

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Ордена Ленина Сибирское отделение
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

А.И. Ерохин, А.С. Медведко

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

ИЯФ 2008-2

Новосибирск
2008

**Компьютерное моделирование
импульсной цепи управления
электромагнитным приводом размыкателя
постоянного тока в системе вывода энергии
из 13кА сверхпроводящих магнитов**

А.И. Ерохин, А.С. Медведко

Институт Ядерной Физики им. Будкера СО РАН
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

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, а также приведены результаты расчетов основных процессов в магнитной цепи привода.

**Computer simulation of the pulsed powering
of D.C. circuit breaker for the 13kA superconducting
magnet energy extraction system**

A.I. Erokhin, A.S. Medvedko

Abstract

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.

1. Введение

В европейском центре ядерных исследований (CERN) ведется запуск Адронного Коллайдера LHC. Его магнитная система имеет протяженность около 28 км и, в основном, выполнена на сверхпроводящих магнитах. Максимальный рабочий ток магнита достигает величины в 13 кА. Общая запасенная энергия в магнитной системе при этом токе составляет несколько гига-джоулей. Для удобства работы, 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 сверхпроводимости хотя бы в одном магните цепи, размыкатель должен как можно быстрее разомкнуться и включить резистор балластной нагрузки в цепь последовательно с источником питания и магнитами.

В системах, работающих с током в 13 кА, для размыкания тока применяются размыкатели типа ВАБ-49 производства УЭТМ («УралЭлектроТяжМаш» Екатеринбург), [2]. Силовые контакты 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 размыкателе типа ВАБ-49 предусмотрено два независимых канала управления - типовой, сравнительно медленный, и импульсный, более быстрый канал. 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 катушки, т.е. на отпуске ярма. Импульсный канал управления использует сильноточную, малоиндуктивную катушку электромагнитного привода, создавая в ней импульс тока и притягивая дополнительное ярмо.

Проведенные в УЭТМ расчеты и физическое макетирование узлов электромагнитного привода показывают, что оптимизировать параметры этого нелинейного устройства 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 являлось задачей настоящей работы. Целью работы являлось получение рекомендаций по выбору параметров электромагнитного привода размыкателя типа ВАБ-49, включая параметры схем управления приводом.

2. 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. Магнитопровод 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.

Для включения размыкателя, т.е. для замыкания контактов силовой цепи, в центральную (удерживающую) управляющую катушку подается ток величиной от 11 А 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 мсек. Это значение тока достаточно для удержания в притянутом 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, а пружинно - рычажный механизм поставит его в «дежурное» состояние. Находясь в таком состоянии (левое ярмо притянуто 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.

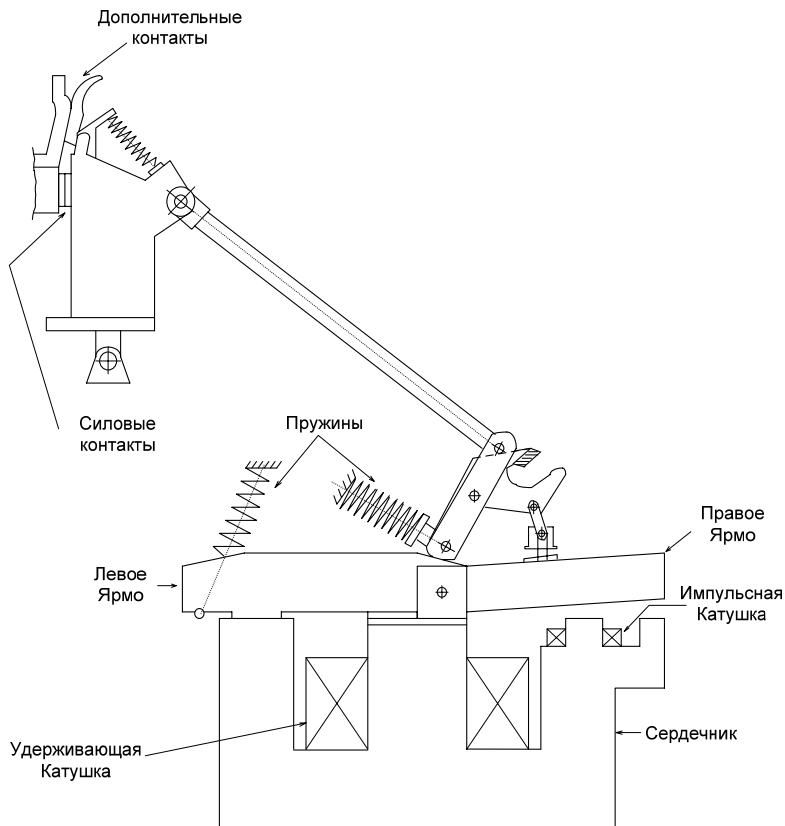


Рис. 1. Упрощенные кинематическая и магнитная системы электромагнитного привода.

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

Первый способ – типовой. В этом случае цепь управления центральной катушкой (удерживающей катушкой) размыкается, ток в ней падает, сила притяжения левого яра к сердечнику ослабевает и пружины размыкают магнитную цепь яра, приводя в движение весь механизм и, как следствие, размыкая силовую цепь. Ввиду большого числа витков в основной катушке, ее постоянная времени также оказывается заметно большей, 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 керне 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 этих процесса ведут к быстрому срабатыванию размыкателя.

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

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

3. 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 изменяют количественные соотношения в моделируемых процессах, но не существенно повлияют на моделирование качественной картины.

Как известно, для магнитных цепей, так же как и для электрических, можно написать законы Кирхгофа. В частности 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]:

$$I \cdot \mathcal{W} = E_m = \Phi \cdot \Sigma(R_{mi}),$$

где w – число витков в катушке, создающей магнитное поле, I – ток в катушке, $E_m = w \cdot I$ – магнитодвижущая сила (МДС), эквивалентна 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 схемой, приведенной на **Рис.2**. Схема состоит из трех контуров: первый контур включает в себя резисторы R_1, R_{x1}, R_6, R_7 и источник wI_1 ; второй контур включает в себя резисторы R_2, R_{x2}, R_5, R_6 и источники wI_1 и wI_2 ; третий контур включает в себя резисторы R_{x2}, R_3, R_{x3}, R_4 и источник wI_2 .

При этом сопротивления (мы будем говорить сопротивления, а не импеданс, – чтобы быть ближе к эквивалентной схеме)

$$R_{mi} = l_i / (\mu_r(B)_i \cdot \mu_o \cdot S_i),$$

где l_i – длина магнитного пути соответствующего участка контура (при условии постоянства сечения магнитопровода на этом участке), $\mu_r(B)_i$ – относительная магнитная проницаемость стали на i -ом участке магнитопровода, μ_o – магнитная проницаемость вакуума, S_i – площадь поперечного сечения i -го участка магнитопровода.

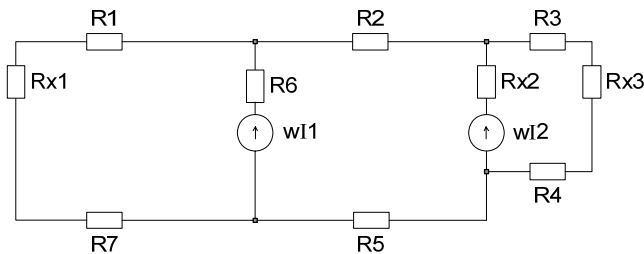


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема магнитной системы Электромагнитного привода.

В качестве магнитодвижущих сил (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 уже говорилось выше, из трансформаторной стали, с различным сечением, длиной и различной степенью нелинейности характеристики.

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 стального 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, дифференциальное сопротивление каждого из которых при достижении током через резистор некоторого «критического» значения принимает новое значение $R_{i_{new}} = R_{i_0} + \delta R_i$. Таким образом, вольтамперная характеристика каждого резистора представляет кусочно-линейную аппроксимацию кривой $B(H)$ материала магнитопровода с масштабом, учитывающим длину и площадь поперечного сечения аппроксимируемого участка. В принятой нами аппроксимации сопротивления участков рассчитаны при условии, что магнитный поток по всей длине участка имеет одно и то же значение, т.е. отсутствуют компоненты потока рассеяния (тангенциальные компоненты магнитного потока).

Переменное управляемое сопротивление.

Как видно из **Рис.2**, описания магнитной системы электромагнитного привода, она имеет три воздушных зазора между подвижным ярмом и сердечником электромагнита. В процессе переключения величины зазоров изменяются 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.

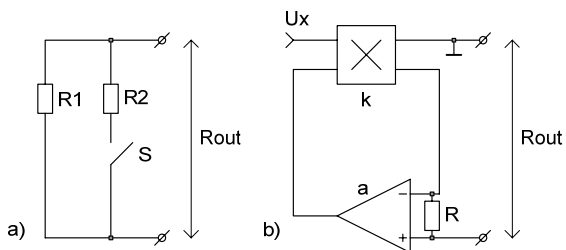


Рис. 3.

Были разработаны два различных варианта представления переменного управляемого сопротивления:

- 1) на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ);
- 2) на основе аналогового перемножителя.

Схема первого сопротивления представлена на **Рис.3а**). Можно заметить, что при времени усреднения намного большим периода ШИМ:

$$\langle R \rangle = \left[\frac{1}{R_1} + \frac{\tau}{T} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \right]^{-1}.$$

Для получения достаточной точности необходимо существенно уменьшать размер шага в вычислениях. Однако это приводит к значительному увеличению общего времени вычислений.

Схема второго сопротивления приведена на **Рис.3б**). Схема состоит из перемножителя сигналов с нулевым выходным сопротивлением и коэффициентом умножения 'к', эталонного резистора **R** и масштабного усилителя с коэффициентом усиления 'а', сигнал с выхода которого подается на один из входов перемножителя сигналов. Не трудно показать, что выходное сопротивление цепи, представленное как U_{out}/I_{out} , равно:

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

Был выбран второй вариант, который оказался более простым и быстрым, с точки зрения вычислений, однако он требует реорганизации точек заземления во всей модели, что в нашем случае оказалось возможным.

Магнитные силы, действующие на ярмо.

Сила F_m , действующая на ферромагнитный сердечник (в нашем случае ярмо электромагнита), помещенный в магнитное поле:

$$F_m = dW/dx = d\{B^2 \cdot S / (2 \cdot \mu_0)\} / dx = \Phi^2 / (2 \cdot \mu_0 \cdot S),$$

где W – энергия, запасенная в зазоре, dx – начальный зазор.

Таким образом, в нашей эквивалентной схеме, измерив магнитный поток с помощью маленького сопротивления R , поставленного последовательно с переменным сопротивлением зазора, можно вычислить и магнитную силу, действующую на ярмо. Учитывая малый угол вращения ярма и малое, по сравнению с поперечными размерами сердечника, смещение ярма, будем считать, что поверхность ярма, образующая зазор, смещается параллельно соответствующей поверхности сердечника, а поток магнитной индукции в зазоре будем считать однородным. Тогда результирующую силу можно считать приложенной в одну точку – точку, относительно которой считается величина зазора. Будем считать ее совпадающей с центром сердечника.

Силы упругости пружин, действующие на ярмо.

Учитывая кинематическую схему механики электромагнита (**Рис.1**), найдем силу упругости пружины, действующую на ярмо:

$$F_{el} = k \cdot x,$$

где k – коэффициент упругости пружины [Н/м], x – смещение ярма (изменение величины зазора).

Движение ярма. Представление на эквивалентной схеме.

Поскольку подвижное ярмо неподвижно закреплено в одной точке и вращается вокруг нее, то равнодействующая сил, приведенная к центру ярма, равна (пренебрегая силой тяжести):

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

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.

Соблюдение начальных и фиксация конечных условий движения.

При расчете движения ярма должны соблюдаться начальные условия, соответствующие крайним положениям ярма.

Для правого ярма:

- 1) начало координат для движения ярма ($x = 0$) установлено при положении силовых контактов размыкателя "замкнуто", т.е., при максимальной величине воздушного зазора правого ярма;
- 2) при достижении упора ($x = 0$) или сердечника ($x = max$), ярмо принудительно останавливается, то есть $dx/dt = 0$.

Для левого ярма:

- 1) начало координат для движения ярма ($x = 0$) установлено при положении силовых контактов размыкателя "замкнуто", т.е. при нулевом воздушном зазоре;
- 2) при достижении упора ($x=max$) или сердечника ($x = 0$), ярмо принудительно останавливается, то есть $dx/dt = 0$.

После рассмотрения движения ярма можно перейти к реализации на эквивалентной схеме, представленной на **Рис.4**. Здесь $r = 1$ является измерительным сопротивлением, падение напряжения на котором измеряется усилителем OP_1 , напряжение на выходе которого равно магнитному потоку в цепи. Далее, возводя это выходное напряжение в квадрат (перемножителем X) и умножая результат на соответствующий коэффициент, получаем магнитную силу. Сила упругости формируется

суммированием на ОП₉ напряжения источника U₁ (начальное натяжение пружины) и напряжения на выходе ОП₈, равного величине смещения яра, умноженной на жесткость пружины (переменная составляющая натяжения). На выходе ОП₂ получаем результирующую силу, которая интегрируется первым интегратором (на ОП₃) и вторым интегратором (на ОП₄). Постоянная времени интеграторов берется из следующих соображений:

$$x = \iint F_{\Sigma} dt/m = F_{\Sigma}/(RC)^2 p^2,$$

следовательно $(RC)^2 = m$.

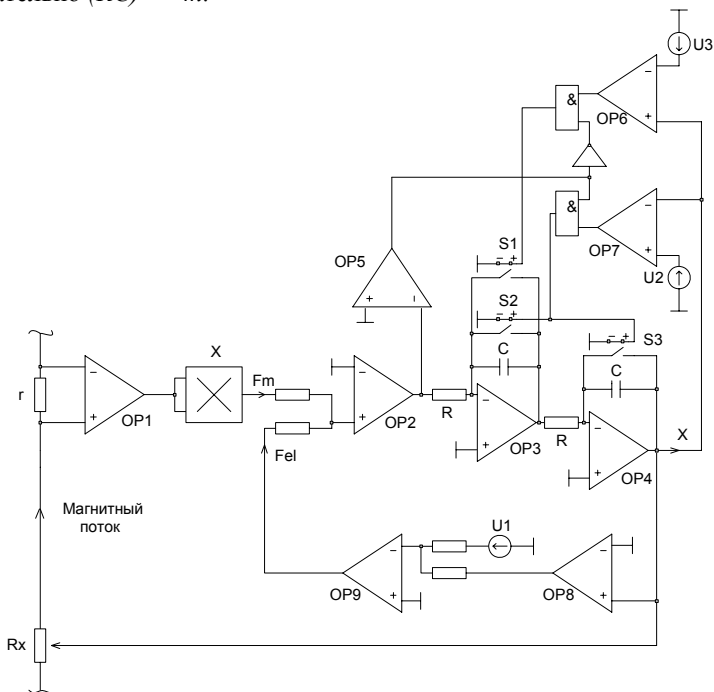


Рис. 4. Эквивалентная схема представления движения яра.

Начальные условия обеспечиваются введением логической схемы, работающей в соответствии со следующими правилами.

Для правого яра

1) $x = 0$

– емкость второго интегратора закорочена ключом S₃, управляемым напряжением. Это соответствует начальному условию - правое яро "оторвано", что может быть, как говорилось ранее, как при состоянии размыкателя "Замкнуто" так и при состоянии "Разомкнуто".

$$2) \quad dx/dt = 0$$

– $F_{\Sigma} > 0$, $x = \max$ или $F_{\Sigma} < 0$, $x = 0$ – емкость интегратора 1 закорочена ключами S_1 или S_2 , управляемыми напряжением. Это соответствует достижению ярмом крайних положений.

Для левого ярма

$$1) \quad x = \max$$

– емкость второго интегратора заряжена до максимального напряжения. Это соответствует начальному условию – левое ярмо "оторвано" и размыкатель находится в состоянии "Разомкнуто".

$$2) \quad dx/dt = 0$$

– $F_{\Sigma} > 0$, $x = 0$ или $F_{\Sigma} < 0$, $x = \max$ – емкость первого интегратора закорочена ключами S_1 или S_2 . Это соответствует достижению ярмом крайних положений.

Условия 2) проверяются сравнением координаты ярма с опорным напряжением источников U_2 или U_3 компараторами OP_6 и OP_7 . Знак силы проверяется компаратором OP_5 . Далее знаки суммируются элементом "&".

На выходе второго интегратора получаем смещение ярма, величина которого выводится на график, а также используется для формирования управляющего напряжения для переменного сопротивления R_x .

Индуктивность цепи, самоиндукция.

Описанный выше подход к составлению эквивалентной схемы магнитных цепей вполне описывает эти цепи автономно от электрических управляющих цепей, поскольку резистивная эквивалентная схема не отражает свойство 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. ЭДС самоиндукции направлена против изменения потока:

$$U = -d(w \cdot \Phi)/dt = -w \cdot d(L \cdot I)/dt.$$

Энергия, запасенная магнитным полем, равна:

$$W = L \cdot I^2/2 = \Phi^2/2L,$$

где I – ток в катушке, W – энергия магнитного поля, запасенная в системе, L – индуктивность, w – число витков в катушке.

Из приведенных выше соотношений, а также из закона Кирхгофа для магнитной цепи:

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

видно, что 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, приведенное на **Рис.5**.

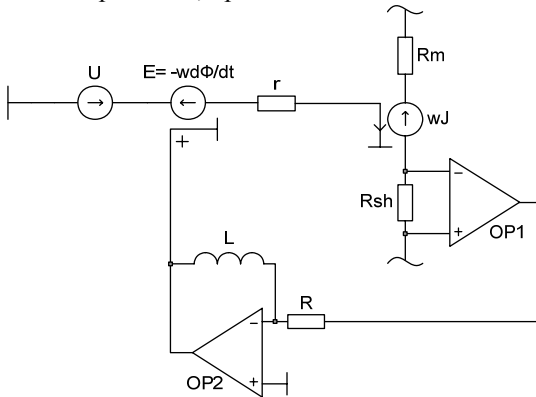


Рис. 5. Схемное решение сопряжения электрической и магнитной эквивалентных схем.

Схема включает в себя:

- 1) магнитную цепь, состоящую из магнитного сопротивления R_m , измерительного сопротивления $R_{sh} = 1$ и магнитодвижущей силы wI . Магнитодвижущая сила представлена источником напряжения, управляемым током, с передаточным коэффициентом, равным количеству витков в катушке и имеющим размерность сопротивления;
- 2) электрическую цепь управления, состоящую из источника напряжения U ;
- 3) цепь обратной связи по производной магнитного потока, формируемую дифференциальным усилителем OP_1 с измерительным сопротивлением R_{sh} , дифференцирующим звеном на базе операционного усилителя OP_2 и элементов L и R и источником напряжения, управляемым напряжением с коэффициентом передачи, равным количеству витков в катушке.

Таким образом, 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. Это можно проверить «измерением» тока в катушке при изменении индуктивности – при увеличении индуктивности в N раз ток в катушке уменьшится в N раз. Последнее было проверено на различных примерах.

4. Эквивалентная схема всей Модели

После того как все узлы модели были проверены, стало возможным построить полную эквивалентную схему модели, содержащую около 120 различных элементов, таких, как резисторы, конденсаторы, операционные усилители, ключи и логические элементы. Полная модель была построена при помощи программы “NL”[4].

Упрощенная блок-схема электромагнитного привода приведена на **Рис.6**. Здесь R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 – кусочно-линейные сопротивления; R_{x1}, R_{x2}, R_{x3} – переменные управляемые сопротивления; 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.

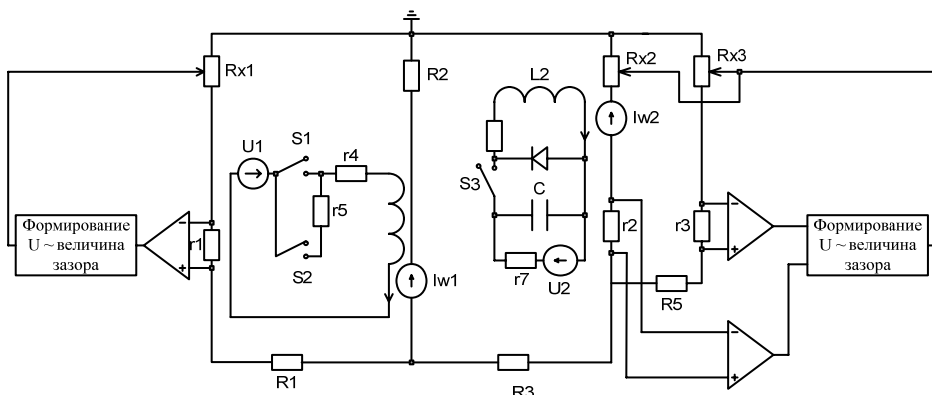


Рис. 6. Упрощенная блок-схема электромагнитного привода.

5. Временные диаграммы работы модели

Для понимания работы модели на **Рис.7** представлен упрощенный вид временных диаграмм (обозначения элементов на диаграммах соответствуют обозначениям, принятым на **Рис.6**). В качестве начального состояния **примем состояние размыкателя «Разомкнуто»**. При этом **оба ярма оторваны** от сердечника, а катушки управления находятся в обесточенном состоянии.

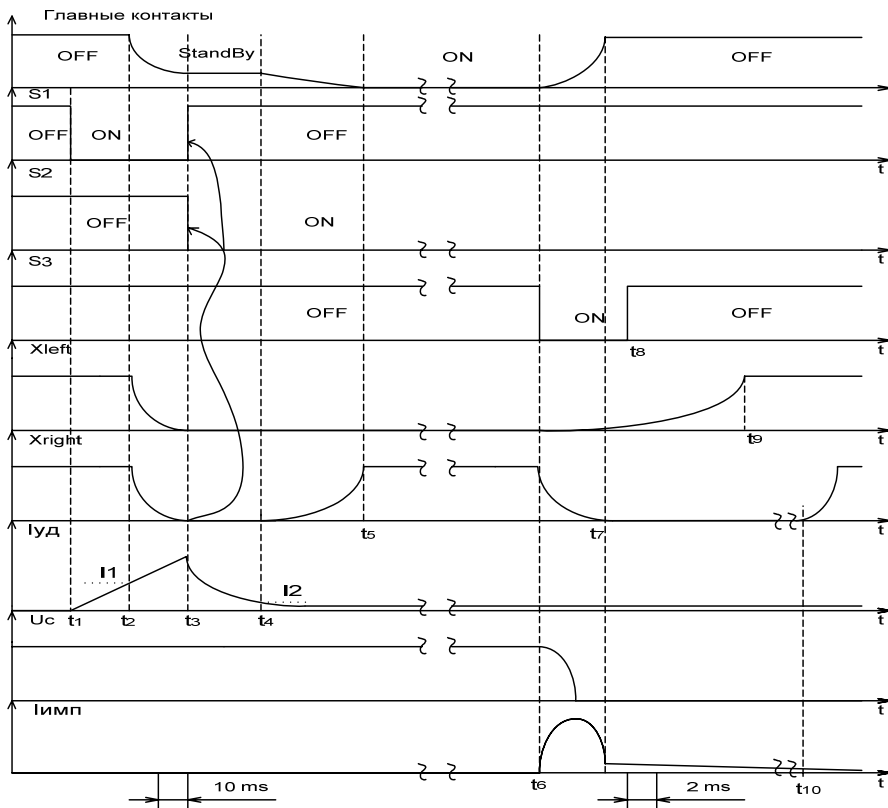


Рис. 7. Временные диаграммы переходных процессов электромагнитного привода.

Включение размыкателя.

Пусть в момент времени t_1 замкнулся ключ S_1 и на удерживающую катушку подалось напряжение 110 в источника U . Ток удерживающей катушки $I_{yд}$ начал нарастать. При значении $I_{yд} = I_1$ оба ярма начинают

притягиваться к сердечнику (момент времени t_2). В момент времени t_3 оба ярма притянулись к сердечнику, силовые контакты переходят в предвключенное состояние, заставив (через блок - контакты) разомкнуться S1 и замкнуться S2. При этом ток в удерживающей катушке начинает спадать с постоянной времени примерно 20 мс до значения 0.5 А. При значении $I_{уд} = I_2$ (момент времени t_4) правое ярмо начинает отходить от сердечника и в момент времени t_5 достигает крайнего положения (при этом левое ярмо остается в притянutom состоянии). Размыкатель готов к работе - его силовые контакты замкнуты.

Выключение размыкателя импульсной катушкой.

Пусть в момент времени t_6 (допустим по сигналу «Авария») ключ S3 замкнулся, и конденсатор C3 начал разряжаться на импульсную катушку. В импульсной катушке начинает нарастать ток $I_{имп}$, правое ярмо начинает притягиваться к сердечнику, заставляя размыкаться силовые контакты. В момент времени t_8 правое ярмо притянулось к сердечнику, а силовые контакты разомкнулись. Размыкатель перешел в состояние «Разомкнуто».

Таким образом время срабатывания размыкателя составило $\delta t = t_8 - t_6$. Одновременно с процессами, происходящими в правом ярме, часть импульсного потока замыкается через левый сердечник и левое ярмо. Этот поток вычитается из потока, созданного удерживающей катушкой, и уменьшает его настолько, что магнитная сила, удерживающая левое ярмо, становится меньше сил упругости пружин, отрывающих его от сердечника. Левое ярмо также начинает двигаться и примерно через 80 мс достигает крайнего положения (момент времени t_9).

По окончании импульса разрядки конденсатора в момент времени t_7 размыкается ключ S3, ток импульсной катушки спадает, замыкаясь через обратный диод, с постоянной времени примерно 50 мс, ток удерживающей катушки оказывается недостаточным для удержания правого ярма и оно возвращается в исходное (разомкнутое) состояние в момент времени t_{10} . Можно сказать, что после этого все процессы размыкания размыкателя завершены.

Заметим, что оставаясь в разомкнутом состоянии, левое ярмо предотвращает повторное включение размыкателя.

Из приведенных временных диаграмм можно сформулировать основную цель дальнейшего моделирования – оптимизировать цепи управления катушками, как удерживающей, так и импульсной, таким образом, чтобы время срабатывания размыкателя δt было минимальным. Для обеспечения устойчивого перехода размыкателя в состояние «Разомкнуто» выполнение условия $(t_9 - t_6) < (t_{10} - t_6)$ является строго обязательным.

6. Результаты моделирования

Были промоделированы процессы, протекающие, как при выключении размыкателя благодаря срабатыванию импульсной катушки, так и при процедуре включения размыкателя в состоянии "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. Дополнительно исследована возможность применения GTO в схеме управления импульсной катушкой.

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

- 1) магнитные потоки во всех цепях;
- 2) движение левого и правого ярма с выводом координаты;
- 3) скорости движения левого и правого ярма;
- 4) результирующие силы, действующие на ярмо;
- 5) токи в удерживающей и импульсной катушках;
- 6) напряжения на катушках.

Типичные диаграммы моделирования включения и выключения размыкателя представлены на **Рис.8.** и **Рис.9.**

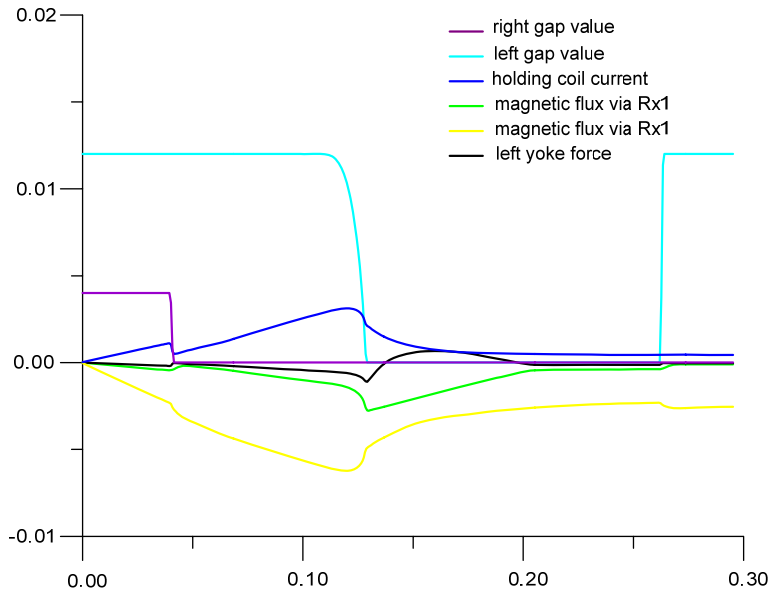


Рис. 8. Процесс включения размыкателя.

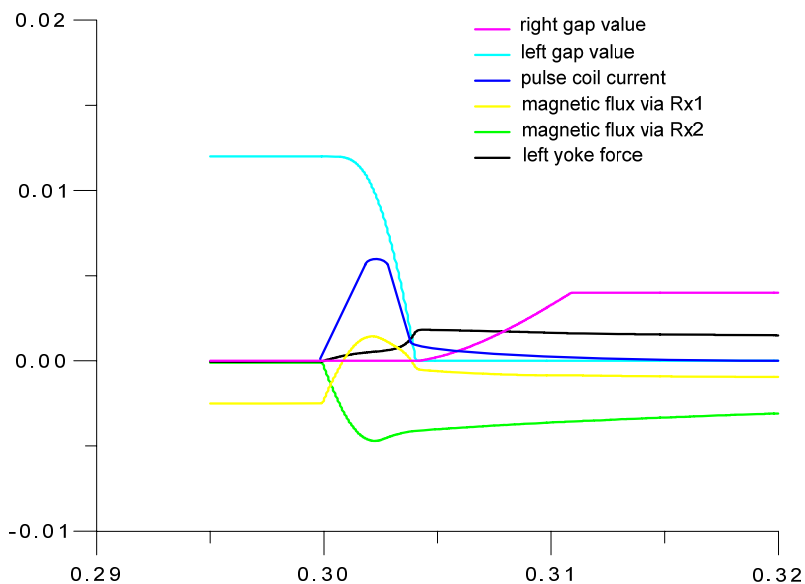


Рис. 9. Процесс выключения размыкателя.

Рассмотрим детально операцию выключения размыкателя импульсной катушкой. Пусть в момент времени $t = 350 \text{ ms}$ ключ S3 замкнулся и ёмкость 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 $t \approx 354 \text{ ms}$ ($\Delta t = 4 \text{ ms}$) ярмо достигает сердечника, его скорость зануляется, сопротивление зазора становится близко к нулю, индуктивность, следовательно, становится постоянной. Ток в импульсной катушке начинает падать с большой постоянной времени (которая со временем увеличивается в связи с медленным ростом индуктивности вследствие уменьшения насыщения). 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. Магнитная сила, действующая на левое ярмо, уменьшается. 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 растёт, 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 миллисекунды (это определяется исключительно временем притягивания правого ярма). Оторванное от сердечника левое ярмо не даёт размыкателью 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.

7. Выводы

Скорость срабатывания размыкателя определяется током в импульсной катушке и его длительностью (т.е. зарядом ёмкости и ее величиной), а также параметрами катушки. При этом левое ярмо должно обязательно оторваться от сердечника и перейти в крайнее положение. Последнее определяется, как величиной тока в импульсной катушке, так и величиной тока 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 А 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} своё для каждого значения удерживающего тока), до 280 В. На **Рис.10.** 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.

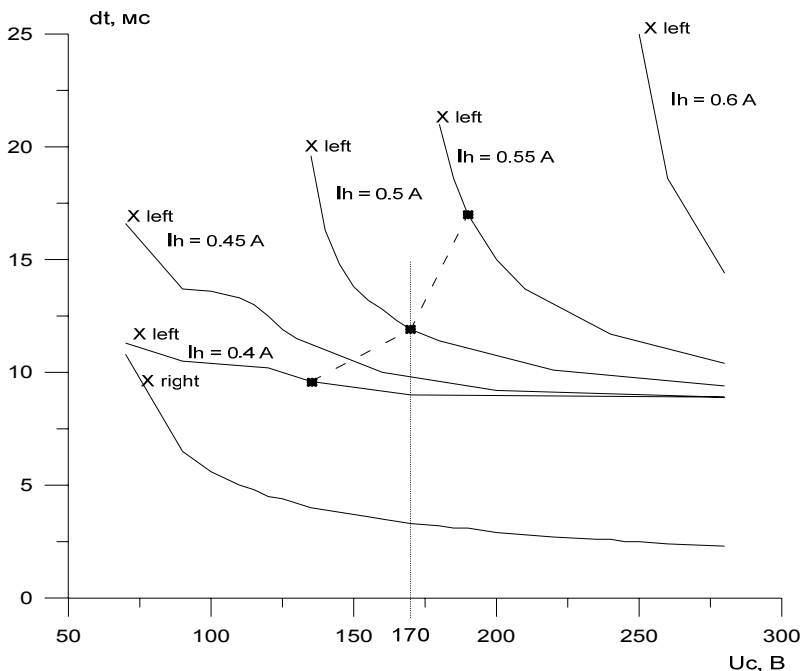


Рис. 10. Выключение импульсной катушкой.

Семейство зависимостей времен полного отрыва ярма от напряжения на зарядном конденсаторе и тока в удерживающей катушке (оптимальной рабочей точкой рекомендовано $I_{уд} = 0.5 \text{ A}$, $U_c = 170 \text{ B}$).

Оптимальным режимом работы электромагнитного привода размыкателя, как нам кажется, является режим $I_{\text{holding}} = 0.5 \text{ A}$, $U_c = 170 \text{ B}$. При этом время срабатывания размыкателя составляет 3.3 миллисекунды, а время полного отрыва левого ярма составляет 12 миллисекунд. В случае изменения напряжения питающей сети в пределах $+10\%$, -20% (при этом удерживающий ток и напряжение на конденсаторе уменьшаются или увеличиваются одновременно) рабочая точка движется по кривой, указанной пунктиром.

На основании выданных рекомендаций для всех 254 размыкателей ВАБ-49, установленных в тоннеле ЛНС в CERN, была выбран режим работы электромагнитного привода с $I_{\text{holding}} = 0.5 \text{ A}$, $U_c = 170 \text{ B}$. На сегодняшний день все размыкатели успешно прошли приемочные испытания. По результатам моделирования в CERN был выпущен препринт [5].

Литература

- [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., Чуриков Б.* «Электромагнитное поле», Новосибирск, 1973.
- [4] *Смирнов А.* «Программа NL для компьютерного моделирования нелинейных электронных схем». Новосибирск, ИЯФ.
- [5] *A. Erokhin, A. Medvedko.* 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.

А.И. Ерохин, А.С. Медведко

**Компьютерное моделирование
импульсной цепи управления
электромагнитным приводом размыкателя
постоянного тока в системе вывода энергии
из 13кА сверхпроводящих магнитов**

A.I. Erokhin, A.S. Medvedko

**Computer simulation of the pulsed powering
of D.C. circuit breaker for the 13kA superconducting
magnet energy extraction system**

ИЯФ 2008-2

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 29.01. 2008 г.

Сдано в набор 30.01. 2008 г.

Подписано в печать 30.01. 2008 г.

Формат 60х90 1/16 Объем 1.5 печ.л., 1.2 уч.-изд.л.

Тираж 105 экз. Бесплатно. Заказ № 2

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11