

Ферромагнитный размыкатель тока

© Г.А. Шнеерсон, Ю.Н. Бочаров, И.П. Ефимов, С.И. Кривошеев

С.-Петербургский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 5 октября 1998 г.

Переброс тока в нагрузку индуктивного накопителя энергии может быть произведен быстрым увеличением индуктивности элемента цепи, включенного параллельно нагрузке. В данной работе для этой цели предлагается использовать катушку с ферромагнитным сердечником. В дополнение к главному (тороидальному) полю в этом сердечнике создается ортогональное (полоидальное) управляющее поле.

Результаты исследования, представленные в статье, демонстрируют, что при некоторых условиях намагничивание и, следовательно, индуктивность могут быть резко изменены этим ортогональным полем управления. Также показано, что процесс переключения может управляться довольно маленькими токами. При благоприятных геометрических соотношениях можно получить изменение индуктивности в 3 . . . 10 раз.

Предлагаемая система многократного использования, поскольку она не содержит элементов, разрушаемых в процессе коммутации, как например при использовании взрывающихся проводников. Система эффективна для малоиндуктивной нагрузки.

1. Принцип действия ферромагнитного размыкателя с поперечным подмагничиванием. Для быстрого переброса тока в индуктивных и индуктивно-емкостных накопителях энергии используются схемы, в которых происходит резкий рост переходного импеданса элемента цепи. Этот процесс может быть осуществлен различными способами, включая скачок индуктивности в схеме (рис. 1) от начального значения L'_1 до конечного L''_1 . При этом ток в нагрузке и ток i_1 будут определяться выражением [1]:

$$i''_2 = i'_0 \frac{K - 1}{L_2/L'_1 + K(1 + L_2/L_0)}, \quad i''_1 = i'_0 \frac{1 + L_2/L'_1 + L_2/L_0}{L_2/L'_1 + K(1 + L_2/L_0)}, \quad (1)$$

где i'_0 — начальное значение тока i_0 , i''_2 — ток в индуктивной нагрузке, $K = L''_1/L'_1$ — кратность изменения индуктивности.

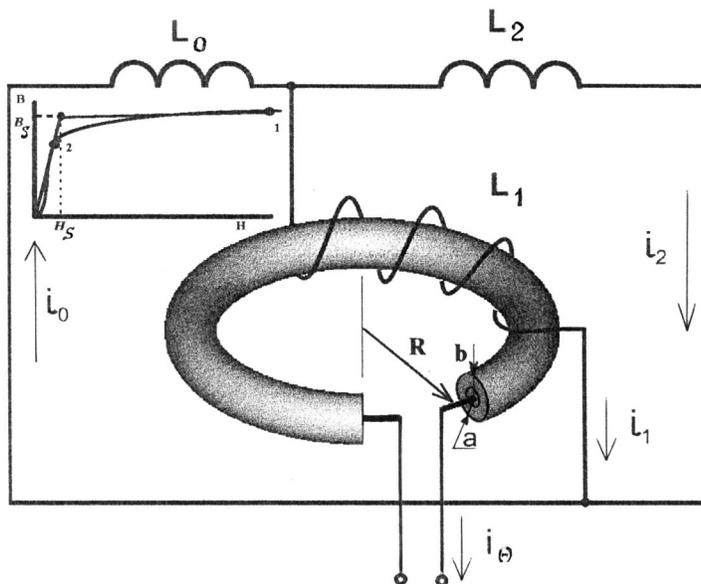


Рис. 1. Цепь для переброса тока в индуктивную нагрузку в результате изменения индуктивности L_1 .

При получении сверхсильных магнитных полей в одновитковых малоиндуктивных соленоидах требуется получить импульс тока мегаамперного диапазона с временем нарастания порядка 10^{-6} с и менее. В этом случае для сокращения длительности фронта импульса тока может быть использована схема индуктивно-емкостного накопителя [2]. В указанных экспериментах обычно выполнено условие $L_2 \ll L_0$, где L_0 — индуктивность источника энергии.

В данной работе рассматривается возможность применения для целей коммутации скачка намагниченности сердечника катушки L_1 в результате внешнего воздействия. В исходном состоянии сердечник должен быть глубоко насыщен, а затем в требуемый момент материал сердечника должен перейти в ненасыщенное состояние, что сопровождается резким ростом индуктивности до значения L_1'' и переходом тока в нагрузку L_2 . При этом следует так осуществить управление процессом, чтобы скачок индуктивности и время его реализации опре-

делялись внешним воздействием, а не током в цепи накопителя. Здесь предлагается использовать для этой цели систему с ортогональными полями [3].

В предлагаемом устройстве в качестве индуктивности L_1 используется катушка с тороидальным сердечником, по обмотке которой проходит ток i_1 создающий тороидальное поле с индукцией B_θ (рис. 1). На оси сердечника размещен контур с током i_θ . Индукция тороидального поля тока i_1 ортогональна индукции полоидального поля B_φ , создаваемого током i_θ . Индуктивность L_1 может изменяться в широких пределах с помощью управляющего тока i_θ . Это можно показать на примере, когда материал сердечника изотропен и зависимость индукции от напряженности магнитного поля имеет вид $\vec{B} = \mu(H)\vec{H}$. В этой формуле магнитная проницаемость зависит от модуля напряженности $H = (H_\varphi^2 + H_\theta^2)^{1/2}$. Пусть в начальном состоянии системы $H_\varphi \gg H_s$ и $H_\theta \geq H_s$ (точка 1 на кривой $B(H)$, рис. 1). Здесь H_s — пороговая напряженность, которая соответствует точке пересечения двух участков ломаной линии, аппроксимирующей кривую намагничивания. В исходном состоянии сердечник резко насыщен за счет действия полоидального поля H_φ . При отключении тока i_θ поле H_φ становится равным нулю и состояние системы характеризуется точкой 2. Индуктивность L_1 резко возрастает. Соответственно изменяются токи i_0 , i_1 и i_2 в элементах цепи индуктивного накопителя. Заметим, что вместо выключения тока i_θ может быть включен ток $-i_\theta$ в том же контуре или в расположенном близко к нему внутри сердечника.

Далее выполнены оценки параметров ферромагнитного размыкателя, рассмотрена возможность его применения для коммутации в малоиндуктивных цепях, а также приводятся некоторые результаты расчетов.

2. Приближенные оценочные характеристики ферромагнитного размыкателя. Для приближенного описания магнитной цепи размыкателя можно заменить кривую намагничивания ломаной (рис. 1):

$$B(H) = \begin{cases} \mu H, & B \leq B_s, \\ \mu_{eff} H, & B \geq B_s, \end{cases} \quad (2)$$

где $\mu_{eff} = \frac{B_s + (H - H_s)\mu_0}{H} = \mu_0 \left[1 + \frac{B_s}{\mu_0 H} \left(1 - \frac{\mu_0}{\mu} \right) \right]$.

В качестве расчетной модели рассмотрим систему в виде полого тороида, в котором выполнено условие $b < a \ll R$ (рис. 1). В состоянии

насыщения $H \approx H_\varphi = i_\theta/2\pi a$. При условиях $\mu \gg \mu_0$ и $H_\varphi \gg H_\theta$ имеем в исходном состоянии

$$\mu_{eff} = \mu'_{eff} \approx \mu_0 \left(1 + \frac{B_S}{\mu_0 H_\varphi} \right) = \mu_0 \left(1 + \frac{l_\varphi B_S}{\mu_0 i_\theta} \right). \quad (3)$$

В этой формуле $l_\varphi = 2\pi a$ — длина силовой линии полоидального поля, H_φ — его напряженность. Далее для оценок примем для B_S значение 1.5 Т. Это соответствует таким магнитным материалам, как пермаллой, аморфное железо и др., применяемым в импульсных трансформаторах и устройствах для компрессии магнитного потока.

При равных токах i_1 и i_θ отношение $H_\varphi/H_\theta \approx l_\theta/a$. Если $l_\theta/a \gg 1$, то можно обеспечить условие $H_\varphi/H_\theta \gg 1$ при управляющем токе i_θ , существенно меньшем, чем ток i_1 . Таким образом, в системе с ортогональными полями имеется возможность внешнего управления процессом коммутации с помощью относительно слабого тока.

При выполнении условия $w_1 i_1'' < B_S l_\theta / \mu = i_{1s}$ сердечник после коммутации не будет насыщен (w_1 — число витков). Ток i_1'' можно найти с помощью формулы (1), которую удобно представить в следующем виде:

$$i_1'' = i_0' \frac{\alpha}{K + \beta} < i_{1s}/w_1, \quad (4)$$

где $\alpha = (1 + L_2/L_1' + L_2/L_0)/(1 + L_2/L_0)$, а $\beta = (L_2/L_1')/(1 + L_2/L_0)$ — безразмерные числа, определяемые соотношениями индуктивностей. В частном случае, когда $L_2/L_0 \ll 1$, имеем $\alpha = 1 + L_2/L_1'$ и $\beta = L_2/L_1'$. Из формулы (4) вытекает условие, ограничивающее значение коммутируемого тока

$$w_1 i_0' \leq \frac{i_{1s}}{\alpha} (K + \beta). \quad (5)$$

Ток намагничивания относительно мал. Тем не менее условие (5) может быть выполнено даже при большом коммутируемом токе, если отношение $\mu/\mu'_{eff} = K$ достаточно велико. Используя формулу (2), получаем общие выражения для K , допустимого коммутируемого тока и тока в нагрузке:

$$K = \frac{L_1''}{L_1'} = \frac{\mu_0/\mu}{1 + (1 - \mu_0/\mu) \cdot p}, \quad (6)$$

$$i_0' = \frac{l_\theta B_S}{\mu} \left(1 + \frac{\mu}{\mu_0} \cdot \left[1 + p + \frac{L_2 l_\theta}{\mu_0 S [1 + p]} + \frac{L_2 l_\theta}{\mu_0 S} \frac{p}{p + 1} \right]^{-1} \right), \quad (7)$$

$$i_2' = \frac{l_\theta B_S}{\mu_0} \cdot \left[1 + p + \frac{L_2 l_\theta}{\mu_0 S [1 + p]} + \frac{L_2 l_\theta}{\mu_0 S} \frac{p}{1 + p} \right]^{-1}. \quad (8)$$

На рис. 2 представлены кривые, иллюстрирующие данные зависимости как функции безразмерного параметра $p = B_S / (\mu_0 H_\varphi)$.

3. Режим слабого насыщения. Этому режиму соответствует правая часть кривых рис. 2, где выполнено условие $B_S / (\mu_0 H_\varphi) > 1$. При этом условии, согласно (5), справедлива оценка для токов и K :

$$K \approx H_\varphi / H_S, \quad i_0' \approx \frac{i_\theta l_\theta}{l_\varphi (1 + L_2 l_\theta i_\theta / (S B_S l_\varphi))}, \quad i_2' \approx \frac{l_\theta H_\varphi}{1 + L_2 l_\theta H_\varphi / (B_S S)}. \quad (9)$$

Формулы (9) позволяют оптимизировать параметры индуктивного накопителя с ферромагнитным коммутатором. Задача оптимизации может быть поставлена как выбор параметра l_φ — длины силовой линии поперечного поля, при котором можно получить максимальное значение коммутируемого тока i_0' в соленоиде фиксированной длины при заданном управляющем токе i_θ (рис. 3). Полученные результаты показывают, что при длине сплошного сердечника порядка 1 м могут быть достигнуты значения коммутируемых токов порядка 10^5 А; при этом управляющие токи могут иметь в несколько раз меньшую амплитуду. Для достижения

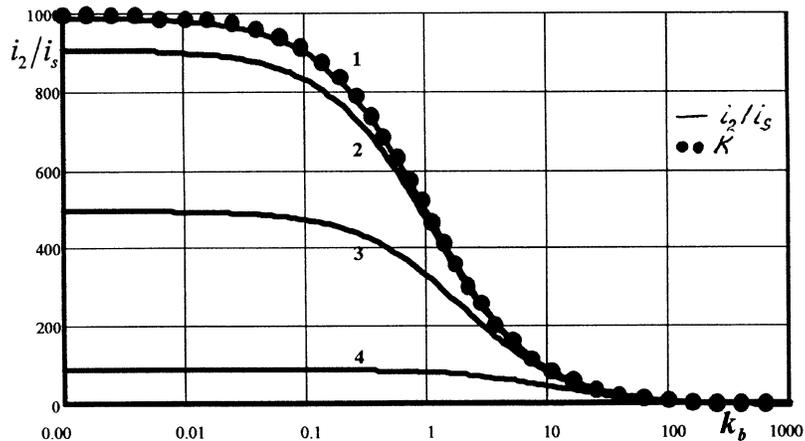


Рис. 2. Зависимость i_2/i_s и K от величины параметра $k_b = B_S / (\mu_0 H_\varphi)$. Для L_2/L_1^0 : 1 — 0.01, 2 — 0.1, 3 — 1, 4 — 10.

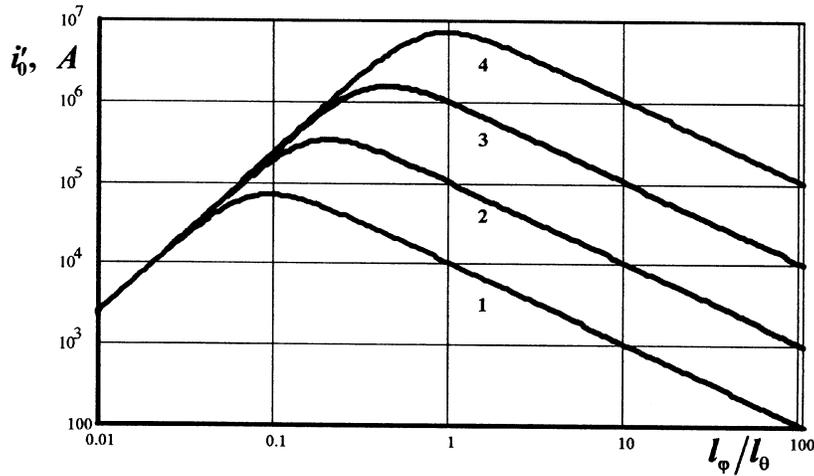


Рис. 3. Зависимость допустимого тока коммутации i'_0 от величины отношения l_φ/l_θ . Для i_θ : 1 — 10^4 А, 2 — 10^5 А, 3 — 10^6 А, 4 — 10^7 А.

тока, близкого к 10^6 А, необходимо увеличить длину сердечника, которая (при неизменной управляющем токе i_θ) растет пропорционально $(i'_0)^2$. Следует отметить, что в рассматриваемом случае кратность K хотя и меньше предельного значения μ/μ_0 , но сохраняет высокие значения (порядка десяти и выше).

4. Режим сильного насыщения. Режиму сильного насыщения соответствует условие $B_S/\mu_0 H_\varphi \ll 1$ (левая часть рис. 2). При условии $\mu/\mu_0 \gg 1$, $K \gg 1$ токи и K принимают значения

$$K \approx \frac{\mu}{\mu_0(1 + B_S/\mu_0 H_\varphi)}, \quad i''_2 \approx \frac{B_S l_\theta}{\mu_0(1 + L_2/L'_1)(1 + B_S/\mu_0 H_\varphi)},$$

$$i_0 \approx \frac{B_S l_\theta}{\mu} + \frac{B_S l_\theta}{\mu_0[1 + (1 + B_S/\mu_0 H_\varphi)L_2/L'_1]}. \quad (10)$$

Режим сильного насыщения может быть использован для получения мегаамперных токов в малоиндуктивной нагрузке. В этом случае длина l_θ должна быть достаточно велика, а сечение соленоида должно быть выбрано так, чтобы отношение L_2/L'_1 не было большим числом. При

достаточно большой длине, сечении соленоида и малой индуктивности нагрузки ферромагнитный размыкатель может обеспечить управляемый перебор мегаамперного тока в нагрузку индуктивного накопителя. Например, если $B_S/\mu_0 H_\varphi = 1$, $\mu'_{eff} = 2\mu_0$ и принято значение $B_S = 1.26$ Т, то при $S = 10^{-2}$ м² и $l_\theta = 5$ м для индуктивности L_2 5 и 1 нН соответственно получаем 1.25 и 2.08 МА.

5. Заключение. Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Управляемое изменение индуктивности в системе с ортогональными полями может быть использовано для переброса тока в нагрузку индуктивного накопителя. При этом управляемая индуктивность является аналогом размыкателя.

2. Ферромагнитный размыкатель позволяет коммутировать токи мегаамперного диапазона в системах с малоиндуктивной нагрузкой (порядка 10^{-9} Н).

3. Параметры размыкателя могут быть оптимизированы в случае, когда в исходном состоянии материал сердечника неглубоко насыщен. В этом режиме размыкатель целесообразно использовать для коммутации токов с амплитудой $10^4 \dots 10^5$ А.

Работа выполнена при поддержке ФЦП "Интеграция", проект К0854.

Список литературы

- [1] *Shneerson G.A.* Field and transients in Superhigh Pulse Current Devices. Nova Science Publishers, Inc. New York, 1997.
- [2] *Бурцев И.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В.* Электрический взрыв проводников. М.: Энергоатомиздат, 1990. 289 с.
- [3] *Дорожко Л.И., Либкинд М.С.* Реакторы с поперечным подмагничиванием. М.: Энергия, 1977.