

## ОБ ОДНОЙ СХЕМЕ КОММУТАЦИИ ТОКА ПРИ СОЗДАНИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С БОЛЬШОЙ ЭНЕРГИЕЙ

В. В. ИВАШИН, А. И. БЛУДОВ, В. Л. ГРОМОК

Создание мощных магнитных полей в электрофизических установках различного типа, например, в ускорителях элементарных частиц требует мощных коммутационных приборов, обладающих вентильными свойствами. В работах [1, 2, 3] было предложено такие приборы создавать ионно-механического типа. Весьма перспективным является применение в устройствах такого типа индукционно-динамических приводов, которые позволяют создавать быстродействующие контактные аппараты на токи до 100 кА и более при напряжении 10÷15 кВ с временем замыкания и размыкания контактов  $3\div 5 \cdot 10^{-3}$  сек [3]. Конструкция устройства с применением индукционно-динамических приводов получается простой и надежной в работе. Но индукционно-динамические приводы требуют, как правило, сравнительно мощных импульсных источников питания, введение которых в коммутирующее устройство значительно его усложняет.

В настоящей работе рассматривается одна из возможных электрических схем бездугового ионно-механического коммутирующего устройства с индукционно-динамическим приводом контактов. Импульсное питание приводов обеспечивается при этом за счет энергии коммутируемой цепи, что позволяет существенно упростить принципиальную схему устройства в целом, повысить надежность ее работы. Естественно, что использование отдельных вспомогательных элементов не является максимальным и эффективным, но в целом устройство получается наиболее совершенным из известных устройств подобного типа.

### Принцип работы

Принципиальная электрическая схема коммутирующего устройства 1 при питании индуктивной нагрузки 2 от источника энергии 3 приведена на рис. 1. Предположим, что в электромагните  $L_M$  от источника энергии 3, например, от мощной конденсаторной батареи создается магнитное поле большой энергии. Разряд конденсаторной батареи на индуктивность  $L_M$  имеет колебательный характер, и коммутирующее устройство 1 должно обеспечить прохождение в нагрузку  $L_M$  только первой, максимальной по амплитуде, полуволны тока.

Для этого достаточно в необходимый момент времени  $t_0$  открыть вентиль  $B_1$ . Конденсаторная батарея источника энергии 1 начинает разряжаться через вентиль  $B_1$  на индуктивность нагрузки  $L_M$  и парал-

тельную нагрузку цепочку с катушкой  $L_1$  индукционно-динамического привода замыкания контактов  $K$ . При протекании через  $L_1$  тока, величина и форма которого определяется параметрами  $C_1$ ,  $L_6$ ,  $r_1$ , контакты замыкаются, и ток из вентиля  $B_1$  под воздействием падения напряжения на вентиле и на сопротивлении  $r_2$  переходит за время  $t_2-t_3$  в цепь с контактами  $K$ . Дроссель насыщения, индуктивность  $L_3$  которого в насыщенном состоянии невелика, задерживает нарастание тока в контактах при их соприкосновении на время  $t_1-t_2$ . Индуктивность  $L_6$  и емкость  $C_1$  ограничивают напряжение, а также амплитуду и длительность тока, протекающего через привод  $L_1$ , до допустимой и необходимой величины.

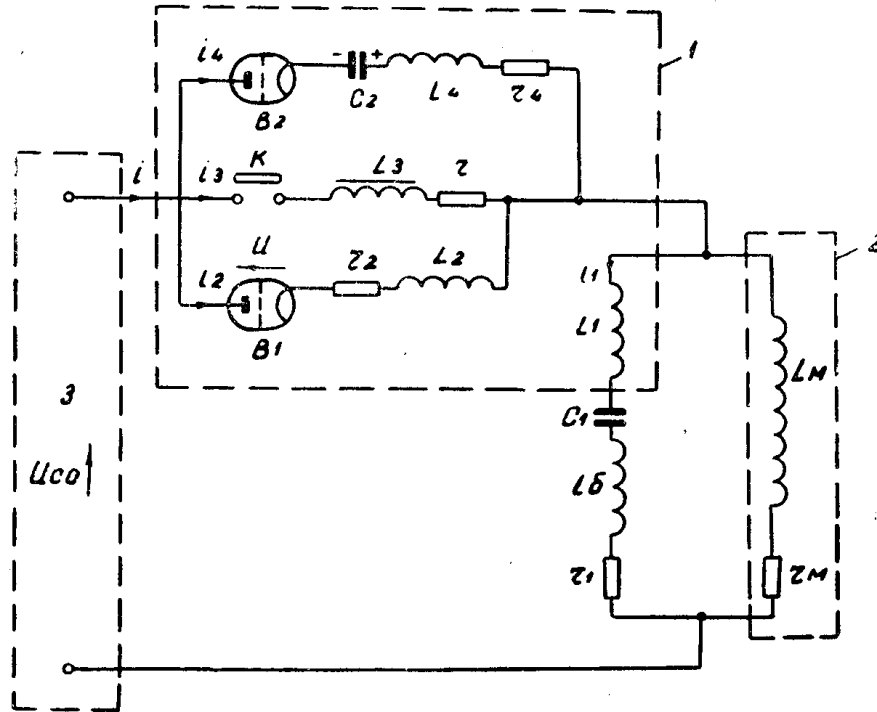


Рис. 1. Схема полностью-механической коммутации больших токов

На рис. 2 показана кривая тока  $i_3$ , коммутируемого контактами  $K$ , кривая тока  $i_2$ , коммутируемого вентилем  $B_1$ , и кривая тока  $i_1$ , проходящего через катушку привода замыкания  $L_1$ .

Процесс отключения начинается в момент  $t_4$  открыванием вентиля  $B_2$  за  $(3 \div 5) \cdot 10^{-3}$  сек до прохождения тока [рис. 2 и 4] нагрузки через нулевое значение. Емкость  $C_2$  при этом разряжается через цепь  $L_3$  — контакты  $K$ , ток в вентиле  $B_2$  быстро нарастает до величины тока в индуктивной нагрузке, а в контактах  $K$  уменьшается до величины тока перемагничивания дросселя насыщения. Дроссель насыщения удерживает ток в контактах на нулевом уровне отрезок времени  $t_5-t_6$  до их размыкания. После изменения на емкости  $C_2$  знака напряжения вентиль открывается от схемы управления и ток из  $B_2$  за время  $t_7-t_8$  переходит в  $B_1$ . За время  $t_4-t_9$ , пока ток проходит через вентиль  $B_2$ , а затем через вентиль  $B_1$ , обесточенные контакты успевают разомкнуться на необходимый зазор, выдерживающий напряжение отключенной цепи.

Катушка  $L_4$  индукционно-динамического привода размыкания контактов включена, как это следует из рис. 2, последовательно с емкостью

$C_2$ , обеспечивающей искусственное обесточивание контактов. При таком включении катушка привода получает необходимое питание от емкости  $C_2$  непосредственно в момент выключения. Это существенно упрощает схему самого коммутирующего устройства и блок управления устрой-

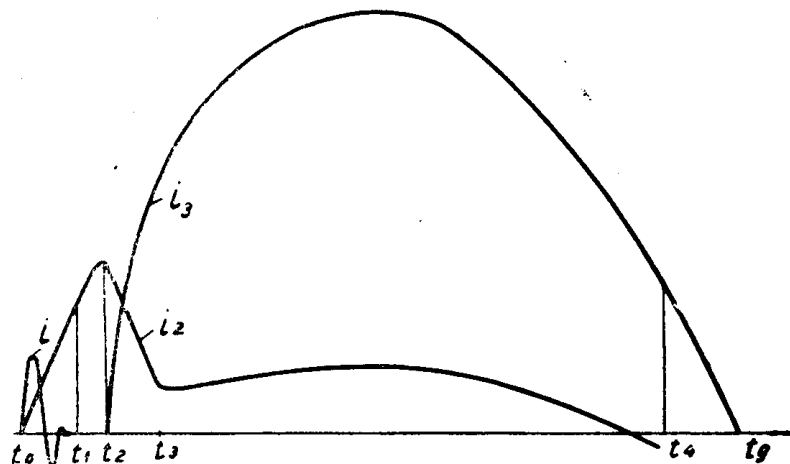


Рис. 2. Токи в цепи при замыкании

ством, поскольку вырабатывать сигнал для управления системой питания привода размыкания не требуется. Вместе с этим введение последовательно с емкостью  $C_2$  катушки привода  $L_1$ , потребляющей много энергии, увеличивает размеры конденсаторной батареи  $C_2$  и, как следствие, увеличивает габариты дросселя насыщения.

#### Выбор параметров элементов, работающих при замыкании контактов

Для нормальной работы устройства при бездуговом замыкании контактов необходимо выполнить два условия:

1. Катушка  $L_1$  привода замыкания должна получить достаточное питание, чтобы обеспечить замыкание контактов за  $(3 \div 5) \cdot 10^{-3}$  сек с момента открытия вентиля  $B_1$ .

2. После замыкания контактов основной ток нагрузки должен протекать не по вентилю  $B_1$ , а через контакты.

Индукционно-динамический привод может быть охарактеризован максимальной намагничивающей силой  $F_{m3}$  катушки  $L_1$ , скоростью нарастания намагничивающей силы  $\frac{dF_{m3}}{dt}$  и магнитной проводимостью  $G$

катушки  $L_1$ . Понятие скорости нарастания намагничивающей силы можно заменить временем нарастания  $t_1$  намагничивающей силы  $F_{m3}$  до номинальной величины. Чтобы обеспечить достаточную изоляцию катушки  $L_1$ , обычно известно максимальное допустимое напряжение  $U_{L_1}$  на катушке привода замыкания.

В общем случае для силы, развиваемой электродинамическим приводом, можно записать [4]:

$$f = i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dM}{dx},$$

где

$i_1$  — ток в катушке привода,

$i_2$  — индуктированный в металлическом диске тока,

$\frac{dM}{dt}$  — производная коэффициента взаимной индуктивности по расстоянию между диском и катушкой.

На рис. 3. показана характерная форма тока через катушку  $L_1$ . На быстрое действие сказывается практически только первый импульс тока, поскольку вторая, отрицательная полуволна имеет существенно меньшую амплитуду, и производная взаимной индуктивности становится во время второй полуволны тока небольшой.

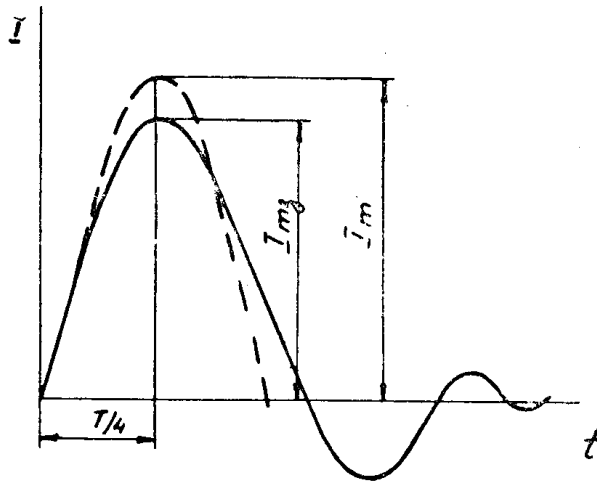


Рис. 3. Импульс тока в катушке привода замыкания

Выведем приближенные зависимости между необходимыми параметрами первого импульса и параметрами цепи  $L_1$ ,  $C_1$ ,  $L_6$ ,  $r_1$ . Для максимального значения напряжения на катушке привода  $L_1$  можно записать

$$U_{L_1} = L_1 \cdot I_m \omega_1, \quad (1)$$

где

$I_m$  — амплитуда тока без учета затухания,

$\omega_1 \approx \frac{\pi}{2t_1}$  — угловая частота без учета затухания,

Затухание в цепи сказывается в основном на амплитуду тока. Учитывая уменьшение тока за счет затухания, для  $L_1$  имеем:

$$L_1 = \frac{U_{L_1} \cdot e^{-bt} \cdot 2t_1}{I_{m3} \cdot \pi}. \quad (2)$$

Выражая амплитудное значение тока  $I_{m3}$  через намагничивающую силу и учитывая, что

$$L_1 = W_1^2 \cdot G, \quad (3)$$

где

$W_1$  — число витков катушки привода замыкания, после преобразований получаем:

$$L_1 = \frac{4t_1^2 \cdot U_{L_1}^2 \cdot e^{-2bt}}{F_{m3}^2 \cdot G \cdot \pi^2}. \quad (4)$$

Если максимальное напряжение на источнике питания  $U^0$ , то

$$L_6 = \frac{L_1 (U_0 - U_{L_1})}{U_{L_1}}, \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{4t_1^2}{\pi^2 (L_6 + L_1)}. \quad (6)$$

Сопротивление  $r_1$  определяется допустимыми перенапряжениями на емкости  $C_1$ . При  $r_1 = 0$  емкость заряжается до двойного напряжения источника питания. В случае критического процесса, когда

$$r_1 = 2 \sqrt{\frac{L_1 + L_6}{C}},$$

емкость заряжается до напряжения источника питания. При критическом режиме сопротивление оказывает на амплитуду тока в цепи сильное влияние, эффективность схемы питания привода существенно уменьшается. Во многих случаях сопротивление  $r_1$  рационально выбрать из условия:

$$e^{-\frac{r_1}{2(L_6 + L_1)} \cdot t_1} \approx 0,5,$$

что приводит к небольшим, до 20%, перенапряжениям на емкости, а работа схемы получается достаточно эффективной.

### Расчет токов и напряжений в цепи при замыкании

После приближенного определения всех параметров по точным формулам можно построить кривые тока в катушке привода и напряжения на емкости  $C_1$  при замыкании схемы.

$$i = \frac{U_{c0}}{\omega_0 L} \cdot e^{-bt} \sin \omega_0 t, \quad (7)$$

$$U_{c_1} = -U_{c0} + U_{c0} e^{-bt} \left( \cos \omega_0 t + \frac{b}{\omega_0} \cdot \sin \omega_0 t \right), \quad (8)$$

где

$U_{c0}$  — напряжение на заряженной емкости,  
 $\omega_0$  — угловая частота контура включения,  
 $b$  — его постоянная времени.

В конце основного импульса, когда ток в вентиле  $B_1$  и, следовательно, в нагрузке достигает нуля, емкость  $C_1$  оказывается заряженной до напряжения перезаряда емкости  $C$  —  $U_{ст}$ . При запираании вентиля  $B_1$  при  $t_9$  емкость  $C_1$  начинает разряжаться по контуру  $L_1$ — $C_1$ — $L_6$ — $r_1$ — $L_M$ . В катушке привода замыкания  $L_1$  возникает импульс тока, описываемый уравнением:

$$i = \frac{U_{ст}}{\omega'_0 L_{эКВ}} \cdot e^{-b't} \sin \omega_0 t, \quad (9)$$

где

$$L_{эКВ} = L_1 + L_6 + L_M,$$

$$b' = \frac{r_1}{2L_{эКВ}}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{эКВ} C_1} - (b')^2}.$$

Этот ток аналогично току в начале импульса приводит к возникновению электро-динамических сил в приводе замыкания.

Величина тока в катушке при этом существенно уменьшается, поскольку в цепь разряда оказывается включенной значительная индуктивность  $L_M$ . Сила, возникающая в приводе, при протекании тока разряда емкости  $C_2$  должна быть недостаточна для осуществления замыкания контактов  $K$ .

В момент  $t_2$  начинается перехват тока из цепи с вентилем  $B_1$  в цепь с контактами. Решение операторным методом уравнения напряжений для контура с контактами и вентилем  $B_1$  дает следующее приближенное уравнение для тока в вентиле  $B_1$ :

$$i_2 = \frac{\lambda_1}{\delta} (1 - e^{-\delta t}) + \frac{\lambda_2}{\omega} \sin \omega t + \frac{\lambda_3}{\omega^2} (1 - \cos \omega t) +$$

$$+ I_2 e^{-\delta t} + \frac{a_3}{\delta} (1 - e^{-\delta t}), \quad (10)$$

где

$$\lambda_1 = \frac{a_1 \cos \psi + a_2 \sin \psi}{1 + \frac{\omega^2}{\delta^2}} - \frac{\omega \delta (a_2 \cos \psi - a_1 \sin \psi)}{\omega^2 + \delta^2};$$

$$\lambda_2 = \left( \frac{a_1 \cos \psi + a_2 \sin \psi}{1 + \frac{\omega^2}{\delta^2}} \right) \frac{\omega^2}{\delta^2} + \frac{\omega \delta (a_2 \cos \psi - a_1 \sin \psi)}{\omega^2 + \delta^2};$$

$$\lambda_3 = - \left( \frac{a_1 \cos \psi + a_2 \sin \psi}{1 + \frac{\omega^2}{\delta^2}} \right) \frac{\omega^2}{\delta^2} + \frac{\omega^3 (a_2 \cos \psi - a_1 \sin \psi)}{\omega^2 + \delta^2};$$

$$a_1 = \frac{\omega L_3 I_m}{L_3 + L_2}; \quad a_2 = \frac{I_m r_3}{L_3 + L_2}; \quad a_3 = - \frac{U}{L_3 + L_2};$$

$$\delta = \frac{r_3 + r_2}{L_3 + L_2};$$

$\psi$  — угол сдвига основного тока относительно тока в вентиле,

$$\psi = \arcsin \frac{I_2}{I_m};$$

$I_m$  — максимальный коммутируемый ток;

$U$  — напряжение горения вентиля.

Сопротивление  $r_2$ , от величины напряжений на котором зависит время перемагничивания дросселя  $D$ , не должно быть очень малым, чтобы напряжение на нем было достаточно для перемагничивания дросселя за время не менее 1 мксек.

Ток в контактах:

$$i_3 = i - i_2 = I_m \sin(\omega t + \psi) - i_2. \quad (11)$$

На рис. 2 показан вид кривой тока  $i_2$ , характерный для реальных параметров коммутируемых цепей.

### Выбор параметров и расчет токов и напряжений при размыкании контактов

Индуктивность катушки размыкания  $L_4$  выбирается исходя из необходимого быстродействия аппарата, заданного значением максимальной намагничивающей силы с учетом величины тока в контактах при  $t_4$ .

Емкость  $C_2$  должна быть достаточно большой, чтобы амплитуда разрядного тока была не меньше выключаемого тока, и был возможен полный перехват тока в коммутирующую емкость  $C_2$ .

Ток и напряжение в емкости  $C_2$  при перехвате тока из контактов в емкость описываются синусоидальными затухающими функциями:

$$i_4 = \frac{U_{c2m}}{\omega'_\kappa L_\kappa} e^{-b_\kappa t} \sin \omega'_\kappa t; \quad (12)$$

$$U_{c2} = - U_{c2m} e^{-b_\kappa t} \sin(\omega'_\kappa t + \psi_\kappa), \quad (13)$$

где

$U_{c2m}$  — напряжение на емкости  $C_2$  в начальный момент размыкания;

$$\omega'_\kappa = \sqrt{\frac{1}{L_\kappa \cdot C_2} - b_\kappa^2}; \quad L_\kappa = L_4 + L_3;$$

$$b_{\kappa} = \frac{r_4 + r_3}{2L_{\kappa}}; \quad \psi_{\kappa} = \arctg \frac{\omega_{\kappa}}{b_{\kappa}}.$$

Ток в контактах в это время убывает по формуле

$$i_3 \approx I_4 - \kappa t - i_4, \quad (14)$$

где

$I_4 - \kappa t = i_4 + i_3 = i$  — ток в главном контуре,

$K$  — производная тока при  $t = t_4$ ,

$$K = \frac{di}{dt} = \frac{U}{L}.$$

Ток в емкости  $C_2$  при перехвате его из емкости в вентиль  $B_1$  ( $t_7 - t_8$ ) определяется по

$$i_4 = \frac{I_4 L_4 + L_2 \cdot I_7}{L_4 + L_2} \cdot e^{-bt} \left( \cos \omega_0 t - \frac{b}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) + \frac{I_7 r_2 - L_2 K - U_{c0}}{(L_4 + L_2) \omega_0} e^{-bt} \sin \omega_0 t, \quad (15)$$

где

$U_{c0}$  — напряжение на емкости  $C_2$  в момент  $t_7$ . Для тока в вентиле  $B_1$  запишем:  $i_2 = i - i_4 \approx I_7 - \kappa t - i_4$ . Ток в емкости  $C_2$  между перехватами ( $t_5 - t_7$ ) определяется, как

$$i_4 \approx I_5 - \kappa t. \quad (16)$$

Напряжение на емкости на этом промежутке времени

$$U_{c2} = \frac{1}{C_2} \int i_4 dt = \frac{I_5 \cdot t}{C_2} - \frac{\kappa t^2}{2C_2} + U_5. \quad (17)$$

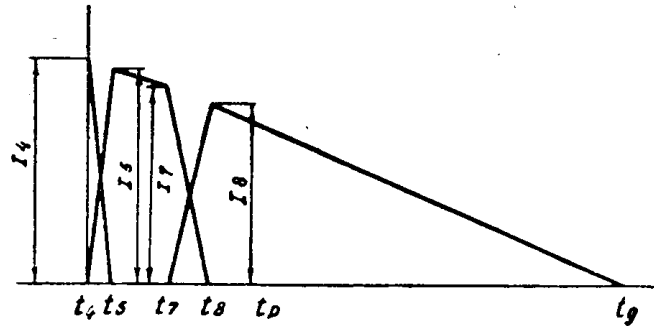


Рис. 4. Токи в цепи при размыкании.

А на дросселе или на вентиле:

$$U_{\Delta} = U_{B1} = U_{c2} + L_4 \frac{di_4}{dt} + i_4 r_4 = \frac{I_5 \cdot t}{C_2} - \frac{K t^2}{2 C_2} + U_5 - L_4 K + (I_5 - \kappa t) r_4. \quad (18)$$

Весь процесс отключения показан на рис. 4.

По формулам 17 и 18 можно определить по заданным параметрам напряжение на дросселе с начала движения контактов  $t_3$  до полного их размыкания  $t_p$ , которое в свою очередь определит необходимое потякосцепление дросселя, обеспечивающее перемагничивание дросселя за нужный промежуток времени, не менее 1 *мксек*.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Ивашин, Г. А. Сипайлов. Бездуговое отключение больших токов. Электротехника, № 9, 1964.
  2. В. В. Ивашин. Авторское свидетельство № 155206.
  3. В. В. Ивашин, А. И. Блудов. Новый мощный коммутирующий прибор. Труды VI Межвузовской конференции по электронным ускорителям, 1966.
  4. В. Н. Бондалетов. Метод расчета электромагнитных сил и работа их при произвольном изменении потякосцеплений, токов, собственных и взаимных индуктивностей. ТВН, Труды МЭИ, в. LXIV, 1965.
-