

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.

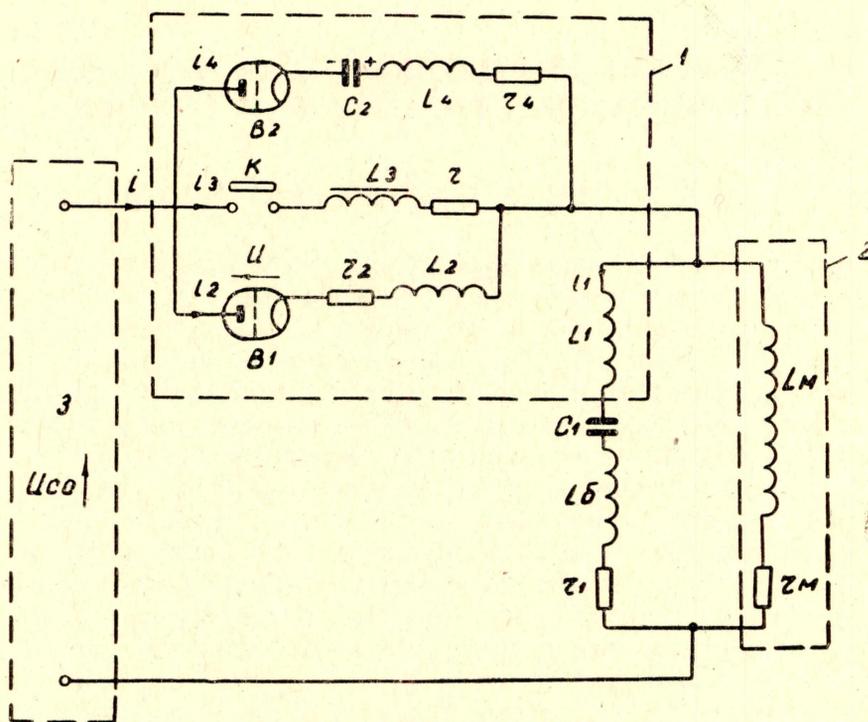


Рис. 1. Схема ионно-механической коммутации больших токов

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 открывает 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-

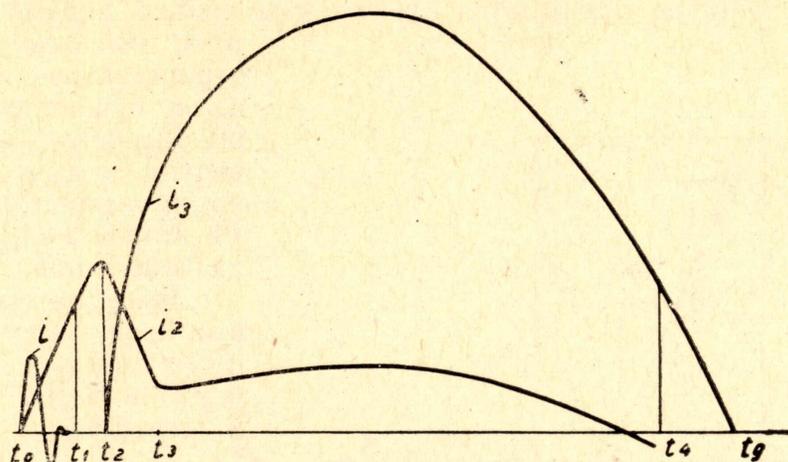


Рис. 2. Токи в цепи при замыкании

ством, поскольку вырабатывать сигнал для управления системой питания привода размыкания не требуется. Вместе с этим введение последовательно с емкостью C_2 катушки привода L_4 , 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 взаимоиנדуктивности по расстоянию между диском и катушкой.

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

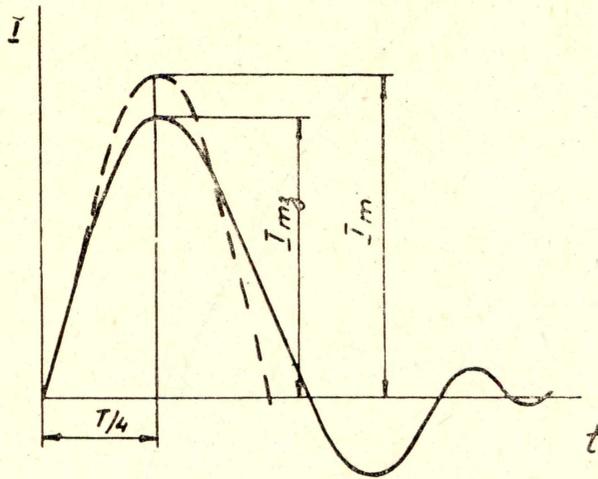


Рис. 3. Импульс тока в катушке привода замыкания

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 выбирать 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,
 ω_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

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

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

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

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

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

ψ — 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 напряжения 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:

$$i_4 = \frac{U_{c2m}}{\omega'_k L_k} e^{-b_k t} \sin \omega'_k t; \quad (12)$$

$$U_{c2} = - U_{c2m} e^{-b_k t} \sin(\omega'_k t + \psi_k), \quad (13)$$

где

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

$$\omega'_k = \sqrt{\frac{1}{L_k \cdot C_2} - b_k^2}; \quad L_k = L_4 + L_3;$$

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

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

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

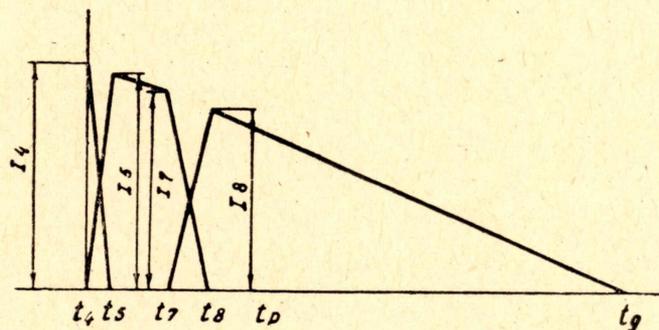


Рис. 4. Токи в цепи при размыкании.

А на дросселе или на вентиле:

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

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 потокосцепление 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 потокосцеплений, токов, собственных и взаимных индуктивностей. ТВН, Труды МЭИ, в. LXIV, 1965.
-