приведенная масса подвижной системы электромагнита;  $v$  – скорость подвижной системы по оси приведения массы;  $F$  – тяговое усилие электромагнита;  $\delta$  – рабочий зазор;  $Q_c$  – противодействующая сила.

Эти уравнения являются нелинейными и аналитическое решение их обычными методами не представляется возможным [4]. Различные авторы предлагают разнообразные методы расчета динамических характеристик, отличающиеся друг от друга как подходом к решению задачи, так и принятыми допуще-

ниями. В зависимости от соответствия допущений, принятых в том или ином методе расчета, реальным условиям работы электромагнита, расчетные данные могут в значительной степени отличаться от опытных. В конечном счете, адекватность принятых допущений необходимо проверить экспериментально.

Метод расчета динамических характеристик новых разрабатываемых конструкций электромагнитов должен обеспечивать возможность проведения большого объема расчетов в приемлемые сроки с целью оптимизации конструкции электромагнита и производиться путем интегрирования численными методами системы дифференциальных уравнений динамики (1).

На основании проведенного обзора методов расчета динамики электромагнитов постоянного тока в качестве базового был выбран метод, рассмотренный в [5-8]. Он основан на замене контура вихревых токов одновитковой вторичной обмоткой, сцепленной с тем же магнитным потоком, что и намагничивающая обмотка. Данный метод также исходит из предположения о полной магнитной связи первичной и вторичной обмоток, что не требует повышения порядка системы дифференциальных уравнений динамики. Основой метода является двумерная аппроксимация данных, полученных из расчета статических тяговых характеристик электромагнита  $F(F_m, \delta)$  и характеристик намагничивания  $\Phi_\psi(F_m, \delta)$  методом конечных элементов [9], например, в программной среде FEMM [10].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предмет исследования – ЭМП с однопозиционной магнитной защелкой, основные размеры которого приведены в [2]. В процессе исследований установлено, что основными параметрами, оказывающими наибольшее влияние на быстродействие ЭМП, являются:

- параметры ЕНЭ (напряжение и емкость);
- обмоточные данные катушки (количество витков, диаметр провода, активное сопротивление);
- масса подвижной системы.

#### Результаты расчета процесса включения ЭМП.

**Исследование влияния параметров ЕНЭ** на время включения проводилось при следующих параметрах ЭМП:

- диаметр обмоточного провода, количество витков и активное сопротивление включающей обмотки:  $d_m = 0,5$  мм;  $w = 460$ ,  $R = 8$  Ом соответственно.
- масса подвижной системы  $m = 12$  Н.

В качестве варьируемых величин принимались напряжение и емкость ЕНЭ. В результате численных экспериментов построены зависимости времени включения и максимальной скорости якоря при включении ЭМП от параметров ЕНЭ, представленные на рис. 1. Необходимость в определении скорости перемещения якоря обусловлена ограничением средней скорости перемещения механически связанной с ним подвижных контактов вакуумной дугогасительной камеры (ВДК), связанное с относительно невысокой механической износостойкостью сильфона ВДК. На сегодняшний день мировыми лидерами в области вакуумных технологий (ABB, Siemens) предлагаются ВДК со средней скоростью перемещения подвижных контактов в пределах 1,8-2,0 м/с [11, 12]. Зависимости

на рис. 1 показывают, что увеличение емкости ЕНЭ и напряжения питания уменьшают время включения ЭМП и увеличивают скорость перемещения подвижных частей. Такая зависимость более выражена в отношении напряжения питания. Однако произвольно выбрать напряжение и емкость ЕНЭ невозможно.

Во-первых, оперативное напряжение, подаваемое на блок системы управления вакуумным выключателем, фиксировано (в ячейках комплектных распределительных устройств используется либо питание от переменного тока 220 В с двухполупериодным выпрямлением, либо от постоянного тока 110 В или 220 В [13]). Необходимость же увеличения подаваемого на катушку ЭМП напряжения с помощью специальных схем (например, при питании цепей управления переменным током – с помощью повышающего трансформатора; постоянным током – с помощью специальных преобразователей со стабилизацией напряжения на ЕНЭ) может быть связана с необходимостью обеспечить цикл быстродействующего автоматического повторного включения (БАПВ) в соответствии с ГОСТ 687-78 [14]. Во-вторых, величина емкости ЕНЭ должна обеспечивать надежную работу ЭМП и выполнение им возлагаемых на него функций.

Из вышесказанного следует, что при проектировании электромагнита необходимо подобрать такую минимальную емкость ЕНЭ, которая обеспечит заданное быстродействие ЭМП при заданном значении питающего напряжения.

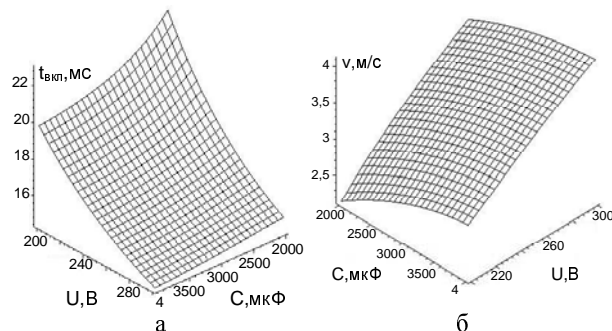


Рис. 1. Зависимость времени включения (а) и максимальной скорости якоря (б) при включении от параметров ЕНЭ

**Исследование влияния обмоточных данных включающей обмотки** на время включения ЭМП проводилось при следующем значении напряжения и емкости ЕНЭ:  $U_{c0} = 270$  В и  $C = 2000$  мкФ.

В качестве варьируемых величин принимались следующие параметры включающей обмотки: диаметр обмоточного провода  $d_m$ ; количество витков  $w$ ; активное сопротивление  $R$ . По результатам численных исследований построены зависимости времени включения ЭМП от обмоточных данных включающей обмотки, приведенные на рис. 2-5.

Кроме того, были проведены исследования по определению зависимости времени включения ЭМП и максимальной скорости якоря от массы подвижной системы. Результаты исследований показали монотонное возрастание времени включения и монотонное убывание максимальной скорости якоря при увеличении массы подвижной системы.

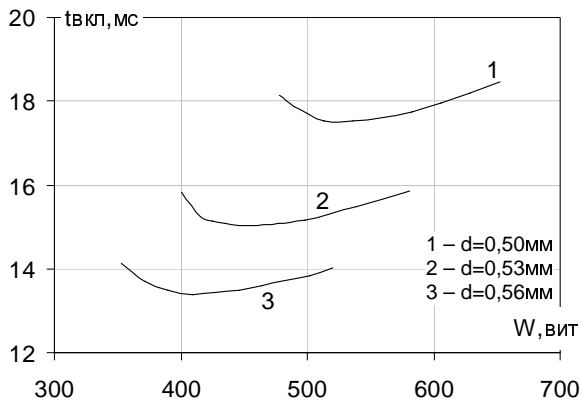


Рис. 2. Зависимость времени включения от количества витков для различных диаметров обмоточного провода

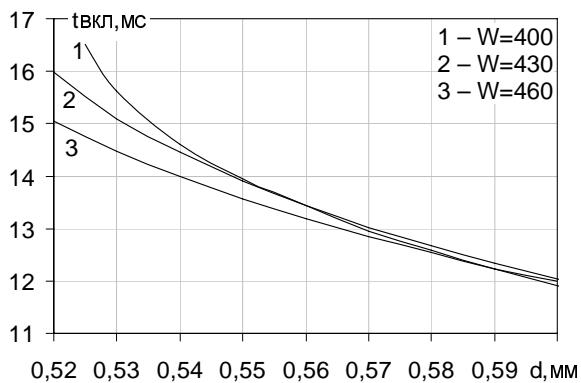


Рис. 3. Зависимость времени включения от диаметра обмоточного провода для различного количества витков

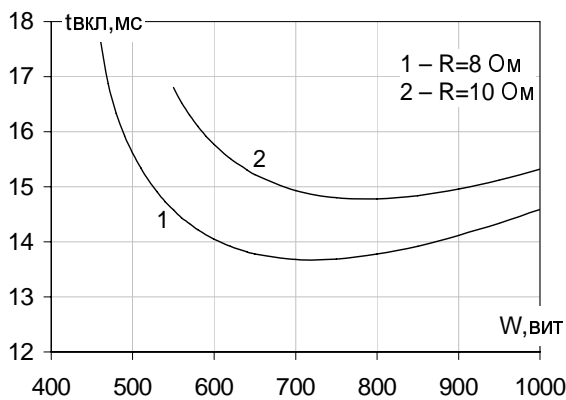


Рис. 4. Зависимость времени включения от количества витков для различного активного сопротивления обмотки

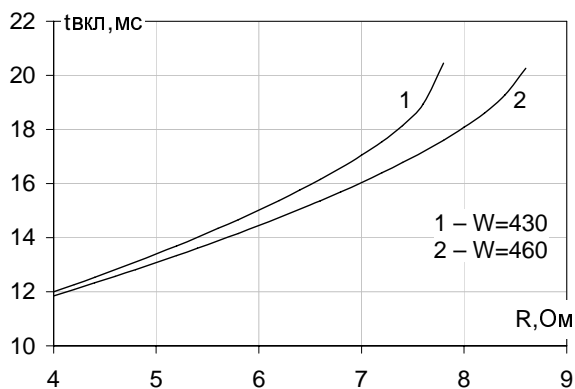


Рис. 5. Зависимость времени включения от активного сопротивления обмотки для различного количества витков

### Результаты расчета процесса отключения ЭМП.

Целью расчета процесса отключения ЭМП является поиск таких параметров ЕНЭ, обмоточных данных катушки и массы подвижной системы, при которых будет обеспечено найденное в [3] оптимальное с точки зрения минимума интеграла Джоуля время отключения вакуумного выключателя (22 мс). При этом необходимо учитывать, что данное время включает в себя, наряду с собственным временем размыкания выключателя, время реагирования релейной защиты и автоматики выключателя, которое лежит в пределах 10-12 мс. Таким образом, для обеспечения минимального значения интеграла Джоуля время отключения ЭМП не должно превышать 10 мс. Следовательно, задачами проведения численного исследования являются, во-первых, поиск таких значений перечисленных выше факторов, при которых обеспечивается требуемое время отключения, во-вторых, определение чувствительности времени отключения к изменению значений данных факторов.

**Исследование влияния параметров ЕНЭ** на время отключения проводилось при следующих параметрах ЭМП:

- диаметр обмоточного провода, количество витков и активное сопротивление отключающей обмотки:  $d_m = 0,25$  мм;  $w = 460$ ,  $R = 38$  Ом соответственно.
- масса подвижной системы  $m = 12$  Н.

Зависимость времени отключения при изменении параметров ЕНЭ показана на рис. 6. В результате численных экспериментов установлено, что изменение параметров ЕНЭ при отключении ЭМП и фиксированной массе подвижной системы мало влияет на максимальную скорость якоря, которая составляет приблизительно 5,3 м/с. Данный факт связан с принципом отключения ЭМП за счет воздействия отключающей и контактной пружин [1].

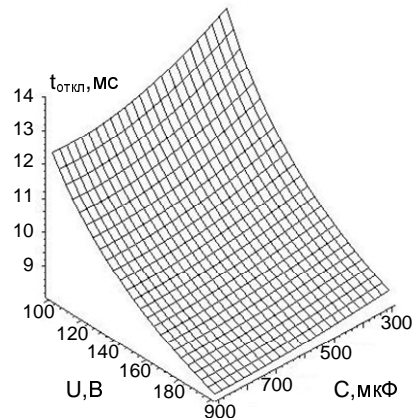


Рис. 6. Зависимость времени отключения от параметров ЕНЭ

**Исследование влияния обмоточных данных отключающей обмотки** на время отключения ЭМП проводилось при следующем напряжении и емкости ЕНЭ:  $U_{c0} = 270$  В и  $C = 300$  мкФ соответственно.

По результатам численных исследований построены зависимости времени отключения ЭМП от обмоточных данных отключающей обмотки, приведенные на рис. 7-10.

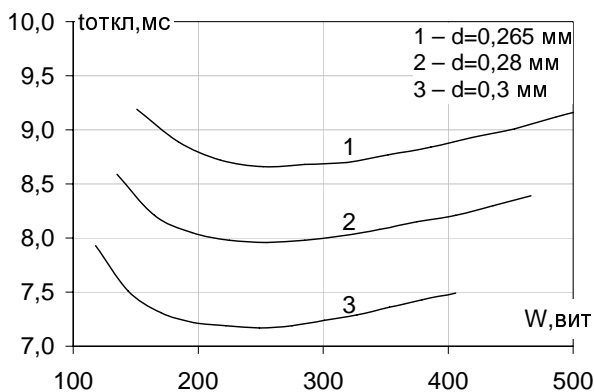


Рис. 7. Зависимость времени отключения от количества витков для различных диаметров обмоточного провода

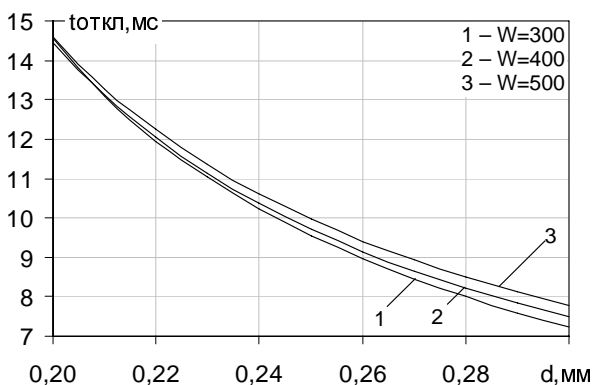


Рис. 8. Зависимость времени отключения от диаметра обмоточного провода для различного количества витков

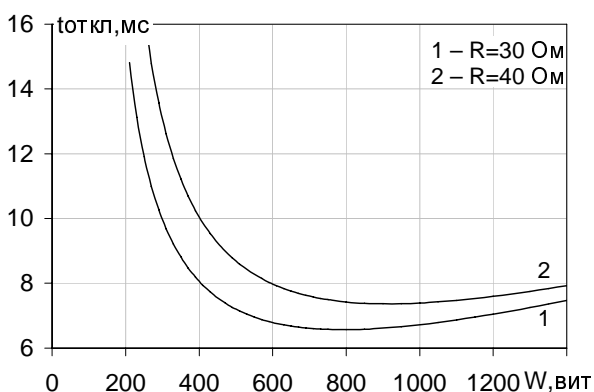


Рис. 9. Зависимость времени отключения от количества витков для различного активного сопротивления обмотки

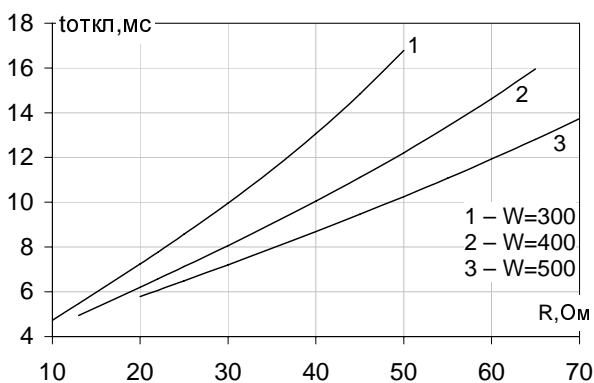


Рис. 10. Зависимость времени отключения от активного сопротивления обмотки для различного количества витков

Также были проведены исследования по определению зависимости времени отключения ЭМП и максимальной скорости якоря от массы подвижной системы. Как и для процесса включения, установлено монотонное возрастание времени отключения и монотонное убывание максимальной скорости якоря при увеличении массы подвижной системы. Однако, в отличие от процесса включения, отсутствует влияние параметров ЕНЭ на скорость перемещения подвижных частей ЭМП при отключении от их массы, что, опять же, связано с принципом отключения ЭМП.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

1. Увеличение емкости и напряжения питания ЕНЭ уменьшают время включения ЭМП и увеличивают скорость перемещения подвижных частей. Данная зависимость более выражена в отношении напряжения питания.

2. На время отключения ЭМП в большей степени влияет напряжение источника питания по сравнению с величиной емкости ЕНЭ. Однако изменение параметров ЕНЭ практически не влияет на скорость перемещения подвижных частей при отключении, что связано с принципом отключения ЭМП за счет воздействия отключающей и контактной пружин.

3. Установлена немонотонная зависимость между временами срабатывания ЭМП и обмоточными данными соответствующих обмоток, позволяющая сделать вывод о существовании оптимальных обмоточных данных с точки зрения минимального времени срабатывания ЭМП.

В работах [15-16] было теоретически предположено и экспериментально подтверждено наличие некоторой оптимальной индуктивности, которая обеспечивает минимальное время срабатывания быстродействующего электромагнита постоянного тока. При проведении численных и экспериментальных исследований на данном электромагните величина начального рабочего зазора принималась равной 2 мм. При столь малых изменениях рабочего зазора для случая быстродействующего электромагнита автор говорит о том, что тяговая сила, развиваемая электромагнитом  $F$  при прочих равных условиях пропорциональна индуктивности  $L$  [15, 17]:

$$F = -\frac{1}{2} \cdot (i \cdot w)^2 \cdot \frac{d\Lambda}{d\delta} = -\frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\delta}, \quad (2)$$

где  $\Lambda = L / w^2$  – магнитная проводимость рабочего зазора.

В [15-16] сделан вывод о том, что с увеличением индуктивности при неизменной противодействующей силе увеличивается результирующая тяговая сила электромагнита, то есть уменьшается его время срабатывания. С другой стороны, увеличение индуктивности приводит к уменьшению величины тока в каждый данный момент времени, что ведет к уменьшению тяговой силы, то есть к увеличению времени срабатывания. Необходимо также отметить, что исследования в указанных работах проводились без учета влияния вихревых токов в магнитопроводе (магнитная система выполнялась шихтованной).

Отличие результатов, полученных в данной ра-

боте, от результатов, приведенных в [15-16], заключается в том, что в ЭМП с однопозиционной магнитной защелкой магнитопровод изготовлен цельным, начальный рабочий зазор существенно больше (12 мм), при расчетах было учтено влияние вихревых токов.

4. Из полученных зависимостей следует, что для каждого значения диаметра обмоточного провода  $d_m$  существует экстремальное значение числа витков  $w$ . Влияние этих величин на время срабатывания ЭМП различное. Изменение числа витков меняет индуктивность и постоянную времени разряда  $R$ ,  $L$ ,  $C$  контура. С ростом  $w$  растут и  $R$ , и  $L$ , и  $\tau$  – постоянная времени; с уменьшением  $w$  – последние уменьшаются. С изменением диаметра провода практически не меняется индуктивность, но меняется активное сопротивление  $R$  и постоянная времени  $\tau$ .

5. В процессе расчета могут быть найдены такие значения диаметра провода и числа витков обмоток, которые при заданных массе подвижной системы, противодействующей силе, рабочем ходе и минимальных параметрах ЕНЭ обеспечат требуемое время срабатывания ЭМП.

### ВЫВОДЫ

1. В работе проведены исследования динамических характеристик ЭМП с однопозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего напряжения, в ходе которых установлено, что основными параметрами, оказывающими наибольшее влияние на быстродействие ЭМП, являются емкость и напряжение ЕНЭ, обмоточные данные катушки (количество витков, диаметр провода, активное сопротивление) и масса подвижной системы.

2. Как на время включения, так и на время отключения ЭМП в большей степени оказывает влияние напряжение источника питания по сравнению с величиной емкости ЕНЭ.

3. Включающая и отключающая обмотки ЭМП работают в импульсном режиме только в момент срабатывания, что позволяет применить систему форсированного управления с использованием ЕНЭ. Для обеспечения цикла БАПВ возможно применение специальных схем повышения напряжения.

4. ЭМП требует незначительной энергии для "сброса" магнитной защелки. Это позволяет использовать для отключения вакуумного выключателя ЕНЭ с низкими номинальными параметрами. В ходе предварительных экспериментальных исследований установлено, что минимально необходимыми значениями для гарантированного срабатывания опытного образца ЭМП являются следующие параметры ЕНЭ:

- для операции включения: 270 В и 2000 мкФ;
- для операции отключения 40 В и 300 мкФ.

5. Установлена немонотонная зависимость времен включения и отключения ЭМП от обмоточных данных соответствующих обмоток.

6. В зависимости от требуемого времени срабатывания ЭМП вакуумного выключателя могут быть рассчитаны емкость и напряжение ЕНЭ, а также обмоточные данные катушки.

7. В ходе предварительных экспериментальных

исследований установлены параметры ЕНЭ и обмоточные данные катушки, при которых время включения и отключения ЭМП составило 13,2 мс и 8,9 мс соответственно.

8. Для проверки достоверности используемого метода численного расчета динамических характеристик ЭМП и оценки погрешности полученных результатов необходимо проведение экспериментальных исследований.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клименко Б.В., Гречко А.М., Выровец С.В., Бугайчук В.М. Быстродействующий электромагнитный привод с вытеснением магнитного поля для вакуумного выключателя среднего напряжения // *Электротехника и электромеханика*. 2006. № 4. С. 22-26.
- [2] Гречко А.М., Бугайчук В.М. Исследование и расчет размеров магнитопровода электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой // *Электротехника и электромеханика*. 2008. № 2. С. 15-20.
- [3] Клименко Б.В., Байда Е.И., Гречко А.М., Боев С.В. О термическом действии токов коротких замыканий в электрических цепях средних напряжений, защищаемых вакуумными выключателями // *Электротехника и электромеханика*. – 2007. - № 1. С. 30-33.
- [4] Тер-Акопов А.К. Анализ методов расчета динамических характеристик электромагнитных механизмов // *Труды МАИ*, вып. 85. Оборонгиз, 1957. С. 48-71.
- [5] Клименко Б.В. Алгоритм машинного расчета динамики электромагнитов постоянного тока. – В кн.: *Низковольтное аппаратостроение*. Чебоксары: ВНИИР, 1978, вып. 5.
- [6] Клименко Б.В. Интегрирование уравнений динамики электромагнитов при наличии вторичных контуров // *Электричество*. 1984. №11. С. 52-55.
- [7] Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 160 с.
- [8] Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы электрических аппаратов. Дисс. докт. техн. наук. - Харьков, 1994. – 197 с.
- [9] Сильвестр П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
- [10] Meeker D. Finite Element Method Magnetics. User's Manual. Version 3.3. <http://femm.berlios.de>.
- [11] ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH. Каталог АBB. VD4 – вакуумный выключатель среднего напряжения для первичного распределения.
- [12] Siemens Vacuum-Interrupter VS 12031 Specification.
- [13] Будовский А.И., Иванов В.П. Разработки и исследования вакуумных выключателей на напряжение 6-35 кВ // *Электротехника*. 1998. №1. С. 36-38.
- [14] ГОСТ 687-78. Выключатели переменного тока на напряжении свыше 1000 В. Общие технические условия.
- [15] Тер-Акопов А.К. Оптимальная индуктивность и минимальное время срабатывания электромагнитов постоянного тока // *Труды МАИ*, вып. 85. Оборонгиз, 1957. С. 41-47.
- [16] Тер-Акопов А.К. Экспериментальное исследование времени срабатывания электромагнитов постоянного тока // *Вестник электропромышленности*. 1959. № 4. С. 38-42.
- [17] Основы теории электрических аппаратов / И.С. Таев, Б.К. Буль, А.Г. Годжелло и др.; Под ред. И.С. Таева. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.

Поступила 04.06.2008