

РАЗМЫКАТЕЛЬ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

Пустынников Сергей Владимирович,

канд. техн. наук, доцент кафедры электрических сетей и электротехники
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

E-mail: pustynnikov@list.ru

Хохлова Татьяна Евгеньевна,

канд. техн. наук, доцент кафедры электрических сетей и электротехники
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

E-mail: xoxlova@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью применения различных видов коммутаций и принципов построения коммутирующих устройств для осуществления многократного размыкания сильноточных цепей постоянного тока с индуктивной нагрузкой.

Цель работы: обосновать возможность использования предложенной модели размыкателя, выполняющего бездуговую коммутацию цепей постоянного тока с индуктивной нагрузкой.

Методы исследования: математическая модель расчета переходного процесса, позволяющая рассчитать ток в сильноточной цепи с индуктивной нагрузкой по параметрам размыкателя; виртуальное моделирование работы предложенной модели размыкателя.

Результаты: предложена модель размыкателя, способная отключать сильноточную цепь с индуктивной нагрузкой от источника постоянного тока при помощи размыкания слаботочной цепи. В процессе коммутации созданы условия, исключающие возможность появления дуги. Разработана математическая модель расчета тока в цепи нагрузки методом переменных состояния. Проведено математическое и виртуальное исследование работы модели размыкателя с заданными параметрами.

Ключевые слова:

Сильноточные и слаботочные цепи, постоянный ток, ток нагрузки, размыкатель цепей постоянного тока, переходный процесс, метод переменных состояния.

Разнообразие требований, предъявляемых к коммутационной аппаратуре, определяет необходимость исследования и применения различных видов коммутации и принципов построения коммутирующих устройств. Все методы коммутации можно условно разделить на два основных направления: дуговая коммутация, сопровождающаяся возникновением дуги в контактной промежутке с последующим её гашением, и бездуговая коммутация, когда в процессе коммутации созданы условия, исключающие возможность появления дуги. В большинстве случаев коммутация 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 и т. д., что сопровождается возникновением дуги на размыкающих контактах, а также перенапряжением на индуктивности, в 5–7 раз превышающем напряжение источника питания.

Один из способов бездуговой коммутации индуктивной нагрузки основан на увеличении индуктивности насыщенного дросселя при разряде конденсатора и образовании паузы тока, при которой происходит размыкание цепи [1]. Применяется также метод реостатной коммутации, основанный на перетекании тока из одной параллельной ветви в другую, при изменении сопротивления одной из ветвей. Наиболее известные устройства –

это взрывающиеся проводники и фольга. В этом случае изменение сопротивления происходит путем разрушения проводников. Бездуговая реостатная коммутация может быть осуществлена с помощью не разрушаемых термических нелинейных резисторов, изготавливаемых из стальной ленты марки ОЗКП. Сопротивление таких резисторов изменяется в десятки раз при изменении температуры жидкого азота до 700 °С. Известен также способ бездуговой коммутации сильноточных цепей постоянного тока, заключающийся в том, что в момент размыкания силовой цепи через коммутатор пропускается встречный импульс тока от дополнительного источника, причем импульс тока создается путем разряда заряженного конденсатора через двухобмоточный трансформатор [2].

Авторами разработана и исследована работа модели размыкателя сильноточной цепи постоянного тока с внутренней индуктивностью, или с индуктивной нагрузкой, позволяющая осуществлять многократное замыкание и размыкание таких цепей [3]. Схема предложенной модели показана на рис. 1.

Модель содержит:

- сильноточную цепь, состоящую из последовательно подключенных к постоянному источнику ЭДС E активно-индуктивного сопротивления нагрузки R_n , L_n , вторичной обмотки трансформатора тока R_2 , L_2 и коммутатора K_2 . В качестве коммутатора K_2 может быть включен тиристор, отключающий нагрузку от источника

ЭДС E при переходе тока нагрузки через нулевое значение. Параллельно нагрузке подключен вентиль VD , который шунтирует нагрузку при размыкании коммутатора K_1 ;

- слаботочную цепь, состоящую из последовательно подключенных к тому же постоянному источнику ЭДС E первичной обмотки трансформатора тока R_1, L_1 , ограничительного резистора R_3 и коммутатора K_1 .

Обмотки трансформатора тока включены встречно, причем $L_1 \geq L_2$ и $R_1 \geq R_2$, а благодаря ограничительному сопротивлению R_3 ток i_2 , протекающий через нагрузку и вторичную обмотку трансформатора тока, в несколько раз превышает величину тока i_1 , протекающего по первичной обмотке трансформатора тока. Предложенная схема позволяет осуществлять размыкание силовой цепи путем размыкания слаботочной цепи размыкателя.

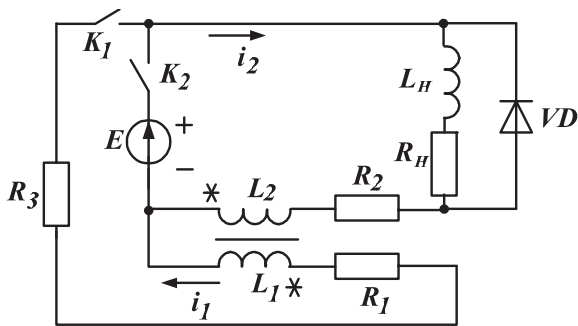


Рис. 1. Схема модели

При замыкании коммутатора K_2 , постоянный источник ЭДС E подключается к нагрузке и по цепи источника ЭДС E – нагрузка R_H, L_H – вторичная обмотка R_2, L_2 трансформатора тока протекает постоянный ток i_2 . Одновременно замыкается коммутатор K_1 , который подключает постоянный источник ЭДС E через резистор R_3 к первичной обмотке трансформатора тока R_1, L_1 , и по первичной обмотке протекает постоянный ток i_1 , имеющий направление встречного включения относительно постоянного тока i_2 вторичной обмотки трансформатора тока, при этом величина тока i_1 , ограниченная резистором R_3 , в несколько раз меньше величины тока вторичной обмотки i_2 .

Для отключения нагрузки R_H, L_H от ЭДС E размыкается коммутатор K_1 и ток i_1 в первичной обмотке трансформатора тока уменьшается до нуля. За счет индуктивной связи M при встречном включении обмоток трансформатора тока во вторичной обмотке трансформатора тока R_2, L_2 ток i_2 переходит через нулевое значение, благодаря чему формируется отрицательный импульс тока, во время которого происходит размыкание коммутатора K_2 , отключающего нагрузку от постоянного источника ЭДС E .

В первый момент времени $t=0_+$ после размыкания коммутатора K_1 энергия, запасенная индуктивностью L_H нагрузки, шунтируется вентилем VD и нагрузка не оказывает влияния на переходный

процесс в остальной цепи. Работа предложенной модели, состоящая из процесса формирования отрицательного импульса тока i_2 силовой цепи и процесса его установления, описывается системой уравнений, составленной по законам Кирхгофа для мгновенных значений [4], где размыкание коммутатора K_1 эквивалентно последовательному включению в соответствующий участок цепи сопротивления R_k , имеющего большое сопротивление. Система уравнений имеет вид:

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

Начальные значения токов:

$$i_1 = E / (R_1 + R_3), \quad i_2 = E / (R_2 + R_H).$$

Взаимная индуктивность $M = K_{cb} \sqrt{L_1 \cdot L_2}$, где K_{cb} – коэффициент связи обмоток, $0 \leq K_{cb} \leq 1$.

Полученную систему дифференциальных уравнений решаем непосредственно при помощи метода переменных состояния, согласно которому в матричной форме дифференциальные уравнения переменных состояния записываются в виде [5]:

$$\left(\frac{dx}{dt} \right) = (A)(x) + (B)(V),$$

где (x) – матрица-столбец переменных состояния; (A) – матрица состояния; (V) – матрица-столбец источников энергии; (B) – матрица коэффициентов при источниках; (dx/dt) – матрица-столбец первых производных по времени от переменных состояния.

Таким образом, получаем:

$$\begin{pmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{L_2 \cdot (R_1 + R_3 + R_k)}{M^2 - L_1 \cdot L_2} & \frac{M \cdot R_2}{M^2 - L_1 \cdot L_2} \\ \frac{M \cdot (R_1 + R_3 + R_k)}{M^2 - L_1 \cdot L_2} & \frac{L_1 \cdot R_2}{M^2 - L_1 \cdot L_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{L_2 + M}{M^2 - L_1 \cdot L_2} \\ -\frac{L_1 + M}{M^2 - L_1 \cdot L_2} \end{pmatrix} E.$$

Аналитическое решение уравнений состояния в общем виде записывается:

$$(x) = (x_{cb}) + (x_{np}),$$

где $(x_{cb}) = (x_0)e^{(A)t}$ – реакция цепи, обусловленная ненулевыми начальными условиями при отсутствии внешнего воздействия; (x_0) – матрица-столбец начальных условий переменных состояния;

$$(x_{np}) = \int_0^t e^{(A)(t-\tau)} (B)(V) d\tau$$
 – реакция цепи от внешних

воздействий при нулевых начальных условиях; $e^{(A)t}$ – матричная экспоненциальная функция, представляющая собой медленно сходящийся ряд. Определение коэффициентов этого ряда – три-

доемкий и громоздкий процесс. Поэтому для решения полученной системы применяем численный метод Рунге–Кутты, основанный на разложении переменных состояния в ряд Тейлора и учете его первых двух членов:

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

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

Методическая погрешность данного алгоритма пропорциональна h^5 , а уменьшение шага приводит к увеличению точности, но с ростом числа шагов погрешность может увеличиваться за счет погрешности округления [6].

На рис. 2 представлены результаты математического моделирования предложенной модели размыкания сильноточной цепи, проведенного в пакете программ MathCad для схемы с параметрами:

$$E = 100 \text{ В}, L_1 = 1 \text{ Гн}, R_1 = 1 \text{ Ом}, R_3 = 4 \text{ Ом},$$

$$R_k = 100 \text{ кОм}, L_2 = 0,01 \text{ Гн}, R_2 = 0,15 \text{ Ом},$$

$$R_n = 0,84 \text{ Ом}, L_n = 5 \text{ Гн}, K_{св} = 0,8.$$

Установившиеся значения токов до размыкания $i_1=20 \text{ А}$, $i_2=100 \text{ А}$.

Дифференциальные уравнения состояния цепи:

$$\begin{pmatrix} di_1/dt \\ di_2/dt \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} -5 \cdot 10^8 & -7,55 \cdot 10^3 \\ -5 \cdot 10^9 & -7,55 \cdot 10^4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 5,5 \cdot 10^4 \\ 5,5 \cdot 10^5 \end{pmatrix} \cdot 100.$$

Матрица-столбец начальных условий:

$$(x_0) = \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix}.$$

По результатам моделирования получили: ток в сильноточной цепи размыкателя практически мгновенно переходит через нулевое значение и его минимальное значение $i_{2\min} = -58 \text{ А}$. В момент времени t_1 ток i_2 вновь переходит через нулевое значение и длительность отрицательной части импульса тока составляет $\Delta t = 5,7 \text{ мс}$. На интервале времени $0 \leq t \leq t_1$ происходит размыкание коммутатора K_2 и отключение нагрузки от источника ЭДС E .

На рис. 3 представлены результаты виртуального моделирования предложенной модели размыкания сильноточной цепи с помощью программы Multisim для схемы с параметрами: ЭДС $E=100 \text{ В}$,

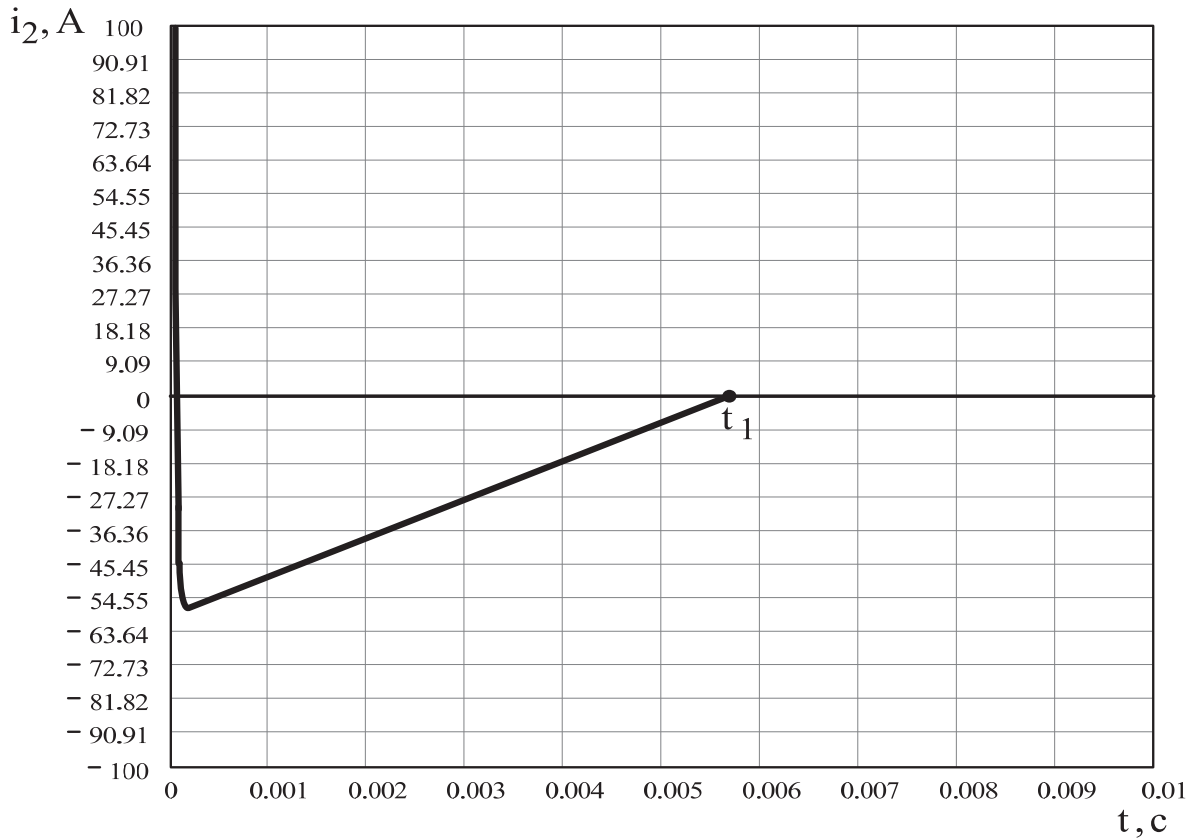


Рис. 2. Ток сильноточной цепи при работе модели размыкателя

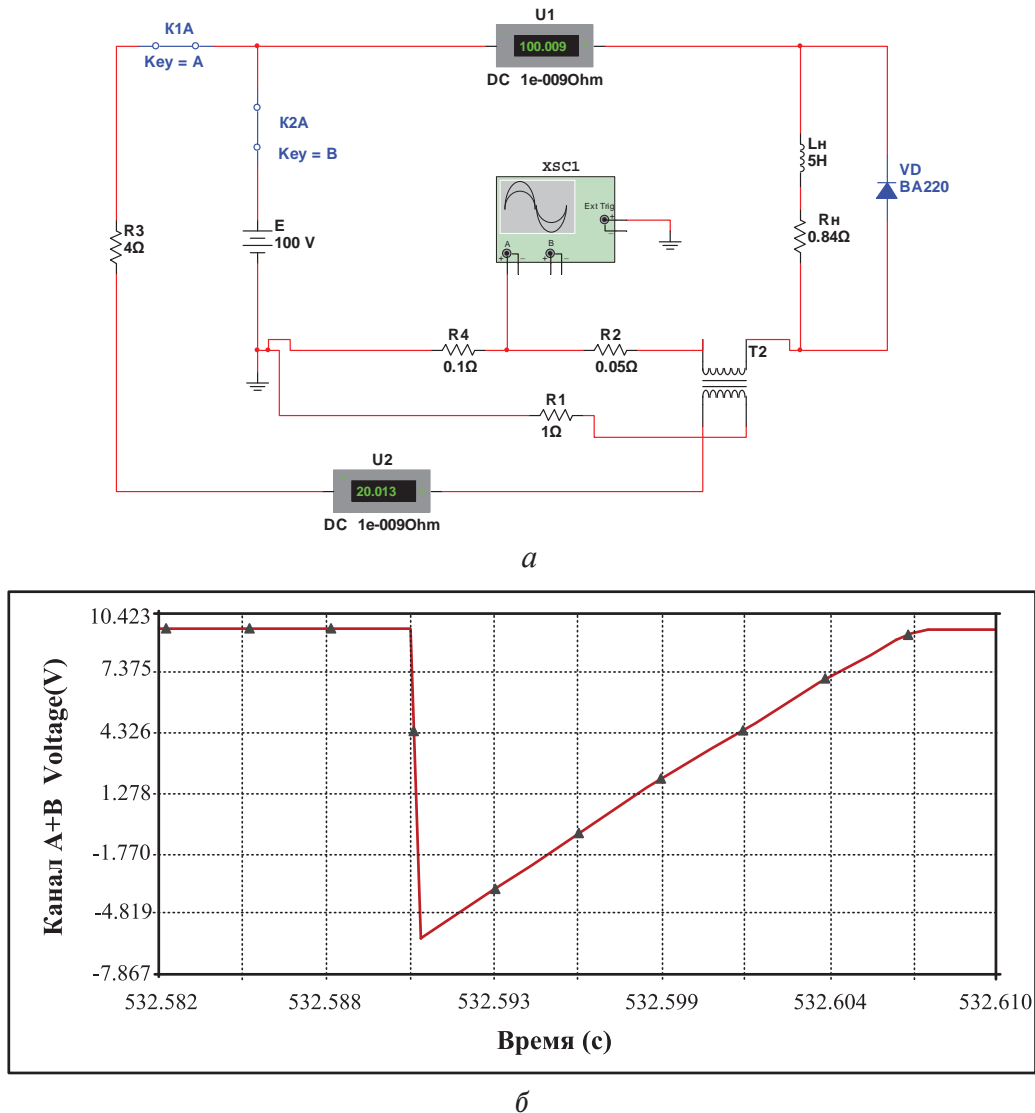


Рис. 3. Виртуальное моделирование: а) схема модели; б) график напряжения на резисторе $R_4=0,1\text{ Ом}$

индуктивность первичной обмотки трансформатора тока $L_1=1\text{ Гн}$, активное сопротивление первичной обмотки $R_1=1\text{ Ом}$, индуктивность вторичной обмотки $L_2=0,01\text{ Гн}$, активное сопротивление вторичной обмотки $R_2=R_{21}+R_{22}=0,15\text{ Ом}$, $K_{cb}=0,8$ сопротивление ограничительного резистора $R_3=4\text{ Ом}$, параметры нагрузки: $R_H=0,84\text{ Ом}$, $L_H=5\text{ Гн}$.

Результаты исследования показали, что ток нагрузки при размыкании коммутатора K_1 переходит через нулевое значение и достигает величины $i_{2\text{min}}=-55,4\text{ А}$, длительность отрицательной части импульса тока составляет $\Delta t=5,4\text{ мс}$ что практически совпадает с результатами расчета.

На рис. 4 представлены результаты виртуального моделирования предложенной модели размыкателя силовоточной цепи с помощью программы Multisim для схемы с тиристором, который включен вместо коммутатора K_2 .

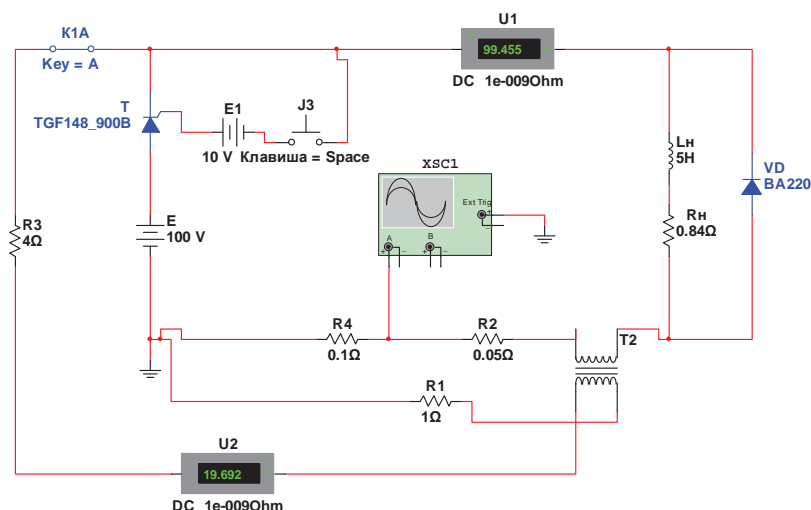
Результаты исследования показали, что ток нагрузки при размыкании коммутатора K_1 переходит через нулевое значение и достигает величины

$i_{1\text{min}}=24,4\text{ А}$, длительность отрицательной части импульса тока составляет $\Delta t=2,6\text{ мс}$, что является достаточным для надежного запирающего силового тиристора. Различие в величине и длительности отрицательной части импульсов тока на рис. 3, б и 4, б объясняется нелинейностью вольтамперной характеристики тиристора.

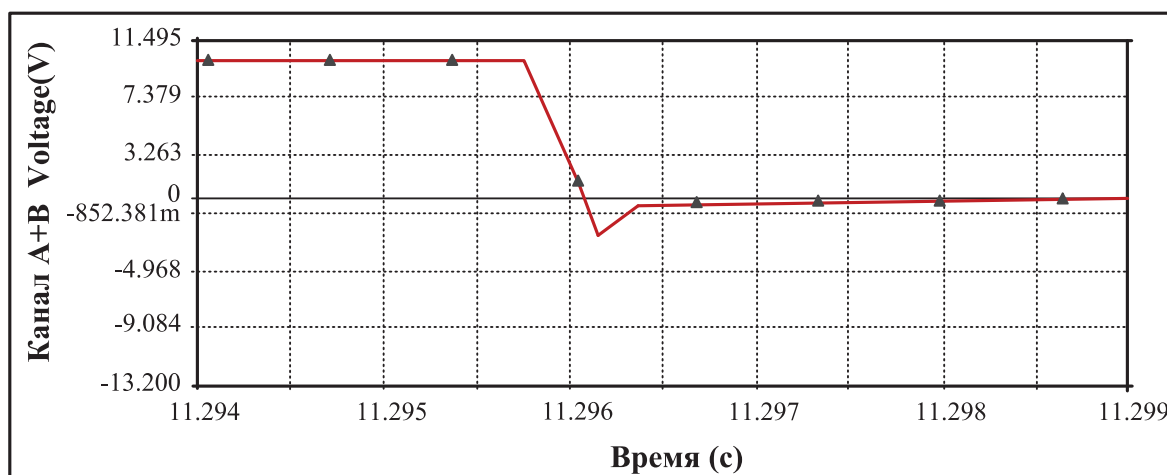
Таким образом, предложенная модель размыкателя силовоточной цепи способна осуществить отключение силовоточной цепи с индуктивной нагрузкой и током $i_2=100\text{ А}$ от источника постоянного тока при помощи размыкания слаботочной цепи, величина тока которой в 5 раз меньше $i_1=20\text{ А}$.

Выводы

1. Разработан размыкатель цепей постоянного тока, способный коммутировать силовоточные цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой путем размыкания слаботочной цепи постоянного тока, величина которого в несколько раз меньше тока нагрузки.



а



б

Рис. 4. Виртуальное моделирование: а) схема модели; б) график напряжения на резисторе $R_4=0,1$ Ом

2. Разработана математическая модель расчета переходного процесса методом переменных состояния, позволяющая рассчитать ток в силовой цепи по параметрам размыкателя.
3. Проведено виртуальное исследование работы модели размыкателя с заданными параметрами, которое подтвердило результаты математического моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пичугина М.Т. Мощная импульсная энергетика. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2005. – 96 с.
2. Способ коммутации в силовых цепях постоянного тока: пат. Рос. Федерация № 2299487; заявл. 22.09.05; опубл. 20.05.07, Бюл. № 14. – 2 с.
3. Бесконтактный размыкатель цепей постоянного тока: пат. Рос. Федерация № 120826; заявл. 23.04.12; опубл. 27.09.2012, Бюл. № 27. – 2 с.
4. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
5. Теоретические основы электротехники: в 3 т. Т. 2 / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. – 576 с.
6. Ортега Дж., Пул У. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений. – М.: Наука, 1986. – 288 с.

Поступила 08.11.2013 г.

UDC 621.314

A BREAKER OF HIGH CURRENT DC CIRCUITS WITH INDUCTIVE LOAD

Sergey V. Pustynnikov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: pustynnikov@list.ru

Tatyana E. Khokhlova,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: xoxlova@tpu.ru

The urgency of the discussed issue is caused by the necessity of applying different types of switching and principles of construction of switching devices, performing multiple tripping in DC circuits with inductive load.

The main aim of the study: *to justify the use of the proposed model contactless switch in DC circuits with inductive load performing arcless switching.*

The methods used in the study: *a mathematical model for calculating the transition process, which allows calculating the current in high-current circuit of the used parameters of contactless switch.*

The results: *the authors introduced the model of contactless switch in DC circuits with inductive load. A mathematical model for calculating the transients by the method of state variables has been developed. It allows calculating the current in the load circuit using parameters of contactless switch. The authors held as well the mathematical and the virtual modeling of operation of the model with the given parameters of contactless switch.*

Key words:

High-voltage and low-voltage current circuit, direct current, load current, DC circuit breaker, transients, state variable method.

REFERENCES

1. Pichugina M.T. *Moshchnaya impulsnaya energetika* [Powerful pulsed power engineering]. Tomsk, TPU Publ. house, 2005. 96 p.
2. Egorov O.G. *Sposob kommutatsii v silnotochnykh tsepyakh postoyannogo toka* [Switching method in high-current DC]. Patent RF, no. 2299487, 2007.
3. Pustynnikov S.V. *Bezkontaktny razmykatel tsepey postoyannogo toka* [The contactless switch in DC circuits]. Patent RF, no. 120826, 2012.
4. Zeveke G.V., Ionkin P.V. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of circuit theory]. Moscow, Energoatomizdat, 1989. 528 p.
5. Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., Checherin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* [Theoretical fundamentals of electrical engineering]. St. Petersburg, Piter, 2003. Vol. 2, 576 p.
6. Ortega Dzh., Pul U. *Vvedenie v chislennye metody resheniya differentsialnykh uravneniy* [Introduction to numerical methods for solving differential equations]. Moscow, Nauka, 1986. 288 p.