



Ордена Ленина и ордена Октябрьской революции

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

808301056

И.А. Иванов, А.П. Лотоцкий

ИАЭ-3498/14

ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ  
ПРИ ТРЕХСТУПЕНЧАТОМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИИ ТОКА  
ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ  
В КАТУШКУ С ЛАЙНЕРОМ

Москва 1981

**Ключевые слова:** индуктивный накопитель, катушка, лайнер, коммутаторы, переключение, энергия, потери.

Оцениваются потери энергии при трехступенчатом переключении тока индуктивного накопителя в катушку с лайнером. Показано, что для систем с умножением тока или подключением катушки через трансформатор, потери энергии в разъединителях и размыкателях (коммутаторы первой и второй ступени) могут составлять не более половины энергии взрыва обстрелителя, если его вещество испаряется полностью.

## I. Введение.

Для импульсных энергосистем с индуктивным накопителем разработаны и находят разнообразное применение двухступенчатые переключатели тока, состоящие из быстродействующего размыкателя и обострителя с взрывающимися фольгами или проволочками [1,2]. В ряде случаев целесообразно выводить энергию из индуктивного накопителя с помощью трехступенчатой коммутации.

При современном состоянии техники зарядных устройств, индуктивных накопителей и разрывных коммутаторов наиболее эффективным средством повышения мощности разрядного импульса является секционирование обмотки с последующим переключением секций из последовательного соединения в параллельное [3,4] или с подключением нагрузок к выводам секций [5]. Чтобы режим зарядки не изменялся, с ростом числа разрывов должно снижаться электрическое сопротивление модульного коммутатора в замкнутом состоянии. В простых конструкциях контактных соединений, не требующих выполнения сложных технологических операций при снаряжении, для снижения электрического сопротивления увеличивают поверхность соприкосновения контактов и повышают сжимающее их давление. Механически контактное соединение становится более прочным и для его быстрого разрыва требуется увеличить энергию и мощность привода. Каждый из этих параметров ограничен сверху: вряд ли целесообразно, чтобы энергия привода оказалась сравнимой с энергией секции индуктивного накопителя, а мощность существенно превышала разрывную мощность коммутатора. Даже если это положение не считать определяющим, есть и другая причина ограничения энергии и мощности привода: из-за неизбежного увеличения габаритов изделий возникают трудности с их размещением в промежутках между выводами соседних секций.

При трехступенчатом переключении используется еще один коммутатор (его обычно называют разъединителем) с контактным соединением, соответствующим выбранному разрядному режиму.

Ток разъединителя переключается не в обостритель, а в более низкоомную цепь замкнутого размыкателя. Из-за более низкого напряжения переключения промежуток разрыва у разъединителя короче, чем в размыкателе. Однако до уровня максимального напряжения разрядного импульса электрическая прочность более короткого промежутка восстанавливается медленнее. Поэтому не требуется, чтобы быстродействие разъединителя и размыкателя было одинаковым. Время срабатывания разъединителя, малое по сравнению с временем зарядки, может быть, тем не менее, значительно больше, чем у размыкателя.

Пусть  $\tau$  обозначает время переключения, а  $\delta$  - длину промежутка. При разрыве промежутка контактный элемент должен переместиться на расстояние, сравнимое с  $\delta$  (рис.1). Если его масса  $\sim \delta$ , то энергия привода  $\sim \delta^3/\tau^2$ , а мощность  $\sim \delta^3/\tau^3$ . Параметры привода определяются не только требованиями к скорости разрыва контактного соединения, но и условиями достаточно быстрого угасания дуги. Переключение тока сопровождается рассеянием энергии в дуговом канале. Эта энергия должна уноситься потоком дугогасящей среды (обычно конденсированной). Скорость потока  $v \sim \delta/\tau$ , переносимая им мощность пропорциональна  $\delta v^3 \sim \delta^4/\tau^3$ , а энергия  $\sim \delta^4/\tau^2$ . Таким образом, уменьшение  $\delta$  и увеличение  $\tau$  позволяет существенно снизить параметры привода разъединителя.

Для размыкателя  $\delta$  и  $\tau$  заданы режимом переключения тока в обостритель, параметры которого в свою очередь определяются разрядным импульсом индуктивного накопителя. Однако в трехступенчатом коммутаторе по сравнению с двухступенчатым, во-первых, сокращается длительность протекания тока через размыкатель, и, во-вторых, сопротивление его контактного соединения увеличивается пропорционально отношению мощности переключения первой ступени коммутации к мощности зарядного устройства. Поэтому в размыкателе трехступенчатого коммутатора контактное соединение может быть легким и менее прочным. Появляется возможность снизить и его энергию привода за

счет той ее части, которая затрачивается на разрыв и перемещение контактного соединения.

Еще одно преимущество систем с трехступенчатой коммутацией заключается в возможности использования разрядных схем с предварительным умножением тока (после срабатывания коммутаторов первой ступени). Это позволяет сократить количество наиболее сложных элементов схемы, к которым относятся быстрореагирующие размыкатели.

При ступенчатом переключении тока следует учитывать потери энергии индуктивного накопителя и на предварительных стадиях коммутации. Кроме того, от этих потерь зависят и параметры конструкции (в частности параметры привода).

## 2. Потери энергии при переключении тока разъединителем.

На схеме рис. 2 с трехступенчатым переключением  $L$  обозначает индуктивность накопителя,  $R_1, R_2, R_3$  - активные сопротивления коммутаторов соответственно первой ступени (разъединитель), второй (размыкатель) и третьей (обостритель - взрывающаяся фольга или волнистый кнут),  $L_{11}, L_{22}, L_{33}$  - их собственные индуктивности,  $L_{12}, L_{23}$  - индуктивности соединяющих их цепей (активные сопротивления этих цепей считаются пренебрежимо малыми). При рассмотрении переключения тока из разъединителя в размыкатель пренебрегается изменением  $R_2$  и индуктивным влиянием  $R_3$ , начальное значение которого должно значительно превышать  $R_2$ . С учетом сделанных замечаний имеем систему уравнений

$$(1 + \lambda_1)\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \chi_1(t)I_1 = 0, \quad (1)$$

$$\dot{I}_1 + (1 + \lambda_2)\dot{I}_2 + \chi_2 I_2 = 0. \quad (2)$$

Здесь  $I_1$  - ток через разъединитель,  $I_2$  - ток размыкателя,

$$\lambda_1 = L_{11}/L, \lambda_2 = (L_{12} + L_{22})/L, \chi_1(t) = R_1(t)/L, \chi_2 = R_2/L. \quad (3)$$

Если индуктивный накопитель заряжается генератором с индуктивностью, то коммутация должна начинаться в момент, когда зарядный ток

достигает максимального значения  $I_0$ . Поэтому начальные условия задаются в виде

$$I_1(0) + I_2(0) = I_0, \quad (4)$$

$$\dot{I}_1(0) + \dot{I}_2(0) = 0. \quad (5)$$

Из (1), (2) и (5) следует, что

$$\chi_1(0) I_1(0) + (\lambda_1/\lambda_2) \chi_2 I_2(0) = 0.$$

Это соотношение совместно с (4) позволяет найти начальные значения токов

$$I_1(0) = I_0 \left\{ 1 - (\lambda_2/\lambda_1) [\chi_1(0)/\chi_2] \right\}, \quad I_2(0) = I_0 \left\{ 1 - (\lambda_1/\lambda_2) [\chi_2/\chi_1(0)] \right\}.$$

Применение разъемника оправдано, если  $I_2(0) \ll I_1(0)$ . Для этого необходимо, чтобы параметры цепи удовлетворяли условию

$$\chi_1(0)/\chi_2 \ll \lambda_1/\lambda_2.$$

Тогда можно положить

$$I_1(0) \cong I_0, \quad I_2(0) \cong 0. \quad (6)$$

Пусть  $\tau_1$  обозначает время срабатывания разъемника. Считается, что к моменту  $\tau_1$  ток в разъемнике прерывается полностью:

$$I_1(\tau_1) = 0. \quad (7)$$

Потери энергии при переключении тока в разъемник складываются из энергии

$$\Delta W_1(\tau_1) = \int_0^{\tau_1} I_1^2(t) R_1(t) dt,$$

рассеиваемой разъемником, и энергии

$$\Delta W_2(\tau_1) = R_2 \int_0^{\tau_1} I_2^2(t) dt,$$

которая выделяется на сопротивлении разъемника.

Умножим (1), исключив  $\dot{I}_2$  с помощью (2), на  $I_1$  и проинтегрируем от 0 до  $\tau_1$ . С учетом (3), (6) и (7) получим:

$$(1 + \lambda_2) \Delta W_1(\tau_1) = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_2) W_0 + R_2 \int_0^{\tau_1} I_1(t) I_2(t) dt,$$

где  $W_0 = LI_0^2/2$  - начальная энергия индуктивного накопителя.  
 Относительные потери  $\Delta W_1(\tau_1)/W_0 \ll 1$ , если  $\lambda_1, \lambda_2, \gamma_2 \tau_1 \ll 1$

Для этого случая

$$\Delta W_1(\tau_1) = (\lambda_1 + \lambda_2)W_0 + R_2 \int_0^{\tau_1} I_1(t) I_2(t) dt. \quad (8)$$

Вводи обозначения  $x = t/\tau_1$ ,  $y = I_1/I_0$ , оценим величину интеграла с помощью неравенства

$$\int_0^{\tau_1} I_1(t) I_2(t) dt \leq I_0^2 \tau_1 \int_0^1 y_1(1-y_1) dx. \quad (9)$$

Формально максимум функционала

$$F = \int_0^1 y_1(1-y_1) dx$$

при  $y_1(0) = 1$  и  $y_1(1) = 0$  реализует  $y_1 = 1/2$  внутри промежутка интегрирования со скачком на  $\pm 1/2$  в точках  $x = 0$  и  $x = 1$ .

Этот максимум равен  $1/4$ . В реальных системах переключаемый ток изменяется без резких изломов, чередуясь с горизонтальными участками. Обычно ток в размыкателе нарастает по закону, близкому к линейному, для которого  $F = 1/6$ . Если положить  $F = 1/6$ , то из (8) и (9) следует, что

$$\Delta W_1(\tau_1) \leq (\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_2 \tau_1/3) W_0.$$

Вторая складывающаяся потеря

$$\Delta W_2(\tau_1) \leq 2W_0 \gamma_2 \tau_1 \int_0^1 (1-y_1)^2 dx. \quad (10)$$

При линейном росте тока  $I_2$

$$\Delta W_2(\tau_1) \leq (2/3) \gamma_2 \tau_1 W_0,$$

а полные потери

$$\Delta W(\tau_1) = \Delta W_1(\tau_1) + \Delta W_2(\tau_1) \leq (\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_2 \tau_1) W_0.$$

В соответствии с (8), (9) и (10) для фронта тока  $I_2$  произвольной формы

$$\Delta W(\tau_1)/W_0 \leq \lambda_1 + \lambda_2 + 2\gamma_2 \tau_1 \int_0^1 (1-y_1) dx. \quad (11)$$

В одном предельном случае, когда  $\lambda_1 + \lambda_2 \gg \gamma_2 \tau_1$ ,  $\Delta W_2(\tau_1) \ll \Delta W_1(\tau_1)$  и  $\Delta W(\tau_1) = \Delta W_1(\tau_1) = (\lambda_1 + \lambda_2) W_0$ .

В противоположном случае с  $\lambda_1 + \lambda_2 \ll \gamma_2 \tau_1$ ,  $\Delta W(\tau_1)/W_0 = 2\gamma_2 \tau_1 \int_0^1 (1-y) dx$ ,

а отношение  $\Delta W_1(\tau_1)/\Delta W_2(\tau_1)$  зависит от формы фронта тока.

При фронтах, близких по форме к линейным,  $\Delta W_1(\tau_1) = \Delta W_2(\tau_1)$ . Если к оси  $x$  кривая  $y(x)$  выпукла, то  $\Delta W_1(\tau_1) < \Delta W_2(\tau_1)$ , если вогнута, то наоборот,  $\Delta W_1(\tau_1) > \Delta W_2(\tau_1)$ .

В тех случаях, когда после переключения тока в разряднике для полного восстановления электрической прочности разрядника требуется промежуток времени  $\Delta \tau_1$ , энергия, рассеиваемая разрядником, возрастает на величину  $2\gamma_2 \Delta \tau_1 W_0$ . Эта поправка существенна, если  $\Delta \tau_1/\tau_1 \sim 1$ .

Сравним  $\Delta W(\tau_1)$  с потерями в обмотке  $\Delta Q(\tau_1)$ . Для простоты предположим, что плотность тока имеет единственную компоненту, зависящую только от одной координаты. Пусть к началу переключения тока в разрядник эффективная толщина слоя с плотностью тока  $j$  равна  $\delta_0$ . Снаружи обмотки магнитное поле  $B \sim j\delta_0$ . Изменение внешнего поля  $\Delta B(\tau)$  из-за снижения тока на величину  $\Delta I(\tau)$  при  $\tau \ll \tau_0$  проникает на глубину  $\delta \ll \delta_0$ , где плотность текущего магнетрона  $j$  вихревого тока  $g \sim \Delta B/\delta$ . В обратном направлении (вдоль  $j$ ) вихревой ток растекается с плотностью  $\sim g\delta/(\delta_0 - \delta)$ . Мощность тепловых потерь в обмотке пропорциональна величине

$$[j + g\delta/(\delta_0 - \delta)]^2 (\delta_0 - \delta) + (j - g)\delta = j^2 \delta_0 \left\{ 1 + (\Delta B/B)^2 (\delta_0/\delta) [\delta_0/(\delta_0 - \delta)] \right\}.$$

Поскольку  $\delta_0$  не может быть больше толщины слоя для времени зарядки  $\tau_0$ ,  $\delta_0/\delta \tau(\tau_0/\tau_1)^{1/2}$ . Предположим, что  $(\tau_0/\tau_1)^{1/2} \ll 1$ , при  $\Delta B(\tau_1)/B_0 = \Delta I(\tau_1)/I_0 = \Delta W(\tau_1)/2W_0 \ll 1$  получаем:

$$\Delta Q(\tau_1) = P_0 \tau_0 \left[ 1 + (\Delta W(\tau_1)/2W_0)^2 (\tau_0/\tau_1)^{1/2} \right]. \quad (12)$$

Здесь  $P_0$  обозначает мощность, рассеиваемую током  $I_0$  с плотностью  $j_0 \sim I_0/\sigma_0$  в момент окончания зарядки. По определению  $P_0 \sim j_0^2 \sigma_0^2$ .

Из (12) следует, что в тех случаях, когда второй член внутри квадратички свободок мал по сравнению с  $f$ ,  $\Delta Q(\tau_1) \approx P_0 \tau_1$ , а отношение  $\Delta Q(\tau_1)/\Delta W(\tau_1) \ll 1$ , если мощность  $P_0$  мала по сравнению с мощностью переключения тока в знаменателе, которая оценивается величиной  $\sim \Delta W(\tau_1)/\tau_1$ .

Пусть  $(\Delta W(\tau_1)/2W_0)^2 (\tau_0/\tau_1)^{1/2} \gg 1$ . Тогда в соответствии с (12)

$$\Delta Q(\tau_1) \approx (P_0 \tau_0/W_0) (\Delta W(\tau_1)/2W_0) (\tau_1/\tau_0)^{1/2} \Delta W(\tau_1).$$

При этом, поскольку  $P_0 \tau_0 < W_0$ ,  $\Delta Q(\tau_1)/\Delta W(\tau_1) \ll 1$ .

Таким образом, потери в обмотке можно пренебречь, если  $\Delta W(\tau_1) \ll W_0$  и  $P_0 \ll \Delta W(\tau_1)/\tau_1$ . В реальных системах оба эти условия всегда выполняются. Можно считать поэтому, что на стадии переключения тока размыкателем основной вклад в потери энергии вносит величина  $\Delta W(\tau_1)$ , определяемая с помощью (11).

### 3. Потери энергии при переключении тока размыкателем.

Выражение для потерь энергии в размыкателе при переключении тока в обесточитель по аналогии с (8) можно представить в виде

$$\Delta W_2(\tau_2) = [\lambda_3 + 2 \int_0^{\tau_2} \gamma_3(t) y_2(t) y_3(t) dt] W_0,$$

где  $\lambda_3 = (L_{22} + L_{23} + L_{33})/L$ ,  $\gamma_3 = R_3(t)/L$ ,  $y_2 = I_2/I_0$ ,  $y_3 = I_3/I_0$ ,  $\tau_2$  - время срабатывания размыкателя (отсчет времени ведется от момента  $\tau_1 + \Delta \tau_1$ ),  $I_2(\tau_2) = 0$ . Полные потери в коммутаторах

$$\begin{aligned} \Delta W(\tau_2) &= \Delta W_2(\tau_2) + \Delta W_3(\tau_2) = [\lambda_3 + 2 \int_0^{\tau_2} \gamma_3 y_2 (y_2 + y_3) dt] W_0 \approx \\ &\approx (\lambda_3 + \int_0^{\tau_2} \gamma_3 y_3 dt) W_0. \end{aligned}$$

Предполагается, что  $\Delta W(\tau_2)/W_0 \ll 1$ , и поэтому можно пренебречь различием между  $W_0$  и  $W_0 - \Delta W(\tau_2)$ , а также изменением полного тока, полагая

$$I_2(t) + I_3(t) = I_0. \quad (13)$$

Если при переключении тока в катушку с дийлером ее начальная на-

дуктивность  $L_0$  изменяется незначительно (время переключения мало по сравнению с временем разгона) и  $\lambda_0 = L_0/L \ll 1$ , то обостритель рассеивает энергию  $\sim \lambda_0 W_0$ . В режимах с электрическим взрывом фольги или проволок обострителя  $\lambda_0 W_0$  порядка их энергии испарения. Известно, что для большинства металлов теплосодержание при температуре кипения составляет около 1/5 теплоты испарения. При

$$\lambda_3 \ll \Delta W_3(\tau_2)/W_0 < \lambda_0/5 \quad (14)$$

влиянием индуктивностей  $L_{21}$ ,  $L_{23}$  и  $L_{33}$  можно пренебречь и считать, что вплоть до момента  $\tau_2$  сопротивление обострителя (однородного по длине и сечению) растет пропорционально его теплосодержанию [6]. Для этого случая схема переключения приведена на рис.3. ( $R(t)$  - сопротивление размыкателя,  $r(t)$  - обострителя). В начальный момент  $t=0$

$$R_0 = R(0) \ll r(0) = r_0. \quad (15)$$

При линейной зависимости  $\Gamma$  от теплосодержания  $q$  и выполнении условия (13), (14)

$$\dot{r} = \gamma_r r (I_r/I_0)^2. \quad (16)$$

Здесь  $\gamma_r = r_0 I_0^2 / q_0$ , а  $q_0$  определяется с помощью соотношения

$$r_s = r_0 (1 + q_s/q_0)$$

где  $r_s$ ,  $q_s$  - значения  $\Gamma$  и  $q$  при нагреве до температуры кипения. Отсюда

$$\gamma_r = (r_s - r_0) I_0^2 / q_s. \quad (17)$$

Потери энергии в размыкателе

$$\Delta W_R(\tau) = \int_0^\tau R I_R^2 dt$$

(далее время переключения тока из размыкателя в обостритель обозначается без индекса 2) можно вычислить, если известны или форма и длительность фронта тока  $I_R$  или закон изменения сопротивления  $R(t)$ .

Пусть  $I_R = I_0 y(t)$ , где  $y(t)$  - функция, монотонно убывающая от 1 до 0. В соответствии с (13) и схемой рис.3

$$I_r + I_R = I_0, \quad R I_R = r I_r. \quad (18)$$

Отсюда

$$R = r(1/y - 1),$$

а  $\Gamma$  определяется решением уравнения (16) при  $I_r = (1-y)I_0$ :

$$\Gamma = \Gamma_0 \exp\left[\gamma_r \int_0^{\Gamma} (1-y)^2 dt\right].$$

Выражение для  $\Delta W_R(\tau)$  принимает следующий вид:

$$\Delta W_R(\tau) = (\Gamma_0 I_0^2 / \gamma_r) \int_0^{\Gamma} y(x) [1-y(x)] \exp\left\{\int_0^x [1-y(\xi)]^2 d\xi\right\} dx.$$

В точке  $x = x^* = \gamma_r t^*$ , где  $y = 1/2$ , функция  $y(1-y)$  достигает максимума. Это позволяет оценить интеграл методом перевала, воспользовавшись известной формулой [7]

$$\int_a^b \psi(x) \exp f(x) dx = [-2\pi / f''(x^*)]^{1/2} \psi(x^*) \exp f(x^*) \quad (19)$$

(точка  $x^*$  максимума  $f(x)$  лежит внутри интервала интегрирования;  $\psi$  означает производную по  $x$ ). Полагая

$$f(x) = \ln[y(1-y)], \quad \psi(x) = \exp\left\{\int_0^x [1-y(\xi)]^2 d\xi\right\},$$

получаем

$$\Delta W_R(\tau) = \frac{\sqrt{\pi} I_0^2 \Gamma_0}{8 |\dot{y}(t^*)|} \exp\left\{\gamma_r \int_0^{t^*} [1-y(t)]^2 dt\right\}. \quad (20)$$

Метод перевала применим, если [7]  $x^{**} f''(x^*) > f(x^*)$ . В данном случае этот критерий принимает следующий вид:

$$4[t^* \dot{y}(t^*)]^2 > \ln 2. \quad (21)$$

В соответствии с предположениями о характере изменения  $\Gamma$  необходимо, чтобы в момент  $\tau$  выполнялось условие

$$\Gamma_0 \exp\left[\gamma_r \int_0^{\Gamma} (1-y)^2 dt\right] < \Gamma_2. \quad (22)$$

Отсюда, представив интеграл в виде

$$\int_0^1 \frac{(1-y)^2}{(-\dot{y})} d(1-y) = \frac{1}{3 \langle -\dot{y}(\tau) \rangle},$$

где  $\langle \dot{y}(\tau) \rangle$  - среднее значение производной в промежутке от 0 до  $\tau$ , получаем:

$$\chi_r \leq 3 \langle -\dot{y}(\tau) \rangle \ln(r_s/r_0). \quad (23)$$

Таким же образом может быть представлен интеграл и в (20):

$$\int_0^{1/\varepsilon} \frac{(1-y)^2}{(-\dot{y})} d(1-y) = \frac{1}{24 \langle -\dot{y}(t^*) \rangle}$$

( $\langle -\dot{y}(t^*) \rangle$  - среднее значение  $\dot{y}(t)$  в промежутке от 0 до  $t^*$ ). Если затем воспользоваться (23) и исключить  $\chi_r$  с помощью (17), то окажется, что

$$\Delta W_R(\tau) \approx \frac{3\sqrt{\pi}}{8} q_s \frac{\ln(r_s/r_0)}{1-r_0/r_s} \frac{\langle \dot{y}(\tau) \rangle}{\dot{y}(t^*)} \left( \frac{r_0}{r_s} \right)^{1-(1/3)\langle \dot{y}(\tau) \rangle / \langle \dot{y}(t^*) \rangle} \quad (24)$$

Особенность полученной оценки заключается в слабой зависимости от вида функции  $y(t)$ , соответствующей реальным фронтам переключения токов при монотонном росте  $R(t)$ .

Для фронта, близкого по форме к линейному, при выполнении указанного из (23) условия  $\chi_r \tau \leq 3 \ln(r_s/r_0)$  и  $r_0 \ll r_s$  согласно (24)

$$\Delta W_R(\tau) \approx (3\sqrt{\pi}/8) q_s (r_0/r_s)^{1/3} \ln(r_s/r_0). \quad (25)$$

Такой же результат получается при подстановке  $y = 1 - t/\tau$  непосредственно в (20).

Рассмотрим еще один пример, возмем  $y = \cos^2(\pi t/2\tau)$  (в этом случае точность оценки потерь по методу передела выше, так как левая часть (21), равная  $\pi^2/4$ , в 2,5 раза больше, чем для линейной функции). Если, как этого требует (22),  $\chi_r \tau \leq (8/3) \ln(r_s/r_0)$  и  $r_0 \ll r_s$ , то из (20) следует, что

$$\Delta W_R(\tau) \approx (2/3\sqrt{\pi}) (r_0/r_s)^{(1/2)(1+8/3\pi)} \ln(r_s/r_0) q_s.$$

Показатель степени, в которую возводится  $r_0/r_s$ , здесь больше,

чем в (25) всего лишь на 0,04. Однако коэффициент, зависящий от отношения  $\langle \dot{y}(\tau) \rangle / \dot{y}(t^*)$ , в 1,8 раза меньше, чем в (25). В результате  $\Delta W_R$  по сравнению с величиной, определяемой (25), оказывается примерно вдвое меньше. Это обусловлено существенным отличием фронта от линейного. Обычно форма фронта ближе к линейной, чем к описываемой функцией  $y = \cos^2(\pi t / 2\tau)$ , и поэтому  $\Delta W_R(\tau)$  правильнее оценивать с помощью (25), полагая

$$\Delta W_R(\tau) \approx 0,6q_s(r_0/r_s) \ln(r_s/r_0). \quad (26)$$

При заданном  $R(t)$  с учетом (18)

$$\Delta W_R(\tau) = I_0^2 \int_0^\tau r \frac{(r/R) dt}{(1+r/R)^2}.$$

Внутри промежутка интегрирования зависящая от  $u = r/R$  функция  $F(u) = u/(1+u)^2$  имеет максимум в точке  $t = t_1$ , где  $u = 1$ . Поскольку  $r(t)$  ограничено, для оценки интеграла в этом случае также можно воспользоваться методом перепада. Из (19) при  $\psi(t) = r(t)$   $f(t) = \ln F(t)$  получаем:

$$\Delta W_R(\tau) \approx (\sqrt{\pi}/2) I_0^2 r(t_1) / |\dot{u}(t_1)|. \quad (27)$$

К данному случаю метод перепада применим, если

$$|\dot{u}(t_1)t_1| > 2\sqrt{\ln 2}. \quad (28)$$

Для непрерывного переключения тона, очевидно, необходимо, чтобы

$$\dot{R}/R > \dot{r}/r. \quad (29)$$

Принимая во внимание (18), можно записать (16) в виде

$$\dot{r}/r = \gamma_r / (1+r/R)^2. \quad (30)$$

Отсюда  $\dot{r}(t_1)/r(t_1) = \gamma_r/4$  и (28) выполняется, если

$$|\dot{u}(t_1)| = \dot{R}(t_1)/R(t_1) - \gamma_r/4 > 2\sqrt{\ln 2}/t_1. \quad (31)$$

чтобы с помощью (27) получить окончательный результат, надо найти  $\dot{u}(t_r)$  и  $r(t_r) = r_r = R_r = R(t_r)$ .

Для  $R = R_0 \exp(\gamma_R t)$  с  $\gamma_R = \text{const}$  (30) имеет аналитическое решение

$$\left(\frac{u}{u_0}\right)^2 \left| \frac{A-1-u_0}{A-1-u} \right|^{A(A+1)} \left| \frac{A+1+u_0}{A+1+u} \right|^{A(A-1)} = \left(\frac{R}{R_0}\right)^{2(A^2-1)}, \quad (32)$$

где  $u_0 = r_0/R$ ,  $A^2 = \gamma_r/\gamma_R$ . Условие (29), которое может быть записано как  $du/dR < 0$ , для всех  $u$  и  $R$  выполняется только при  $A \leq 1$ , или  $\gamma_r > \gamma_R$ . Представляют интерес значения  $r = r_a$  при  $u = u_a \ll 1$  и  $r = r_r$  при  $u = 1$ . В соответствии с (32), если  $A^2 \ll 1$ , то

$$\begin{aligned} r_r/r_0 &\approx 1 + A^2(\ln 2 - 1/2), \\ r_a/r_0 &\approx 1 + A^2[\ln(1/u_a) - 1], \end{aligned} \quad (33)$$

а для случая, когда  $(1-A)/A \ll 1$ ,

$$\begin{aligned} r_r/r_0 &\approx \exp(1/2)/3^{1/4} \approx 1,25, \\ r_a/r_0 &\approx [(u_a/2)\exp(2/u_a)]^{1/4}. \end{aligned} \quad (34)$$

Из (33) следует, что при  $\gamma_R \gg \gamma_r$  даже для  $u_a \sim 10^{-2}$  отношение  $r_a/r_0$  мало отличается от 1 (ток переключается настолько быстро, что сопротивление обострителя существенно не меняется на успеваеет). Согласно (34) и при  $\gamma_r \gg \gamma_R$  разница между  $r_r$  и  $r_0$  также незначительна. Для  $r_a/r_0 \approx 10$

$$u_a = [2\ln(r_a/r_0) + (1/2)\ln\ln(r_a/r_0) + 0,7]^{-1}.$$

С увеличением  $r_a/r_0$  от 10 до 20  $u_a$  снижается от 1/6 до 1/7. Однако не во всех случаях такое значение  $u_a$  может считаться удовлетворительным. Для более полного переключения тока в обострителе необходимо, чтобы  $\gamma_r$  было больше, чем  $\gamma_R$ , примерно вдвое. Следует отметить также, что уже при  $\gamma_r = \gamma_R$  неравенство (28) выполняется на пределе. Если тем не менее, воспользоваться (27), то

$$\Delta W_r(\tau) \approx (5\sqrt{\pi}/6)[r_0 q_s / (r_3 - r_0)] \approx 1,5 r_0 q_s / (r_3 - r_0). \quad (35)$$

Как следует из (29) и (30), непрерывное переключение тока возможно и при

$$\gamma_r \frac{R}{\dot{R}} \frac{1}{(1+u)^2} = 1 - \lambda = \text{const}, \quad (36)$$

если  $0 < \lambda < 1$ . В этом случае  $dr/dR = (1-\lambda)r/R$  и  $r/r_0 = (R/R_0)^{1-\lambda}$

$$u/u_0 = (R_0/R)^\lambda. \quad (37)$$

Исключив из (36) с помощью (37)  $R/\dot{R}$ , получим уравнение

$$\frac{(1+u)^2 du}{u} = - \frac{\gamma_r dt}{1/\lambda - 1}, \quad (38)$$

интегрирование которого дает соотношение

$$\ln(u_0/u) + 2(u_0 - u) + (u_0^2 - u^2)/2 = \gamma_r t / (1/\lambda - 1).$$

Обычно  $u_0 \gg 10$  и вплоть до  $u = u_a = 0,1$  логарифмическим членом можно пренебречь. Тогда

$$u = [(u_0 + 2)^2 - 2\gamma_r t / (1/\lambda - 1)]^{1/2} - 2 = 2 \left\{ [1 + u_0(1 + u_0/4)(1 - t/\tau)]^{-1/2} - 1 \right\}, \quad (39)$$

где время коммутации  $\tau$  определяется из (38) условием  $u(\tau) = 0$ :

$$\tau = u_0(u_0 + 4)(1/\lambda - 1) / (2\gamma_r). \quad (40)$$

Пологая в выражении  $R_a/R_0 = (r_a/r_0)(r_0/R_0)$  каждый множитель равным 10,  $u_0 = 10$  и  $u_a = 0,1$ , из (37) находим:

$$\lambda = \ln(u_0/u_a) / \ln(R_a/R_0) \approx 2/3.$$

Для этого значения  $\lambda$  в соответствии с (37), (39) и (40)

$$\tau = u_0(u_0/4 + 1) / \gamma_r,$$

$$R(t) = \frac{R_0}{2\sqrt{2}} \left[ \frac{u_0}{\sqrt{1 + u_0(1 + u_0/4)(1 - t/\tau)^{-1}} - 1} \right]^{3/2}.$$

Из (38) и (39) следует, что для любых  $\lambda$  в промежутке между 0 и 1

$$|\dot{u}(t_1)|_{t_1} = (u_0 + 5)(u_0 - 1) / 8$$

и условие (28) заведомо выполняется. Согласно (27) при  $\lambda = 2/3$

$$\Delta W_p(\tau) \approx \sqrt{\underline{U}_0} q_p r_0 / (r_s - r_0), \quad (42)$$

что в  $\sqrt{U_0}$  раз больше величины, определенной (35).

Рассмотрим более общий случай, предположив, что  $R(t)$  изображается монотонно возрастающей непрерывной кривой, выпуклой от оси  $t$ . Решение (30) при  $R \ll r$  имеет следующий вид:

$$r^2(t) = r_0^2 + 2\gamma_r \int_0^t R^2(\theta) d\theta. \quad (43)$$

Когда, наоборот,  $R \gg r$ ,

$$r(t) = r_\tau \exp[-\gamma_r(\tau - t)], \quad (44)$$

где  $r_\tau = r(\tau)$ . Продолжим каждое из этих решений до точки  $t = t_1$ , где они должны определять одну и ту же величину. Введем обозначения

$$\alpha = 2 \int_0^{t_1} R^2(t) dt / (r_1^2 t_1) \quad (45)$$

(для кривой, выпуклой от оси  $t$ ,  $\alpha < 2/3$ ) и учитывая, что  $r_1^2 \gg R_1^2$ , из (43) получаем:

$$r_1^2 = r_0^2 / (1 - \alpha \gamma_r t_1). \quad (46)$$

Условие равенства значений  $r_1$ , определенных (44) и (46), дает уравнение

$$r_\tau^2 (1 - \alpha \gamma_r t_1) \exp(2\gamma_r t_1) = r_0^2 \exp(2\gamma_r \tau),$$

позволяющее найти  $t_1$  в зависимости от величин  $\gamma_r \tau$ ,  $r_0$  и  $r_\tau$ , заданных режимом переключения. Полагая

$$x = \gamma_r t, \quad c = 2[\gamma_r \tau - \ln(r_\tau / r_0)],$$

представим полученное уравнение в виде

$$\ln(1 - \alpha x) + 2x = c. \quad (47)$$

Функция  $q(x) = \ln(1 - \alpha x) + 2x$  (ее график изображен на рис.4), возрастающая от нуля при  $x = 0$ , достигает в точке

$$x_m = (2 - \alpha) / (2\alpha) \quad (48)$$

максимума

$$g_m = 2/\alpha - \ln(2/\alpha) - 1 \quad (49)$$

и затем быстро спадает, устремляясь к  $-\infty$  при  $x = 1/\alpha$ . В промежутке  $0 \leq x < 1/\alpha$  кривая  $g(x)$  вогнута к оси  $x$ , так как  $d^2g/dx^2 < 0$ .

Сопротивление  $\Gamma$  растет экспоненциально только при  $R \gg r$ .

Поэтому всегда  $c > 0$ , и при  $t < t_1$

$$\Gamma_t^2 \exp[-2\gamma_r(\tau - t)] < \Gamma_0^2 / (1 - \alpha\gamma_r t).$$

Иначе говоря,  $g(\bar{x}) < c$ , если  $x < x_1 = \gamma_r t_1$ . Отсюда следует, что физический смысл имеет только тот корень (47), который на рис. 4 соответствует пересечению кривой  $y = g(x)$  с прямой  $y = c$  при  $x \leq x_m$ . Если  $c \ll g_m$ , то  $x_1 \ll x_m$  и  $\alpha x_1 \ll 1$ . Разлагая в (47)  $g(x)$  по малому параметру  $\alpha x$  и учитывая, что  $c \ll 1/\alpha$ , для  $\alpha/4 \ll 1$  получаем:

$$x_1 \approx c / (2 - \alpha). \quad (50)$$

При  $\alpha c \ll 1$  в соответствии с (46)

$$\Gamma_1 \approx \Gamma_0 [1 + (c/2) / (2/\alpha - 1)]. \quad (51)$$

В этом случае  $\Gamma_1$  мало отличается от  $\Gamma_0$  (режим быстрого переключения).

Режим медленного переключения определяем условием

$$(g_m - c) / g_m \ll 1. \quad (52)$$

Вблизи максимума  $g(x) \approx g_m - 2(x_m - x)^2$  и (47) с учетом (52) принимает следующий вид:

$$2(x_m - x)^2 = g_m - c.$$

Отсюда

$$x_1 = x_m - \sqrt{(g_m - c)/2}, \quad (53)$$

$$\Gamma_1 = \Gamma_0 (2/\alpha)^{1/2} / [1 + \sqrt{2(g_m - c)}]^{1/2}. \quad (54)$$

Таким образом, в режиме медленного переключения для случая, когда  $\alpha \ll 1$ ,  $\tau_1$  может быть больше  $\tau_2$  в несколько раз.

Как уже отмечалось, (29) не будет нарушено, если  $\dot{R}/R$  или постоянно и больше  $\gamma_r$  (в процессе переключения тока согласно (30)  $r/r$ , возрастая, стремится к предельному значению, равному  $\gamma_r$ ) или растет быстрее, чем  $r/r$ . Поэтому в (45)

$$2 \int_0^{t_1} R^2 dt = 2 \int_0^{t_1} \frac{R dR}{\dot{R}/R} \approx \frac{R_1^2}{\langle \dot{R}/R \rangle} \gg R_1^2 / \dot{R}_1.$$

Следовательно,  $\alpha \gg R_1 / (\dot{R}_1 t_1)$ . Но тогда в (27)

$$|\dot{U}(t_1)| = \frac{\dot{R}}{R}(t_1) - \frac{\gamma_r}{4} \gg \frac{1}{\alpha t_1} - \frac{\gamma_r}{4}$$

и с учетом (46)

$$\Delta W_R(\tau) \ll \frac{2\sqrt{\pi} \Gamma_0 q_2}{\Gamma_2 - \Gamma_0} \frac{\alpha X_1}{4 - \alpha X_1} \frac{1}{\sqrt{1 - \alpha X_1}}. \quad (55)$$

В режиме быстрого переключения  $X_1$  определяется (50).

С точностью до малых  $\sim \alpha C$  в этом случае

$$\Delta W_R(\tau) \ll \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{q_2 \Gamma_0 \alpha C}{\Gamma_2 - \Gamma_0}. \quad (56)$$

Величина  $\Delta W_R(\tau)$  максимальна при  $X_1 = X_m$ . Если в (53) положить  $q_m = C$  и подставить в (55)  $X_m$  из (48), то

$$\Delta W_R(\tau) \ll \frac{2\sqrt{\pi} q_2 \Gamma_0}{\Gamma_2 - \Gamma_0} \frac{1 - \alpha/2}{3 + \alpha/2} \left(\frac{2}{\alpha}\right)^{1/4} < \frac{2\sqrt{\pi}}{3} \frac{q_2 \Gamma_0}{\Gamma_2 - \Gamma_0} \left(\frac{2}{\alpha}\right)^{1/4}.$$

Для  $0,2 \ll \alpha \ll 0,8$  (см. таблицу)  $2/\alpha - \ln(2/\alpha) - 1 = 0,125(2/\alpha)^{3/4}$ .

Таблица.

$\alpha$	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
$2/\alpha - \ln(2/\alpha) - 1$	0,58	0,81	1,13	1,61	2,39	3,77	6,70
$(1/3)(2/\alpha)^{3/4}$	0,52	0,78	1,03	1,41	2,09	3,46	7,03

Принимая во внимание (47) и (49), полагаем  $C = 0,125(2/\alpha)^{3/4}$ .

Таким образом,

$$\Delta W_R(\tau) \ll \frac{2^{3/4} \sqrt{\pi}}{3} \frac{q_2 \Gamma_0}{\Gamma_2 - \Gamma_0} \left(\frac{C}{2}\right)^{3/4} \approx 2,6 \frac{q_2 \Gamma_0}{\Gamma_2 - \Gamma_0} \left(\frac{C}{2}\right)^{3/4}. \quad (57)$$

Если допустить, что  $c/2 = \gamma_r T - \ln(r_r/r_0) = 10$ , то и тогда  $\Delta W_R(\tau) \leq \leq 5q_s r_0 / (r_s - r_0)$ .

Сопоставив оценки величины  $\Delta W_R(\tau)$  (26), (35), (42), (56) и (57), полученные разными способами, можно заключить, что в тех случаях, когда  $r_s/r_0 \gg 10$  и в любой момент времени  $\dot{R}/R > \dot{r}/r$ ,  $\Delta W_R(\tau) \leq q_s$ . Однако при этом предполагалось, что справедливы неравенства (I4). Полученный результат не противоречит правому неравенству (I4). Неравенство  $\lambda_3 \ll \lambda_0/5$ , означающее, что  $L_{22} + L_{23} + L_{33} \ll L_0/5$ , в тех случаях, когда катушка с лайнером подключается непосредственно к выводам единственного разрыва в обмотке накопителя, не выполняется, поскольку в реальных системах  $\lambda_3$  и  $\lambda_0$  по величине сравнимы. В схеме с умноженным током в  $N$  раз  $\lambda_3 = \lambda_3^{(i)}/N \ll \lambda_0/5$  ( $N$  - число секций индуктивного накопителя, переключаемых из последовательного соединения в параллельное;  $\lambda_3^{(i)} L = L_{22}^{(i)} + L_{23}^{(i)} + L_{33}^{(i)}$  - параметр, относящийся к одному коммутируемому модулю), если  $\lambda_3^{(i)}$  и  $\lambda_0$  сравнимы, а  $N \gg 5$ . для трансформаторной схемы с  $N$  коммутаторами и коэффициентом трансформации  $n$  должно выполняться условие  $N\lambda_3^{(i)} \ll n^2 \lambda_0/5$ , что возможно при  $\lambda_3^{(i)}/\lambda_0 \sim 1$  и  $n^2 \gg 5N_0$ .

Рассеиваемая в обмотке за время  $\tau = \tau_2 < \tau_1$  энергия  $\Delta Q(\tau_2) < \Delta Q(\tau)$ . Следовательно, потери в обмотке малы по сравнению с  $\Delta W(\tau)$ .

В соответствии с (II)  $\Delta W(\tau_1) < q_s$ , если в схеме умножения

$$\gamma_2^{(i)}(\tau_1 + \Delta\tau_1) + \lambda_1^{(i)} + \lambda_2^{(i)} < N\lambda_0/5,$$

а в трансформаторной схеме

$$\gamma_2^{(i)}(\tau_1 + \Delta\tau_1) + \lambda_1^{(i)} + \lambda_2^{(i)} < n^2 \lambda_0/5N,$$

где  $\gamma_2^{(i)}$ ,  $\lambda_1^{(i)}$  и  $\lambda_2^{(i)}$  - также параметры одного модуля. С учетом (3) эти неравенства можно записать следующим образом:

$$\tau_1 + \Delta\tau_1 < [N\lambda_0/5 - (L_{11}^{(i)} + L_{12}^{(i)} + L_{22}^{(i)})/R_2^{(i)}] \quad (58)$$

(для схемы умножения) и

$$\tau_i + \Delta\tau_i < [n^2 L_0 / 5N - (L_{11}^{(i)} + L_{12}^{(i)} + L_{22}^{(i)})] / R_2^{(i)} \quad (59)$$

(для трансформаторной схемы).

#### 4. Выводы.

1. В системах с умножением тока или подключением катушки с лайвером через трансформатор легко реализуется условие, при котором потери энергии в размыкателе не зависят от индуктивности цепи, соединившей его с обострителем, и по величине не превосходят тепловой энергии  $Q_s$  обострителя, нагретого до температур кипения.

2. При ограничении времени срабатывания размыкателей неравенством (58) или (59), энергия  $\Delta W(\tau_i)$ , рассеиваемая на стадии переключения тока в размыкатель, также меньше  $Q_s$ .

3. Потери энергии в обмотке по сравнению с  $Q_s$  можно пренебречь.

4. Полные потери энергии при трехступенчатом переключении тока в катушку с лайвером можно снизить до величины, превышающей энергию взрыва обострителя (если при этом испаряется все его вещество, а энергия испарения составляет около  $5Q_s$ ) не более, чем в 1,5 раза.

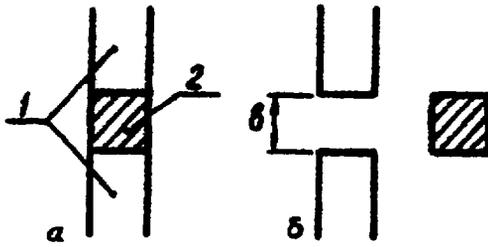


Рис.1.

Контактное соединение с выкатывающей вставкой а) замкнутое, б) разомкнутое. 1 - токоподводы, 2 - вставка.

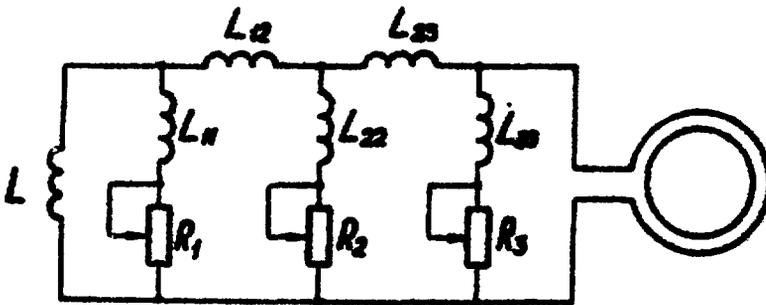


Рис.2.

Схема с трехступенчатым переключением тока в катушку с лайвером.

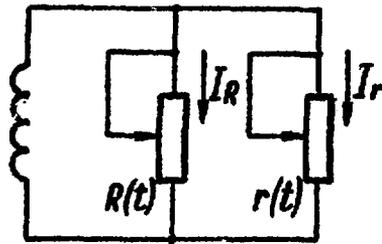


Рис.3.

Схема переключения тока из размыкателя в обостритель.

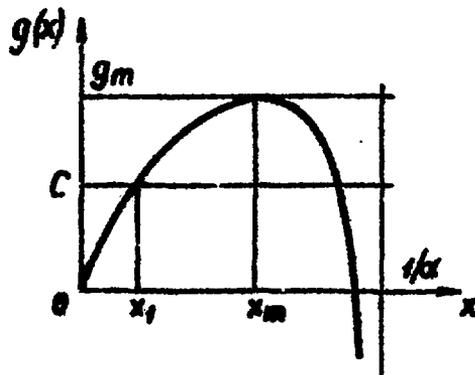


Рис.4.

График функции  $g(x)$ .

Литература.

1. В.Г.Белан, С.Т.Дурманов. Размыкатель тока с электровзрывным приводом. ПТЭ, 1980, №4, с.91.
2. Э.А.Азизов, И.В. Кочуров. Исследование процессов и эффективности вывода энергии из секционированного индуктивного накопителя с умноженным током в катушку с лайнером. Пропринт ИАЭ - 2793, 1976.
3. Д.П. Побережский. Об индуктивных накопителях энергии. Труды МЭИ, 1963, вып. 45, с. 174.
4. В.А.Трухин. автореферат диссертации "Анализ влияния диффузии поля на зарядку индуктивного накопителя и особенностей разряда секционированных систем с применением к расчету торондальных намоток D - профиля". Ленинград, НИИЭФА им Д.В.Фремова, 1980.
5. E.K. Inall. A proposal for the construction and operation of an inductive store for 20MJ. Journ. of Phys, part E, 1973, v. 7, N 7, p. 679.
6. Г.Анофрель. Сверхсильные импульсные магнитные поля. Москва, Мир, 1972.
7. А.Эрдейи. Асимптотические разложения. Москва, ГИФМЛ, 1962.

---

Технический редактор Н.И. Мазалева

Т-22085. 12.08.81. Формат 60x90/16. Уч.-над. л. 1,0  
Тираж 112. Цена 10 коп. Индекс 3624. Зак. 4261

Отпечатано в ИАЭ



Препринт ИАЭ-3498/14. М., 1981