

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пособие к «Инструкции по устройству молниезащиты зданий и сооружений». – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 18 с.
2. Ристхейн Э. Введение в энерготехнику. – Таллин: Elektrijam, 2008. – 213 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Гардарики УИЦ, 2003. – 317 с.
4. Теоретические основы электротехники. Т. II. Нелинейные цепи и основы электромагнитного поля / Под ред. П.А. Ионкина. – М.: Высшая школа, 1976. – 383 с.

Поступила 25.03.2009 г.

УДК 621.314

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДУКТИВНОГО РАЗМЫКАТЕЛЯ ДЛЯ КОММУТАЦИИ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

С.В. Пустынников, Т.Е. Хохлова, Н.А. Макенова

Томский политехнический университет
E-mail: xoxlova@tpu.ru; mna@iao.ru

Показана возможность использования индуктивного размыкателя для коммутации цепей постоянного тока с индуктивной нагрузкой. Разработана математическая модель расчета переходного процесса методом переменных состояния, позволяющая рассчитать ток в цепи нагрузки и перенапряжение на контактах размыкающего ключа в слаботочной цепи по параметрам индуктивного размыкателя. Результаты расчета подтверждены экспериментально.

Ключевые слова:

Сильноточные и слаботочные цепи, постоянный ток, ток нагрузки, индуктивный размыкатель, переходный процесс, метод переменных состояния.

Коммутация сильноточных цепей постоянного тока, содержащих индуктивную нагрузку или имеющих внутреннюю индуктивность – линий электропередач, линий связи, цепей с генераторами и двигателями постоянного тока и т. д., осуществляется при помощи электромеханических устройств – пускателей, контакторов, имеющих конечное время срабатывания. В [1, 2] показано, что размыкание цепей постоянного тока с индуктивностью за время $\Delta t \rightarrow 0$ приводит к изменению потокосцепления индуктивности от начального значения $\Psi = L \cdot i_0$ до нуля. При этом теоретически в индуктивности возникает импульс перенапряжения $u_L = d\Psi/dt$ бесконечной величины. На практике $\Delta t \geq 0$, что сопровождается возникновением дуги на размыкающих контактах, а также скачком напряжения на индуктивности, в 5...7 раз превышающем напряжение источника питания, что приводит к выходу из строя коммутирующего оборудования.

Авторами была разработана и исследована модель бесконтактного размыкания сильноточной цепи постоянного тока с внутренней индуктивностью или с индуктивной нагрузкой с помощью индуктивного размыкателя. Схема предложенной модели показана на рис. 1.

Модель состоит из:

- сильноточной цепи, в которой последовательно включены постоянный источник ЭДС E_1 , активно-индуктивное сопротивление нагрузки R_H , L_H , тиристор VS ;

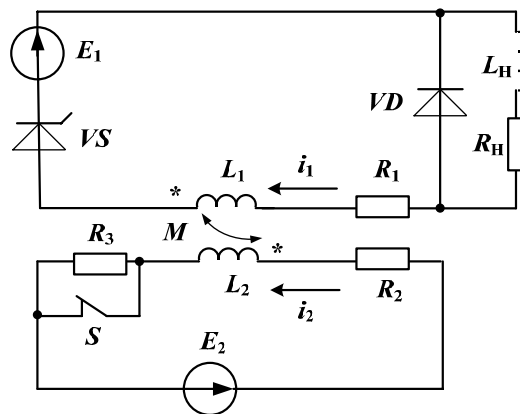


Рис. 1. Схема индуктивного размыкателя

- индуктивного размыкателя, содержащего две индуктивно-связанные катушки индуктивности R_1, L_1 и R_2, L_2 , включенные встречно, (причем, $L_1 \leq L_2$ и $R_1 \leq R_2$ благодаря чему ток в первой катушке i_1 в несколько раз превышает величину тока второй катушки i_2) и подключенное последовательно со второй катушкой индуктивности сопротивление $R_3 \rightarrow \infty$, зашунтированное ключом S , и постоянный источник ЭДС E_2 .

Предложенная модель позволяет осуществлять бесконтактное размыкание сильноточной цепи путем размыкания слаботочной цепи индуктивного размыкателя.

Подключение нагрузки R_H, L_H к источнику ЭДС E_1 осуществляется путем подачи управляющего сигнала на тиристор VS , по силовой цепи протекает ток i_1 . Слаботочная цепь подключается к источнику ЭДС E_2 , под действием которой протекает ток i_2 , по величине в 5...10 раз меньше тока i_1 .

При отключении нагрузки R_H, L_H от ЭДС E_1 размыкается ключ S , ток i_2 уменьшается практически до нуля. За счет индуктивной связи M в первой катушке индуктивности R_1, L_1 формируется отрицательный импульс тока, благодаря которому ток i_1 переходят через нулевое значение, что приводит к запирантию тиристора VS и отключению силовой цепи от источника ЭДС E_1 . Энергия, запасенная в индуктивности L_H , шунтируется диодом VD .

При расчете и проектировании индуктивного размыкателя необходимо знать условия, при которых обеспечивается переход тока нагрузки i_1 через нулевое значение, что является обязательным для запирантия тиристора VS . Поскольку в первый момент времени $t=0_+$ после размыкания ключа S нагрузка шунтируется диодом VD , то параметры нагрузки R_H, L_H не оказывают влияния на переходный процесс в остальной цепи. С момента времени $t=0_+$ переходный процесс описывается системой уравнений, составленной по законам Кирхгофа для мгновенных значений:

$$\begin{cases} E_1 = i_1 \cdot R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \\ E_2 = i_2 \cdot (R_2 + R_3) + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} \end{cases}$$

Полученную систему дифференциальных уравнений первого порядка можно решить непосредственно, не преобразуя ее в дифференциальную систему n порядка. Для этого используем метод переменных состояния, согласно которому в матричной форме дифференциальные уравнения переменных состояния записываются в виде [3]:

$$(dx/dt) = (A) \cdot (x) + (B) \cdot (V),$$

где матрица-столбец:

- переменных состояния (величины, подчиняющиеся законам коммутации) – (x) ,
- источников энергии – (V) ,
- первых производных по времени от переменных состояния – (dx/dt) ;

матрица:

- состояния (коэффициенты при переменных состояния) – (A) ,
- коэффициентов при источниках – (B) .

Таким образом, получим:

$$\begin{pmatrix} di_1/dt \\ di_2/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -L_2 \cdot R_1 & -R_2 \cdot M - R_3 \cdot M \\ L_2 \cdot L_1 - M^2 & L_2 \cdot L_1 - M^2 \\ -M \cdot R_1 & -R_2 \cdot L_1 - R_3 \cdot L_1 \\ L_2 \cdot L_1 - M^2 & L_2 \cdot L_1 - M^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} +$$

$$+ \begin{pmatrix} \frac{L_2}{L_2 \cdot L_1 - M^2} & \frac{M}{L_2 \cdot L_1 - M^2} \\ \frac{M}{L_2 \cdot L_1 - M^2} & \frac{L_1}{L_2 \cdot L_1 - M^2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}.$$

Кроме того, для решения необходимо задать матрицу-столбец начальных условий, значения которой равны установившимся значениям токов i_1 и i_2 :

$$(x_0) = \begin{pmatrix} E_1 / (R_H + R_1) \\ E_2 / R_2 \end{pmatrix}.$$

Все остальные величины, не являющиеся переменными состояния, находятся по алгебраическим уравнениям через переменные состояния. Для нашего случая это величина перенапряжения на зажимах ключа S :

$$u = i_2 \cdot R_3.$$

Аналитическое решение уравнений состояния записывается в общем виде:

$$(x) = (x_{св}) + (x_{пр}),$$

где $(x_{св}) = (x_0) \cdot e^{(A)t}$ – определяет реакцию цепи, обусловленную ненулевыми начальными условиями (при отсутствии внешнего воздействия);

$$(x_{пр}) = \int_0^t e^{(A)(t-\tau)} \cdot (B) \cdot (V) d\tau \quad \text{— реакция цепи от}$$

внешних воздействий при нулевых начальных условиях; $e^{(A)t}$ – матричная экспоненциальная функция, представляющая собой медленно сходящийся ряд.

Определение коэффициентов этого ряда – трудоемкий и громоздкий процесс, поэтому наиболее часто решение уравнений состояния выполняют численно, используя алгоритмы численного интегрирования.

Исследуем работу модели размыкателя для схемы с параметрами: $E_1=100$ В, $L_1=0,01$ Гн, $R_1=0,1$ Ом, $M=0,1$ Гн, $E_2=20$ В, $L_2=1$ Гн, $R_2=1$ Ом, $R_3=1$ кОм, $L_H=5$ Гн, $R_H=1$ Ом.

Получили дифференциальные уравнения переменных состояния в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} di_1/dt \\ di_2/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -52,632 & -47415,789 \\ -4,737 & -5268,421 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 526,316 & 47,368 \\ 47,368 & 5,263 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 100 \\ 20 \end{pmatrix}$$

и матрицу начальных условий

$$(x_0) = \begin{pmatrix} 90,909 \\ 20 \end{pmatrix}.$$

Для решения системы используем численный метод Рунге-Кутты, основанный на разложении пе-

ременных состояния в ряд Тейлора и учете его первых двух членов:

$$(x_{k+1}) = (x_k) + h \cdot (dx/dt),$$

где (x_k) – матрица-столбец переменных состояния для k -го шага, h – шаг интегрирования по времени.

Методическая погрешность данного алгоритма пропорциональна h^5 и, естественно, уменьшение шага приводит к увеличению точности. Однако с ростом числа шагов погрешность может увеличиваться за счет погрешности округления.

На рис. 2 показаны результаты математического моделирования, проведенные в пакете программ MathCad 13.0.

На рис. 3 представлены результаты виртуального исследования работы индуктивного размыкателя с помощью программы Electronic Workbench 5.12. В схеме для демонстрации переходных процессов в коммутируемой цепи тиристор отсутствует. Для моделирования индуктивно-связанных катушек использовался воздушный трансформатор.

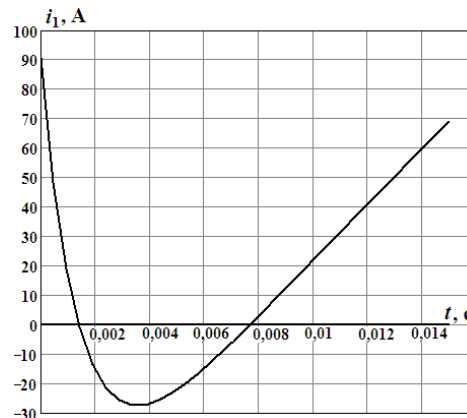
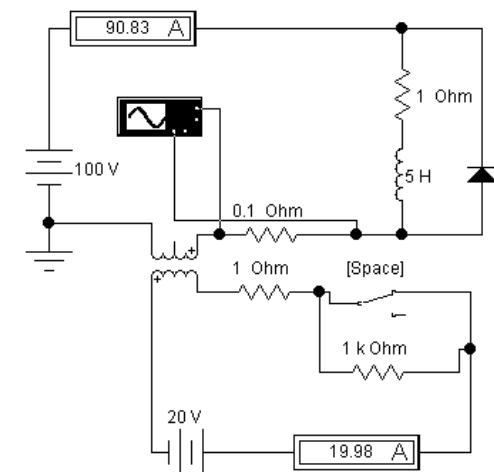
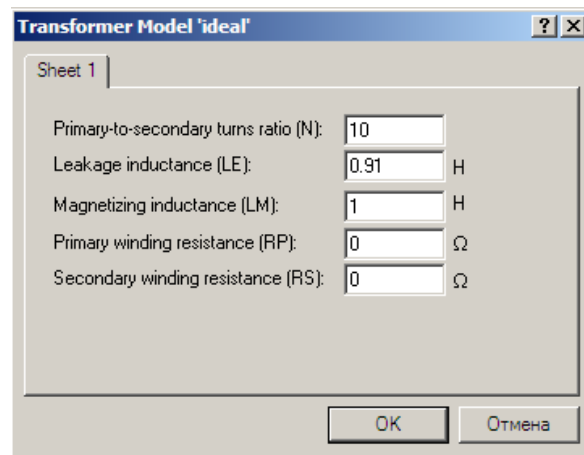


Рис. 2. График тока нагрузки

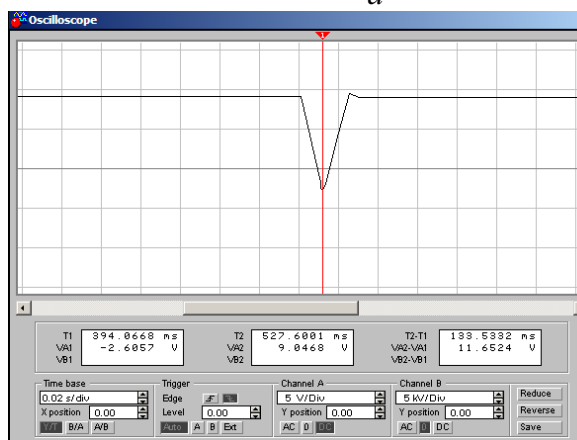
По результатам моделирования получили: минимальное значение тока нагрузки $i_{\min} \approx -27,426$ А и перенапряжения на зажимах размыкающего ключа $u \approx 14,69$ кВ. В реальных цепях размыкание ключа S осуществляется не мгновенно, а за некоторый интервал времени, в связи с чем бросок перенапряже-



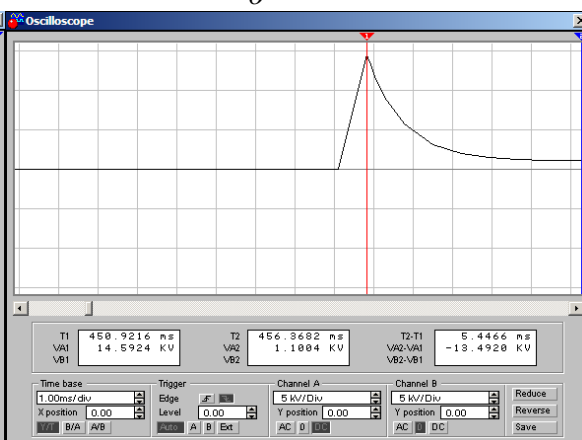
а



б



в



г

Рис. 3. Виртуальное моделирование работы индуктивного размыкателя: а) схема; б) окно настройки воздушного трансформатора; в) осциллограмма тока в нагрузке; г) осциллограмма перенапряжения

ния может существенно уменьшиться. Перенапряжение можно также уменьшить, если включить параллельно ключу S дугогасящую RC цепочку.

Для получения осциллограммы перенапряжения выводы осциллографа подключались к зажимам размыкающего ключа S .

Анализ осциллограмм показывает, что минимальное значение тока нагрузки составляет $i_{\min} \approx -26$ А, перенапряжения – $u \approx 14,6$ кВ, что практически совпадает с результатами математического моделирования.

Выводы

1. Разработан индуктивный размыкатель, способный коммутировать силовоточные цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой путем размыкания цепи постоянного тока, величина которого в 5...10 раз меньше, чем ток нагрузки. Это позволяет существенно уменьшить габариты размыкающего ключа в слаботочной цепи, увеличить срок службы и надежность его работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галинский П.П., Кононов А.П. и др. Теоретические основы электротехники в задачах. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1975. – 294 с.
2. Пат. на ПМ 77524 РФ. МПК⁸ G01N 29/04. Размыкатель цепей постоянного тока / С.В. Пустынников. Заявлено 10.01.2008; Оpubл. 20.10.2008, Бюл. № 29. – 4 с.: ил.
2. Индуктивный размыкатель состоит из индуктивно-связанных катушек, имеющих встречное включение. Катушка с меньшей индуктивностью включена в цепь нагрузки, а с большей – в слаботочную цепь к дополнительному источнику напряжения. Это позволяет при размыкании слаботочной цепи формировать импульс тока в нагрузке, приводящий к отключению силовой цепи от источника питания.
3. Разработана математическая модель расчета переходного процесса методом переменных состояния, позволяющая рассчитать ток в цепи нагрузки и перенапряжение на зажимах размыкающего ключа в слаботочной цепи по параметрам индуктивного размыкателя.
4. Проведено исследование работы модели индуктивного размыкателя с заданными параметрами. Установлено, что размыкание ключа в слаботочной цепи приводит к переходу тока нагрузки через нулевое значение. Проведено виртуальное исследование работы индуктивного размыкателя, которое подтвердило результаты математического моделирования.
3. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

Поступила 31.03.2009 г.