

УДК 621.3.067.62-5: 537.312.62: 53.072:621.3

А. И. Ерохин, А. С. Медведко

Институт ядерной физики СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: a.i.erokhin@inp.nsk.su

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ЦЕПИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ РАЗМЫКАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СИСТЕМЕ ВЫВОДА ЭНЕРГИИ ИЗ 13 кА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ

Данная работа представляет компьютерное моделирование такого нелинейного устройства, как электромагнитный привод размыкателя постоянного тока. Механические и электромагнитные составляющие размыкателя представлены в модели как эквивалентные электрические цепи. Приведены результаты расчетов основных процессов в магнитной цепи привода.

Ключевые слова: ускоритель заряженных частиц, сверхпроводящий магнит, система вывода энергии, размыкатель тока, электромагнитный привод, магнитное поле, магнитный поток, моделирование.

Введение

В Европейском центре ядерных исследований (CERN) ведется запуск Большого адронного коллайдера (LHC). Его магнитная система имеет протяженность около 28 км и в основном выполнена на сверхпроводящих электромагнитах. Максимальный рабочий ток электромагнита достигает величины 13 кА. Общая запасенная энергия в магнитной системе при этом токе составляет несколько гига-джоулей. Для удобства работы, для повышения надежности, а также для разделения энергозапасяющих элементов на группы все кольцо разбивается на 8 секторов, в каждом секторе имеется несколько независимых цепей питания [1].

Все системы питания организованы так, что при срыве сверхпроводимости в электромагните одной из цепей, в ней создаются условия для вывода запасенной энергии в балластную нагрузку. Все остальные системы питания продолжают работать в режиме стабилизации тока. Схема вывода энергии, помимо резистора балластной нагрузки, включает в себя, среди прочих компонентов, коммутатор (механический размыкатель цепи), установленный параллельно этому резистору. В рабочем состоянии размыкатель замкнут, шунтируя этот резистор и не внося возмущений в цепь питания сверхпроводящих магнитов. При срыве сверхпро-

водимости хотя бы в одном электромагните цепи размыкатель должен как можно быстрее разомкнуться и включить резистор балластной нагрузки в цепь последовательно с источником питания и электромагнитами. В разработанной с участием авторов настоящей статьи системе вывода энергии в качестве размыкателя применена комбинация из восьми электромеханических размыкателей, соединенных в виде последовательно-параллельной группы. В системе использованы размыкатели тока типа ВАБ-49 производства УЭТМ («УралЭлектроТяжМаш», Екатеринбург) [2].

Силовые контакты каждого размыкателя рассчитаны на работу с постоянным током величиной до 4,5 кА. Понятно, что чем быстрее сработают размыкатели, тем меньше будет время перегрузки «наиболее медленного» из них и тем надежнее и долговечнее будут эти устройства.

В модификации размыкателя для CERN предусмотрено два независимых канала управления – типовой, сравнительно медленный, и импульсный, более быстрый. Оба канала воздействуют на электромагнитный привод, притягивая или отпуская подвижные части ярма электромагнита привода, который, в свою очередь, через систему пружин и рычагов размыкает силовые контакты размыкателя. Работа типового канала основана на снятии тока с управляющей ка-

тушки, т. е. на отпускании ярма. Импульсный канал управления, наоборот, использует сильноточную, малоиндуктивную катушку электромагнитного привода, создавая в ней импульс тока и притягивая дополнительное ярмо. В процессе переключения размыкателя параметры магнитной системы (например, величины воздушных зазоров) изменяются в широких пределах. К тому же отдельные участки магнитопровода насыщаются или, наоборот, выходят из насыщения.

Проведенные в УЭТМ расчеты и физическое макетирование узлов электромагнитного привода показывают, что оптимизировать элементы этого нелинейного устройства с переменными параметрами довольно сложно. Вполне естественно напрашивается решение прибегнуть к компьютерному моделированию этого привода. При моделировании обязательным требованием является наглядность представления узлов и элементов привода, наличие возможности проверки правильности составленной или выбранной модели, удобное отображение протекающих в модели процессов. Такое моделирование и было задачей настоящей работы. Целью работы явилась разработка рекомендаций по оптимизации параметров электромагнитного привода размыкателя типа ВАБ-49, включая оптимизацию параметров схем

управления приводом. Особое внимание уделялось быстрдействию срабатывания размыкателя, минимизации разброса времени срабатывания и повышению устойчивости процессов в размыкателе.

Принцип работы размыкателя

Упрощенная схема размыкателя представлена на рис. 1. Размыкатель состоит из главных контактов, дополнительных силовых контактов и электромагнитного привода. Контактная группа связана с электромагнитным приводом посредством диэлектрических рычагов и системы пружин. Электромагнитный привод состоит из четырехстержневого магнитопровода с тремя воздушными зазорами переменной величины. Магнитопровод сделан из трансформаторной стали типа 2412, имеет участки с различным сечением.

В начальном состоянии, т. е. когда обе управляющие катушки электромагнита не запитаны током, подвижные части магнитопровода (ярмо) находятся в отпущенном состоянии, а пружины удерживают механизм расцепления размыкателя в таком состоянии, когда и главные и дополнительные контакты разомкнуты.

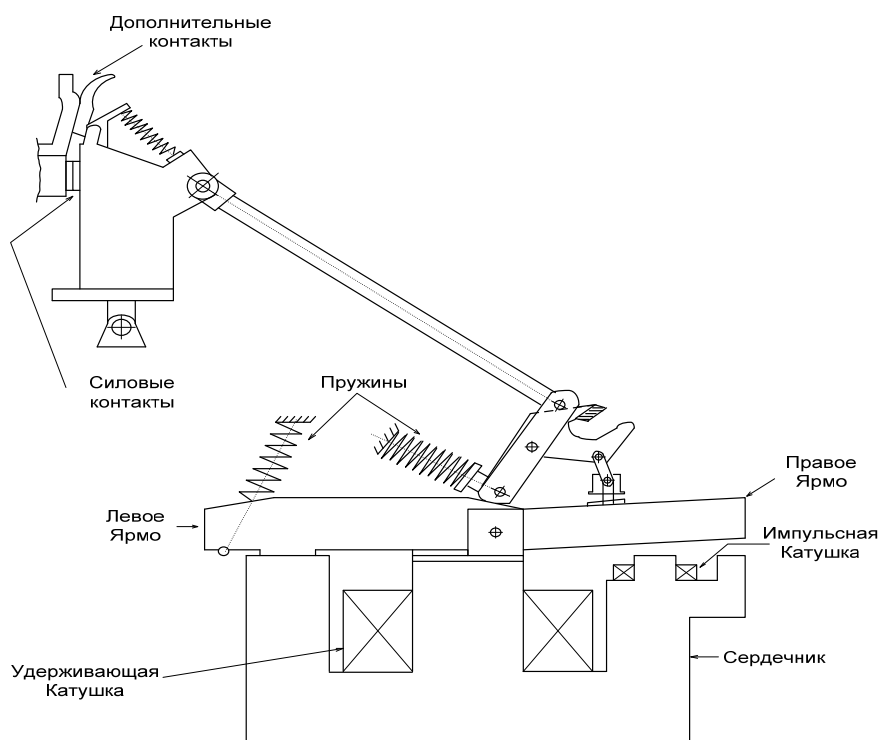


Рис. 1. Схема кинематической и магнитной систем электромагнитного привода

Для включения размыкателя, т. е. для замыкания контактов силовой цепи, в центральную (удерживающую) управляющую катушку подается ток величиной от 11 до 22 А. Создаваемое им магнитное поле, преодолевая сопротивление пружин, притягивает к основному магнитопроводу как левое, так и правое ярмо. Этот процесс приводит к установлению размыкателя в предвключенное состояние («StandBy»), при котором зазор между основными контактами устанавливается равным 5 мм. Одновременно при помощи блокировочных контактов происходит переключение тока в управляющей катушке. Ток начинает спадать до уровня 0,5 А с постоянной времени около 20 мс. Это значение тока достаточно для удержания в притянтом состоянии левого ярма, но совершенно недостаточно для удержания правого ярма.

Это означает, что в какой-то момент времени после начала спада тока правое ярмо будет отпущено, и пружинно-рычажный механизм поставит его в «дежурное» состояние. Находясь в таком состоянии (левое ярмо притянато к сердечнику, а правое отпущено), размыкатель готов пропускать ток через силовые контакты. Вспомогательные силовые контакты также находятся в замкнутом состоянии, но они шунтированы более низкоомными основными контактами и поэтому не несут токовой нагрузки.

Размыкание силовых контактов может производиться двумя способами, точнее, по двум каналам управления.

Первый способ – типовой. Цепь управления центральной (удерживающей) катушкой размыкается, ток в ней спадает, сила притяжения левого ярма к сердечнику ослабевает, и пружины размыкают магнитную цепь ярма, приводя в движение весь механизм и, как следствие, размыкая силовую цепь. Ввиду большого числа витков в основной катушке ее постоянная времени также оказывается большой, так что в этом случае размыкатель срабатывает сравнительно медленно.

Второй способ – импульсный. В этом случае в импульсную катушку подается импульс тока величиной в несколько сотен ампер и длительностью в несколько миллисекунд. При этом в правом ярме создается большой магнитный поток, сравнительно быстро притягивающий правое ярмо к сердечнику. Одновременно в левом сердечнике

потоки компенсируются, и левое ярмо под действием пружины отпускается от сердечника. Оба процесса ведут к быстрому срабатыванию размыкателя.

Основываясь на устройстве размыкателя и основных принципах его работы, можно сформулировать следующие проблемы:

- магнитная цепь содержит участки магнитопровода различного сечения, при этом на некоторых участках магнитопровод в моменты времени, когда воздушные зазоры минимальны, находится в состоянии насыщения;
- магнитная цепь содержит воздушные зазоры, величина которых изменяется во времени, что означает изменение во времени и суммарных сил, действующих на ярмо;
- необходимо согласование электрических управляющих цепей с эквивалентным электрическим представлением магнитной цепи.

Эквивалентная схема магнитной цепи электромагнитного привода

Для составления эквивалентной схемы магнитной цепи введем несколько упрощающих ограничений.

Во-первых, примем, что в магнитной системе отсутствуют потоки рассеяния, т. е. не существует магнитных полей вне магнитопровода и магнитных зазоров.

Во-вторых, пренебрежем гистерезисными явлениями и потерями в железе магнитопровода.

В-третьих, границы участков магнитопровода с различными сечениями выбраны сравнительно произвольно, исходя из здравого смысла.

Эти ограничения, как нам кажется, несколько изменят количественные соотношения в моделируемых процессах, но существенно не повлияют на моделирование качественной картины.

Для замкнутой цепи, содержащей воздушные зазоры и / или участки с разным значением μ , и / или участки с различным сечением магнитопровода, может быть написано уравнение, эквивалентное закону Кирхгофа [3]:

$$I \cdot w = E_m = \Phi \cdot \sum(R_{mi}),$$

где w – число витков в катушке, создающей магнитное поле;

I – ток в катушке;

$E_m = w \cdot I$ – магнитодвижущая сила (МДС) эквивалентна электродвижущей силе (ЭДС);

$R_m = l / (S \cdot \mu)$ – магнитное сопротивление эквивалентно омическому сопротивлению;

Φ – магнитный поток эквивалентен электрическому току;

$\Sigma(R_{mi})$ – полное сопротивление магнитной цепи (сумма сопротивлений участков цепи).

Далее, рассуждая аналогичным образом, для магнитной цепи можно применить также второй закон Кирхгофа: сумма потоков в узле равна нулю.

В соответствии с принципами подобия электрических и магнитных цепей магнитную цепь электромагнитного привода можно представить эквивалентной электрической схеме, приведенной на рис. 2. Схема состоит из трех контуров: первый включает в себя резисторы R_1, R_2, R_{x1} и источник wI_1 ; второй – резисторы R_2, R_{x2}, R_3 и источники wI_1 и wI_2 ; третий – резисторы R_{x2}, R_5, R_{x3} и источник wI_2 .

В качестве МДС здесь представлены два источника: wI_1 – управляющая катушка, и wI_2 – импульсная катушка. Витки заданы конструкцией катушек, токи определяются схемами управления. Магнитные сопротивления R_{x1}, R_{x2} и R_{x3} соответствуют участкам цепи, представляющим воздушные зазоры, изменяющиеся при движении подвижного

ярма. Остальные магнитные сопротивления соответствуют отдельным участкам магнитопровода, выполненного, как говорилось выше, из трансформаторной стали с различными сечением, длиной и степенью нелинейности характеристики. Представленные на рис. 2 L_1, L_2 – «виртуальные» управляемые индуктивности; r_1, r_2, r_3 – измерительные сопротивления; U_1 – источник напряжения для удерживающей катушки; S_1 – ключ, управляемый напряжением, в цепи удерживающей катушки; S_2 – блок-контакт; C – конденсатор, заряжаемый источником напряжения U_2 ; S_3 – ключ, управляемый напряжением, в цепи импульсной катушки; r_4 – собственное сопротивление удерживающей катушки; r_5 – шунт-резистор, r_6 – собственное сопротивление импульсной катушки.

Учет насыщения магнитопровода. Расчеты магнитной цепи электромагнитного привода показывают, что на различных этапах работы привода (в различные моменты времени) МДС достигают таких значений, что отдельные участки сердечника магнитопровода переходят в нелинейную область характеристики $B(H)$. Степень нелинейности различных участков различна.

В эквивалентной схеме для учета нелинейности и / или насыщения магнитопровода сопротивления R_i являются кусочно-линейными и состоят из нескольких последовательно соединенных резисторов, сопротивление каждого из которых при достижении током через резистор некоторого «критического» значения принимает новое значение

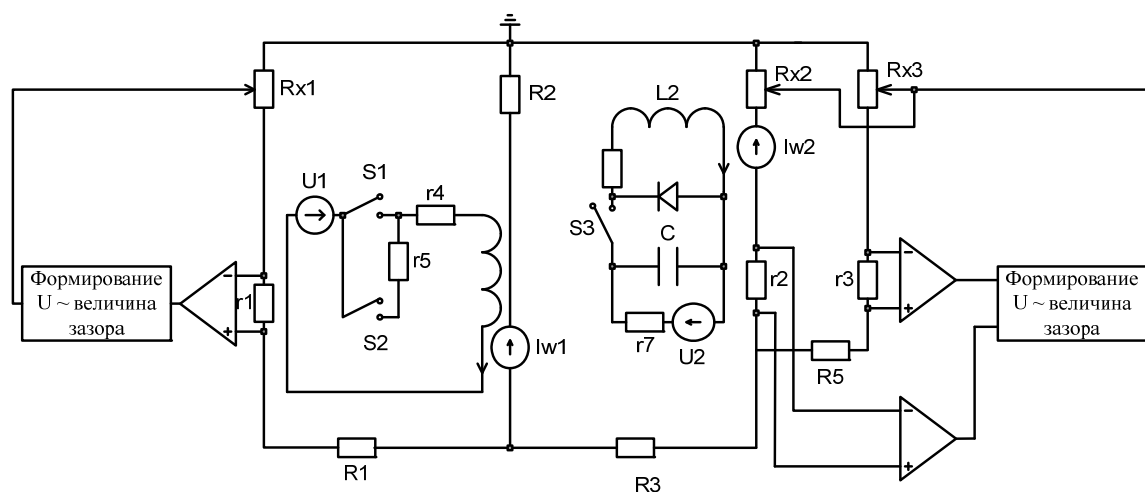


Рис. 2. Блок-схема электромагнитного привода

$R_{\text{new}} = R_{i0} + \delta R_i$. Таким образом, вольт-амперная характеристика каждого резистора представляет кусочно-линейную аппроксимацию кривой $B(H)$ материала магнитопровода с масштабом, учитывающим длину и площадь поперечного сечения аппроксимированного участка.

Переменное управляемое сопротивление. Как видно из рис. 1. и из описания магнитной системы электромагнитного привода, она имеет три воздушных зазора между подвижным ярмом и сердечником электромагнита. В процессе переключения величины зазоров изменяются от 0,1 до 10 мм под действием сил магнитного поля и сил натяжения пружин.

Для правильного эквивалентного представления такого зазора сопротивление последнего должно быть переменным и к тому же управляемым. В качестве такого сопротивления была разработана схема (рис. 3.), состоящая из перемножителя сигналов с нулевым выходным сопротивлением и коэффициентом умножения k , эталонного резистора R и масштабного усилителя с коэффициентом усиления a , сигнал с выхода которого подается на один из входов перемножителя сигналов. Не трудно показать, что выходное сопротивление цепи, представленное как $U_{\text{out}} / I_{\text{out}}$, равно

$$R_{\text{out}} = R \cdot (U_x \cdot k \cdot a + 1).$$

Движение ярма. Представление на эквивалентной схеме. Поскольку подвижное ярмо неподвижно закреплено в одной точке и вращается вокруг нее, то равнодействующая сил (магнитной силы F_m и силы упругости F_{el}), приведенная к центру ярма, равна (пренебрегая силой тяжести):

$$F_{\Sigma} = F_m - F_{\text{el}}.$$

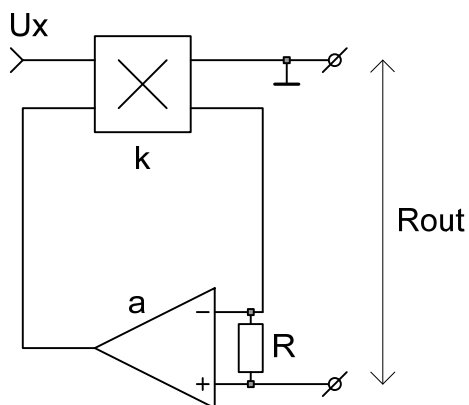


Рис. 3. Переменное управляемое сопротивление

При условии соблюдения краевых условий закон движения ярма может быть записан следующим образом:

$$x = 1/m \cdot \iint F_{\Sigma} dt,$$

где m – эквивалентная масса ярма.

Для вычисления магнитных сил, Действующих на каждое ярмо, в эквивалентной схеме вводятся измерительные сопротивления r_1, r_2, r_3 , падение напряжения на которых пропорционально магнитным потокам в соответствующих цепях. Дальнейшее возведение в квадрат при помощи логического перемножителя с соответствующим коэффициентом дает магнитную силу. Сила упругости формируется суммированием опорного напряжения, соответствующего начальному натяжению пружины, и напряжения, соответствующего величине смещения ярма, умноженной на жесткость пружины (переменная составляющая натяжения). В итоге получаем результирующую силу, двойное интегрирование которой дает нам смещение ярма. При интегрировании задаются необходимые постоянные времени, а также используются логические элементы, обеспечивающие соблюдение краевых условий движения ярма. Величина смещения ярма выводится на график, а также используется для формирования управляющего напряжения для переменного сопротивления R_x .

Индуктивность цепи, самоиндукция. Предложенный выше подход к составлению эквивалентной схемы магнитных цепей вполне описывает эти цепи автономно от электрических управляющих цепей, поскольку резистивная эквивалентная схема не отражает свойства индуктивности запасать энергию в своем магнитном поле. При сопряжении такой цепи с электрической необходимо ввести элементы, эквивалентным образом отражающие ее инерционную реакцию на попытки изменить энергию, запасенную в магнитном поле моделируемой цепи. Как известно, в электрической цепи такая реакция проявляется в виде ЭДС самоиндукции, смысл которой заключается в возникновении противоэдс при любом изменении магнитного потока через контур. Применительно к нашей схеме эквивалентная индуктивность магнитной цепи с магнитным сопротивлением R_m и с количеством витков в катушке w равна $L = w^2/R_m$.

Таким образом, очевидно, что нельзя обойтись введением в эквивалентную схему

просто элемента L . Эквивалентная индуктивность должна меняться при изменении магнитного сопротивления цепи. При этом в схеме должны быть учтены все переходные процессы, возникающие при изменении L , а следовательно, и запаса энергии системы.

С учетом вышесказанного для сопряжения эквивалентной схемы магнитной цепи с управляющей электрической схемой применено следующее схемное решение (рис. 4).

Учет влияния индуктивности достигается введением в схему локальной обратной связи по производной магнитного потока, которая приводит к возникновению противоэдс $U = -w \cdot d\Phi / dt$. Очевидно, что здесь можно ввести понятие «виртуальной» индуктивности, задаваемой последней формулой и равной, как и в реальной схеме, $L_v = w^2 / R$. При этом автоматически обеспечивается и требование непрерывности магнитного потока, согласно которому при увеличении индуктивности в N раз ток в катушке уменьшится также в N раз.

Эквивалентная схема всей модели, результаты моделирования

После того как все узлы модели были проверены, стало возможным построить полную эквивалентную схему модели, содержащую около 120 различных аналоговых и логических элементов. Полная модель была построена при помощи программы «NL» [4].

Были смоделированы процессы, протекающие как при выключении размыкателя благодаря срабатыванию импульсной катушки, так и при процедуре включения размыкателя в состояние «замкнуто».

Были проведены исследования на надежность включения / выключения размыкателя, выведена зависимость времени срабатывания левого и правого ярма от величины токов в удерживающей и импульсной катушках.

В процессе моделирования переходных процессов, возникающих в электромагнитной цепи размыкателя, моделировались и регистрировались:

- магнитные потоки во всех цепях;
- координаты движения ярма;
- скорость движения ярма;
- результирующие силы;
- токи в управляющих катушках;
- напряжение на катушках.

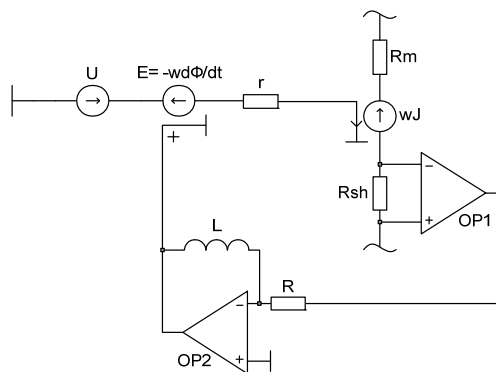


Рис. 4. Сопряжение электрической и магнитной эквивалентных схем

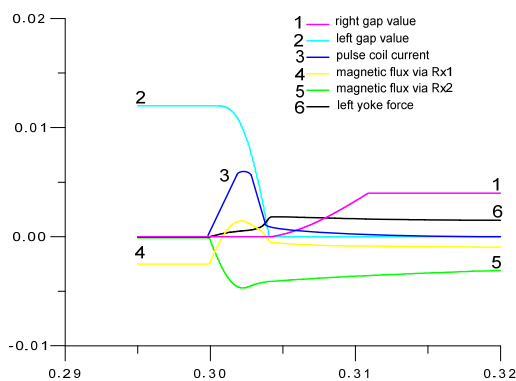


Рис. 5. Процесс выключения размыкателя

Типичная диаграмма выключения размыкателя представлена на рис. 5.

Рассмотрим детально операцию выключения размыкателя импульсной катушкой. Пусть в момент времени $t = 30$ мс ключ S_3 замкнулся и емкость начала разряжаться на импульсную катушку. Ток в катушке начинает нарастать. Результирующая сила, действующая на *правое ярмо*, меняет знак, и ярмо начинает притягиваться. После того как ток достиг максимума, он начинает резко падать вследствие резкого увеличения индуктивности контура при уменьшении величины зазора. В момент времени $t \approx 34$ мс ($\Delta t = 4$ мс) ярмо достигает сердечника, его скорость зануляется, сопротивление зазора становится близким к нулю, а индуктивность – постоянной. Ток в импульсной катушке начинает падать с большой постоянной времени. В момент максимума тока магнитные потоки в правом сердечнике максимальны.

В течение всего этого процесса магнитный поток в *левом сердечнике* минимален,

так как часть потока из правого сердечника проникает в левый, компенсируя при этом поток, удерживавший левое ярмо. Вследствие этого магнитная сила, действующая на левое ярмо, уменьшается, и в момент времени, когда сила упругости начинает преобладать над магнитной силой, ярмо начинает отрываться от сердечника.

Однако при дальнейшем спаде тока в импульсной катушке потоки в правом сердечнике уменьшаются, а в левом, следовательно, увеличиваются. Если ток в импульсной катушке достаточно большой, ярмо продолжает свое движение, но с меньшей скоростью. Но так как величина зазора увеличивается, магнитное сопротивление левого сердечника растет, а магнитный поток в левом сердечнике начинает ослабевать, приводя к тому, что результирующая сила, отрывающая ярмо, увеличивается, и скорость движения ярма соответственно тоже. Левое ярмо уверенно достигает своего крайнего положения (разомкнутого), оставаясь там до следующей процедуры включения. Таким образом, размыкатель перешел в состояние «разомкнуто» примерно за 4 мс (это определяется исключительно временем притягивания правого ярма). Оторванное от сердечника левое ярмо не дает размыкателю повторно включиться, когда магнитные потоки достаточно ослабнут, приведя к возврату правого ярма в разомкнутое состояние.

В случае, если ток импульсной катушки не достаточно велик, точнее, недостаточно велика его составляющая магнитного потока в левом сердечнике, результирующая сила, действующая на левое ярмо, может поменять знак, заставив левое ярмо вновь начать

притягиваться и вернуться в исходное (притянутое) состояние. Такая ситуация недопустима.

Для выбора наиболее оптимального режима работы размыкателя было проведено моделирование для удерживающих токов от 0,4 до 0,6 А с шагом 0,05 А и для разного напряжения на конденсаторе в цепи питания импульсной катушки. В качестве оптимального был выбран режим работы электромагнитного привода при $I_{\text{holding}} = 0,5$ А, $U_C = 170$ В. При этом время срабатывания размыкателя составляет 3,3 мс, а время полного отрыва левого ярма составляет 12 мс. В случае изменения напряжения питающей сети в пределах от +10 до -20 % рабочая точка остается в пределах гарантированного срабатывания размыкателя.

Выводы

Как показало моделирование, скорость срабатывания размыкателя определяется током в импульсной катушке и его длительностью (т. е. зарядом емкости и ее величиной), а также параметрами катушки. При этом левое ярмо должно обязательно оторваться от сердечника и перейти в крайнее положение. Последнее определяется величиной тока как в импульсной, так и в удерживающей катушке, создающего удерживающий магнитный поток в левом сердечнике.

Для выбора наиболее оптимального режима работы размыкателя было проведено моделирование для удерживающих токов от 0,4 до 0,6 А с шагом 0,05 А. Для каждого случая расчеты проводились для диапазона напряжений на конденсаторе от U_{min} , при котором не происходит полного отрыва левого ярма (U_{min} свое для каждого значения удерживающего тока), до 280 В. На рис. 6. представлено семейство кривых, характеризующих зависимость времени отрыва левого ярма от напряжения на конденсаторе для указанных значений удерживающего тока (под временем отрыва предполагается время, необходимое для того, чтобы ярмо прошло от одного фиксированного положения до другого). Нижняя кривая характеризует время притягивания правого ярма в зависимости от напряжения на конденсаторе. Последнее является одинаковым для всех значений удерживающего тока.

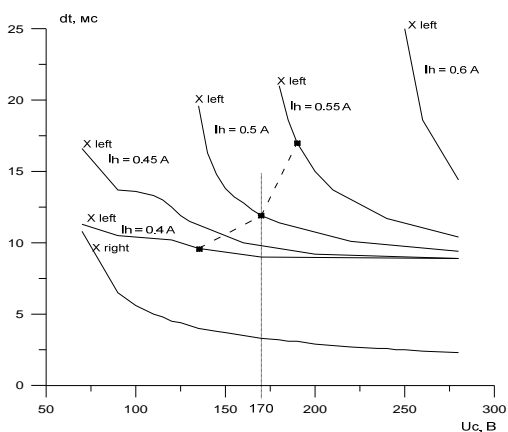


Рис. 6. Выбор оптимального режима управления размыкателем

На основании выданных рекомендаций для всех 254 размыкателей ВАБ-49, установленных в тунеле LHC в CERN, был выбран режим работы электромагнитного привода с $I_{\text{holding}} = 0,5$ А, $U_C = 170$ В. При таком режиме время срабатывания размыкателя составляет 3,3 мс, а время полного отрыва левого ярма составляет 12 мс. В случае изменения напряжения питающей сети в пределах от +10 до -20 % (при этом удерживающий ток и напряжение на конденсаторе уменьшаются или увеличиваются одновременно) рабочая точка движется по кривой, указанной пунктиром.

На сегодняшний день все размыкатели успешно прошли приемочные испытания. По результатам моделирования был выпущен препринт [5], а также представлен доклад на конференции ICAP2000 в Дармштадте (Германия) в 2000 г. [6].

Список литературы

1. The Large Hadron Collider. Conceptual Design; CERN / AC / 95 – 05 (LHC); 20 October, 1995.

2. Procurement of a 13 kA Current Distribution Bus-Way for a D. C. Power Transmission Line: Technical Specification. October, 1998.

3. Мешков И., Чириков Б. Электромагнитное поле. Новосибирск, 1973.

4. Смирнов А. Программа NL для компьютерного моделирования нелинейных электронных схем. Новосибирск, 1995.

5. Erokhin A., Medvedko A. Modeling and Computer Simulation of the Pulsed Powering of Mechanical D.C. Circuit Breakers for the CERN/LHC Superconducting Magnet Energy Extraction System. Preprint / CERN / LHC-Project-Report-442.

6. Erokhin A., Medvedko A. Modeling and Computer Simulation of the Pulsed Powering of Mechanical D.C. Circuit Breakers for the CERN/LHC Superconducting Magnet Energy Extraction System. ICAP2000, 11–14 September 2000. Darmstadt, 2000.

Материал поступил в редколлегию 10.11.2008

A. I. Erokhin, A. S. Medvedko

COMPUTER SIMULATION OF THE PULSED POWERING OF D.C. CIRCUIT BREAKER FOR THE 13 KA SUPERCONDUCTING MAGNET ENERGY EXTRACTION SYSTEM

The article presents the results of modeling and computer simulation of non-linear devices such as the electromagnetic driver of a D.C. circuit breaker. The mechanical and electromagnetic parts of the driver are represented as equivalent electrical circuits and all basic processes of the driver's magnetic circuit are calculated.

Keywords: particle accelerator, superconducting magnet, energy extraction system, current breaker, electromagnetic drive, magnetic field, magnetic flux, modeling.