

## О СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА И КОНДЕНСАТОРНОЙ БАТАРЕИ НА ИНДУКТИВНУЮ НАГРУЗКУ

Г. А. СИПАЙЛОВ, К. А. ХОРЬКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В современной экспериментальной физике при сооружении ускорителей заряженных частиц на большие энергии, в установках для термоядерных исследований и в некоторых других случаях возникает необходимость получать импульсные магнитные поля с энергией в десятки миллионов джоулей при длительности импульса порядка десятков миллисекунд. Для получения таких магнитных полей наиболее целесообразно накапливать энергию во вращающихся маховых массах электрических машин. В частности, для такой цели можно использовать генератор ударной мощности [1, 2, 4].

При коротком замыкании ударного генератора в зависимости от его реактивного сопротивления и диаметра ротора от 5 до 50% кинетической энергии, запасенной вращающимся ротором, может преобразоваться за время одного импульса в электромагнитную энергию статора.

При замыкании ударного генератора на индуктивную нагрузку доля кинетической энергии, преобразуемой в электромагнитную, уменьшается, при этом часть энергии, которая переходит в энергию магнитного поля нагрузки, в предельном случае при равенстве активных и соответственно индуктивных сопротивлений генератора и нагрузки, составляет 25% от электромагнитной энергии статора при коротком замыкании.

Долю кинетической энергии, переходящей в магнитное поле нагрузки, можно существенно увеличить, если параллельно с генератором подключить конденсаторную батарею, энергия которой составляет примерно четвертую часть энергии нагрузки.

В статье приводятся результаты теоретического исследования предложенной схемы увеличения энергии, отдаваемой ударным генератором в индуктивную нагрузку.

### Схема совместной работы генератора и емкости

В случае обычной схемы включения ударного генератора на нагрузку, то есть без вспомогательной емкости, между генератором и нагрузкой располагается коммутирующее устройство  $K$ , которое должно производить включение генератора в момент прохождения напряжения через нуль (рис. 1,а). При этом ток первой полуволны, необходимый для создания магнитного поля нагрузки, за счет апериодической состав-

ляющей будет иметь максимальную амплитуду и длительность, а ток второй, отрицательной полуволны, — минимальную амплитуду и длительность (рис. 1, б). Скорость роста тока и его амплитуда определяются параметрами генератора и нагрузки.

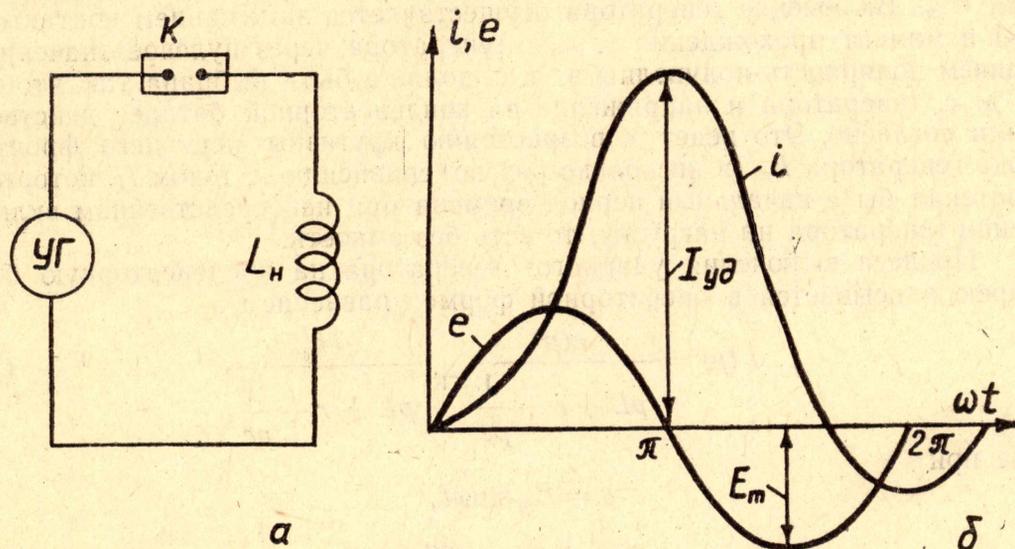


Рис. 1. а) Схема непосредственного включения ударного генератора на нагрузку; б) характер изменения напряжения и тока при включении ударного генератора в момент прохождения напряжения через нулевое значение.

Отключение генератора осуществляется тем же самым или, при разделении операций включения и выключения, другим коммутирующим устройством при первом или любом другом наперед заданном прохождении тока через нулевое значение [3, 4].

Недостатком такой схемы является то, что в лучшем случае лишь четвертая часть электромагнитной энергии статора, соответствующей короткому замыканию, может быть передана в нагрузку.

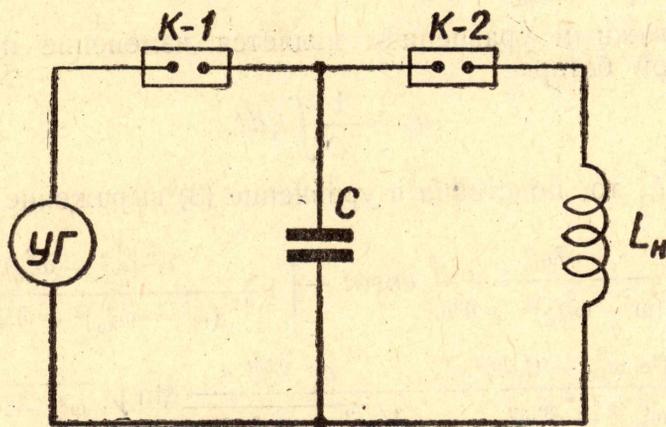


Рис. 2. Схема совместной работы ударного генератора и конденсаторной батареи на нагрузку.

Для увеличения энергии, передаваемой ударным генератором в нагрузку, можно использовать совместную работу генератора с конденсаторной батареей, заряженной предварительно до некоторого напряжения  $U_{co}$ . Схема совместной работы представлена на рис. 2, где

УГ — генератор ударной мощности, К-1, К-2 — быстродействующие бездуговые контактные аппараты [3, 4], С — конденсаторная батарея,  $r_n$ ,  $L_n$  — нагрузка.

Начальное состояние схемы таково: контактные аппараты К-1 и К-2 разомкнуты, конденсаторная батарея С заряжена до напряжения  $U_{co}$ . Включение генератора осуществляется замыканием контактов К-1 в момент прохождения э. д. с. генератора через нулевое значение, причем полярность полуволны э. д. с. должна быть выбрана так, чтобы э. д. с. генератора и напряжение на конденсаторной батарее действовали согласно. Это ведет к возрастанию крутизны переднего фронта тока генератора  $I_r$  в несколько раз по сравнению с током  $I_1$ , который протекал бы в начальный период времени при непосредственном включении генератора на нагрузку, то есть без емкости.

Процесс включения ударного генератора на конденсаторную батарею описывается в операторной форме уравнением

$$I(p) = \frac{e(p)}{pL + r + \frac{1}{pc}} + \frac{U_{co}}{pL + r + \frac{1}{pc}}, \quad (1)$$

где при

$$e = E_m \sin \omega t,$$

$$e(p) = E_m \frac{\omega p}{p^2 + \omega^2}.$$

Решив уравнение (1), получим

$$i_r = 2I_m \left\{ \frac{\delta \omega^3}{(\omega^2 - \omega_{ko}^2)^2 + \delta^2 \omega^2} \sin \omega t - \frac{\omega^2 (\omega^2 - \omega_{ko}^2)}{(\omega^2 - \omega_{ko}^2)^2 + \delta^2 \omega^2} \cos \omega t - \right. \\ \left. - \left[ \frac{0,5\delta \omega^2 (\omega^2 + \omega_{ko}^2)}{(\omega^2 - \omega_{ko}^2)^2 + \delta^2 \omega^2} - \omega \frac{U_{co}}{E_m} \right] \frac{e^{-0,5\delta t} \sin \sqrt{\omega_{ko}^2 - 0,25\delta^2} t}{\sqrt{\omega_{ko}^2 - 0,25\delta^2}} + \right. \\ \left. + \frac{\omega^2 (\omega^2 + \omega_{ko}^2)}{(\omega^2 - \omega_{ko}^2)^2 + \delta^2 \omega^2} e^{-0,5\delta t} \cos \sqrt{\omega_{ko}^2 - 0,25\delta^2} t \right\}. \quad (2)$$

Вторым важным уравнением является изменение напряжения на конденсаторной батарее

$$u_c = \frac{1}{C} \int i_c dt. \quad (3)$$

Так как  $i_c = i_r$ , то, подставив в уравнение (3) выражение для тока (2), получим

$$u_c = E_m \left\{ \frac{\delta \omega^3}{(\omega^2 - \omega_{ko}^2)^2 + \delta^2 \omega^2} \cos \omega t - \left[ 1 + \frac{\omega^2 (\omega^2 - \omega_{ko}^2)}{(\omega^2 - \omega_{ko}^2)^2 + \delta^2 \omega^2} \right] \sin \omega t - \right. \\ \left. - \frac{(\omega^2 - \omega_{ko}^2)^2 \omega \omega_{ko}^2 - 0,5\delta^2 \omega^3}{(\omega^2 - \omega_{ko}^2)^2 + \delta^2 \omega^2} \cdot \frac{e^{-0,5\delta t}}{\sqrt{\omega_{ko}^2 - 0,25\delta^2}} \sin \sqrt{\omega_{ko}^2 - 0,25\delta^2} t - \right. \\ \left. - \frac{\delta \omega^3 e^{-0,5\delta t}}{(\omega^2 - \omega_{ko}^2)^2 + \delta^2 \omega^2} \cos \sqrt{\omega_{ko}^2 - 0,25\delta^2} t \right\} + U_{co} e^{-0,5\delta t} \cos \sqrt{\omega_{ko}^2 - 0,25\delta^2} t - \\ - U_{co} \frac{0,5\delta e^{-0,5\delta t}}{\sqrt{\omega_{ko}^2 - 0,25\delta^2}} \sin \sqrt{\omega_{ko}^2 - 0,25\delta^2} t. \quad (3,a)$$

В тех случаях, когда можно пренебречь активным сопротивлением контура  $L\Gamma C$ , выражения для тока генератора и напряжения на конденсаторной батарее существенно упрощаются:

$$\delta = \frac{r}{L} = 0;$$

$$i_{\Gamma} = 2I_m \left[ \frac{\omega^2}{\omega_{\text{к0}}^2 - \omega^2} \cos \omega t - \frac{\omega^2}{\omega_{\text{к0}}^2 - \omega^2} \cos \omega_{\text{к0}} t + \frac{\omega U_{\text{с0}}}{\omega_{\text{к0}} E_m} \sin \omega_{\text{к0}} t \right]; \quad (4)$$

$$u_c = -E_m \left[ \left( 1 + \frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega_{\text{к0}}^2} \right) \sin \omega t + \frac{\omega \omega_{\text{к0}}}{\omega^2 - \omega_{\text{к0}}^2} \sin \omega_{\text{к0}} t \right] + U_{\text{с0}} \cos \omega_{\text{к0}} t, \quad (5)$$

где

$$I_m = \frac{E_m}{2\omega L},$$

$$\omega_{\text{к0}}^2 = \frac{1}{L_{\Gamma} C};$$

$\omega_{\text{к0}}$  — собственная угловая частота контура  $L_{\Gamma} C$ ;

$\omega$  — угловая частота э. д. с. генератора;

$E_m$  — амплитуда э. д. с. генератора.

После того, как напряжение заряженной до  $U_{\text{с0}}$  емкости в процессе разряда в контуре  $L_{\Gamma} C$  упадет до нуля (момент времени  $t_1$  на рис. 3), подключаем нагрузку к генератору и емкости замыканием контактов  $K-2$ . В литературе нет данных о решении подобных задач, поэтому расчет схемы (рис. 2) приводим с некоторыми подробностями. Начальные условия: при  $t = t_1$

$$u_c = U_{\text{с1}} = 0, \quad i_{\Gamma} = I_{\Gamma 1}.$$

Кроме того, с целью упрощения при всех дальнейших выкладках будем считать

$$L_{\text{н}} = L_{\Gamma} = L;$$

$$r_{\text{н}} = r_{\Gamma} = r.$$

Процесс включения нагрузки на генератор и емкость при  $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$  и  $U_c = U_{\text{с1}}$  описывается в операторной форме уравнениями

$$\begin{aligned} i_{\text{н}}(p) &= \frac{(e_1(p) + pLI_{\Gamma 1}) \frac{1}{pc} + U_{\text{с1}}(pL + r)}{\left( pL + r + \frac{1}{pc} \right)^2 - \left( \frac{1}{pc} \right)^2} = \\ &= \frac{e_1(p)}{cL^2(p + \delta)(p^2 + p\delta + \omega_{\text{к}}^2)} + \frac{pI_{\Gamma 1}}{cL(p + \delta)(p^2 + p\delta + \omega_{\text{к}}^2)} + \\ &\quad + \frac{pU_{\text{с1}}}{L(p^2 + p\delta + \omega_{\text{к}}^2)}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$i_{\Gamma}(p) = \frac{(e_1(p) + I_{\Gamma 1}pL)(pL + r) + (e_1(p) + I_{\Gamma 1}pL) \frac{1}{pc} - U_{\text{с1}}(pL + r)}{\left( pL + r + \frac{1}{pc} \right)^2 - \left( \frac{1}{pc} \right)^2} =$$

$$= \frac{pe_1(p)}{L(p^2 + p\delta + \omega_k^2)} + \frac{e_1(p)}{cL^2(p + \delta)(p^2 + p\delta + \omega_k^2)} - \frac{pU_{c1}}{L(p^2 + p\delta + \omega_k^2)} +$$

$$+ \frac{p^2 I_{r1}}{(p^2 + p\delta + \omega_k^2)} + \frac{pI_{r1}}{cL(p + \delta)(p^2 + p\delta + \omega_k^2)}, \quad (7)$$

где при

$$e_1(t) = E_m \sin(\omega t + \psi);$$

$$e_1(p) = E_m \frac{p^2 \sin \psi + \omega p \cos \psi}{p^2 + \omega^2};$$

$$\delta = \frac{r}{L}; \quad \omega_k^2 = \frac{2}{Lc};$$

$\omega_k$  — собственная угловая частота контура  $L_r CL_n$ .

В качестве примера покажем решение первого слагаемого в выражении (6)

$$\frac{e_1(p)}{cL^2(p + \delta)(p^2 + p\delta + \omega_k^2)} = \frac{E_m \omega_k^2}{2L} \frac{p^2 \sin \psi + \omega p \cos \psi}{(p + \delta)(p^2 + \omega^2)(p^2 + p\delta + \omega_k^2)};$$

$$\frac{p^2 \sin \psi + \omega p \cos \psi}{(p^2 + \omega^2)(p^2 + p\delta + \omega_k^2)(p + \delta)} = \frac{pA_1 + A_2}{p^2 + \omega^2} + \frac{pA_3 + A_4}{p^2 + p\delta + \omega_k^2} + \frac{A_5}{p + \delta}.$$

Для определения постоянных  $A_1 - A_5$  составляем систему из пяти уравнений. В результате решения системы находим:

$$A_1 = \frac{(\omega_k^2 - \omega^2 + \delta^2) \sin \psi + \frac{\delta}{\omega} (\omega_k^2 - 2\omega^2) \cos \psi}{(\omega_k^2 - \omega^2 + \delta^2)^2 + \frac{\delta^2}{\omega^2} (\omega_k^2 - 2\omega^2)^2};$$

$$A_2 = \frac{-(\omega_k^2 - 2\omega^2) \delta \sin \psi + (\omega_k^2 - \omega^2 + \delta^2) \omega \cos \psi}{(\omega_k^2 - \omega^2 + \delta^2)^2 + \frac{\delta^2}{\omega^2} (\omega_k^2 - 2\omega^2)^2};$$

$$A_3 = \frac{-\left[ (\omega_k^2 - \omega^2) + \frac{\delta^2}{\omega^2} (\omega_k^2 - \omega^2) + \frac{\delta^2}{\omega_k^2} (\omega^2 + \delta^2) \right] \sin \psi + \frac{\omega \delta}{\omega_k^2} (\omega^2 + \delta^2) \cos \psi}{(\omega_k^2 - \omega^2 + \delta^2)^2 + \frac{\delta^2}{\omega^2} (\omega_k^2 - 2\omega^2)^2}$$

$$A_4 = \frac{(\omega^2 + \delta^2) \delta \sin \psi + (\omega_k^2 - \omega^2 - \delta^2 + \delta^2 \frac{\omega_k^2}{\omega^2}) \omega \cos \psi}{(\omega_k^2 - \omega^2 + \delta^2)^2 + \frac{\delta^2}{\omega^2} (\omega_k^2 - 2\omega^2)^2};$$

$$A_5 = \frac{\frac{\delta^2}{\omega^2} (\omega^2 + \delta^2 - \omega_k^2) \sin \psi + \frac{\delta}{\omega} \left[ \omega_k^2 - 2\omega^2 + \frac{\omega^2}{\omega_k^2} (\omega^2 + \delta^2) \right] \cos \psi}{(\omega_k^2 - \omega^2 + \delta^2)^2 + \frac{\delta^2}{\omega^2} (\omega_k^2 - 2\omega^2)^2}.$$

Пользуясь формулами перехода от операторной формы к временной, получим в конечном виде выражение 1-го слагаемого во временной форме

$$\begin{aligned}
C_1(t) = & \frac{E_m}{2L} \cdot \frac{\omega_k^2}{(\omega_k^2 - \omega^2 + \delta^2)^2 + \frac{\delta^2}{\omega^2} (\omega_k^2 - 2\omega^2)^2} \times \\
& \times \left\{ \left[ (\omega_k^2 - (\omega^2 + \delta^2) \sin \psi + \frac{\delta}{\omega} (\omega_k^2 - 2\omega^2) \cos \psi) \frac{1}{\omega} \sin \omega t + \right. \right. \\
& + \left[ (-(\omega_k^2 - 2\omega^2) \delta \sin \psi + \omega (\omega_k^2 - \omega^2 + \delta^2) \cos \psi) \frac{1}{\omega^2} (1 - \cos \omega t) + \right. \\
& + \left[ - \left( \omega_k^2 + \omega^2 + \delta^2 - \delta^2 \frac{\omega_k^2}{\omega^2} - \delta^2 \frac{\omega^2}{\omega_k^2} - \delta^2 \frac{\delta^2}{\omega_k^2} \right) \sin \psi + \right. \\
& + \left. \frac{\delta \omega}{\omega_k^2} (\omega^2 + \delta^2) \cos \psi \right] \cdot \frac{e^{-0,5\delta t}}{\sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2}} \sin \sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2} t - \\
& - \left[ (\omega^2 + \delta^2) \delta \sin \psi + \left( \omega_k^2 - \omega^2 - \delta^2 + \delta^2 \frac{\omega_k^2}{\omega^2} \right) \omega \cos \psi \right] \frac{1}{\omega_k^2} \times \\
& \times \left[ 1 - e^{-0,5\delta t} (\cos \sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2} t + \frac{0,5\delta \sin \sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2} t}{\sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2}}) \right] - \\
& - \left[ \frac{\delta^2}{\omega^2} (\omega^2 + \delta^2 - \omega_k^2) \sin \psi + \frac{\delta}{\omega} (\omega_k^2 - 2\omega^2 + \omega^2 \frac{\omega^2}{\omega_k^2} + \delta^2 \frac{\omega^2}{\omega_k^2}) \cos \psi \right] \times \\
& \left. \times \frac{1}{\delta} (1 - e^{-\delta t}) \right\}.
\end{aligned}$$

Аналогичным образом решаем остальные уравнения. Второй член уравнения (6) будет

$$\begin{aligned}
C_2(t) = & 0,5I_{r1} \left\{ \frac{0,5\delta e^{-0,5\delta t}}{\sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2}} \sin \sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2} t - \right. \\
& \left. - e^{-0,5\delta t} \cos \sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2} t + e^{-\delta t} \right\}.
\end{aligned}$$

Третий, последний, член уравнения (6)

$$C_3(t) = \frac{U_{c1}}{L} \frac{e^{-0,5\delta t}}{\sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2}} \sin \sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2} t.$$

Ток в нагрузке будет равен сумме трех составляющих

$$i_n = C_1(t) + C_2(t) + C_3(t). \quad (8)$$

В уравнение для тока генератора (7), кроме указанных выше составляющих  $C_1(t)$ ,  $C_2(t)$  и  $C_3(t)$ , входят еще две составляющие, которые во временной форме будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
C_4(t) = & \frac{E_m}{2\omega L} \cdot \frac{2\omega}{(\omega^2 - \omega_k^2)^2 + \delta^2 \omega^2} \left\{ \left[ (\omega_k^4 - \omega^2 \omega_k^2 + 0,5\delta^2 \omega^2) \sin \psi - \right. \right. \\
& \left. \left. - (\omega_k^2 + \omega^2) 0,5\delta \omega \cos \psi \right] \frac{e^{-0,5\delta t}}{\sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2}} \sin \sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2} t + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[ (\omega^2 - \omega_k^2) \omega \cos \psi - \omega^2 \delta \sin \psi \right] e^{-0,5\delta t} \cos \sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2} t + \\
& + \left[ \delta \omega^2 \cos \psi + (\omega^2 - \omega_k^2) \omega \sin \psi \right] \sin \omega t - \left[ (\omega^2 - \omega_k^2) \omega \cos \psi - \right. \\
& \quad \left. - \omega^2 \delta \sin \psi \right] \cos \omega t \Big\}; \\
C_5(t) = I_{r1} e^{-0,5\delta t} & \left[ \cos \sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2} t - \frac{0,5\delta}{\sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2}} \sin \sqrt{\omega_k^2 - 0,25\delta^2} t \right].
\end{aligned}$$

Ток генератора будет состоять из пяти составляющих

$$i_r = C_1(t) + C_2(t) - C_3(t) + C_4(t) + C_5(t). \quad (9)$$

Очевидно, что пользоваться столь громоздкими формулами при расчетах практически невозможно, поэтому с целью упрощения выражений для  $i_H$  и  $i_r$  пренебрегаем активным сопротивлением контура  $L_r C L_H$ , то есть считаем  $\delta = 0$ , тогда:

$$\begin{aligned}
i_H = 0,5I_{r1} + I_m \cos \psi + \frac{\nu^2}{\nu^2 - 1} \sin \psi I_m \sin \omega t - \frac{\nu^2}{\nu^2 - 1} \cos \psi I_m \cos \omega t - \\
- \left( \frac{\nu^2}{\nu^2 - 1} \sin \psi - \frac{2U_{c1}}{\nu E_m} \right) I_m \sin \nu \omega t + \\
+ \left( \frac{1}{\nu^2 - 1} \cos \psi - \frac{I_{r1}}{2I_m} \right) I_m \cos \nu \omega t. \quad (10)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
i_r = 0,5I_{r1} + I_m \cos \psi + \frac{2 - \nu^2}{\nu^2 - 1} \sin \psi I_m \sin \omega t - \\
- \frac{2 - \nu^2}{\nu^2 - 1} \cos \psi I_m \cos \omega t + \left( \frac{2\nu}{\nu^2 - 1} \sin \psi - \frac{2U_{c1}}{\nu E_m} \right) I_m \sin \nu \omega t - \\
- \left( \frac{2}{\nu^2 - 1} \cos \psi - \frac{I_{r1}}{2I_m} \right) I_m \cos \nu \omega t. \quad (11)
\end{aligned}$$

Так как  $i_c = i_H - i_r$  и  $u_c = \frac{1}{c} \int i_c dt$ , то

$$\begin{aligned}
u_c = -0,5E_m \left\{ \frac{\nu^2}{\nu^2 - 1} \sin \psi \cos \omega t + \frac{\nu^2}{\nu^2 - 1} \cos \psi \sin \omega t - \right. \\
- \frac{\nu^2}{\nu^2 - 1} \sin \psi \cos \nu \omega t - \frac{\nu}{\nu^2 - 1} \cos \psi \sin \nu \omega t + \frac{\nu I_{r1}}{2I_m} \sin \nu \omega t \Big\} - \\
- U_{c1} \cos \nu \omega t, \quad (12)
\end{aligned}$$

где

$$\nu^2 = \frac{\omega_k^2}{\omega^2}.$$

Расчеты показывают, что в случае работы ударного генератора на индуктивную нагрузку, когда  $L_H = L_r$  и  $r_H = r_r$ , приравнивание  $\delta = 0$  вносит погрешность в результаты расчета токов порядка 5 ÷ 10%.

На рис. 3 представлены кривые токов и напряжений в элементах системы (рис. 2), рассчитанные по уравнениям (10), (11) и (12) для следующих параметров:

$$L_H = L_r = L = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ гн};$$

$$E_m = 10 \text{ кВ};$$

при работе на нагрузку

$$I_m = \frac{E_m}{2\omega L} = 50000 \text{ а};$$

при коротком замыкании

$$I_{mk} = \frac{E_m}{\omega L} = 100000 \text{ а}.$$

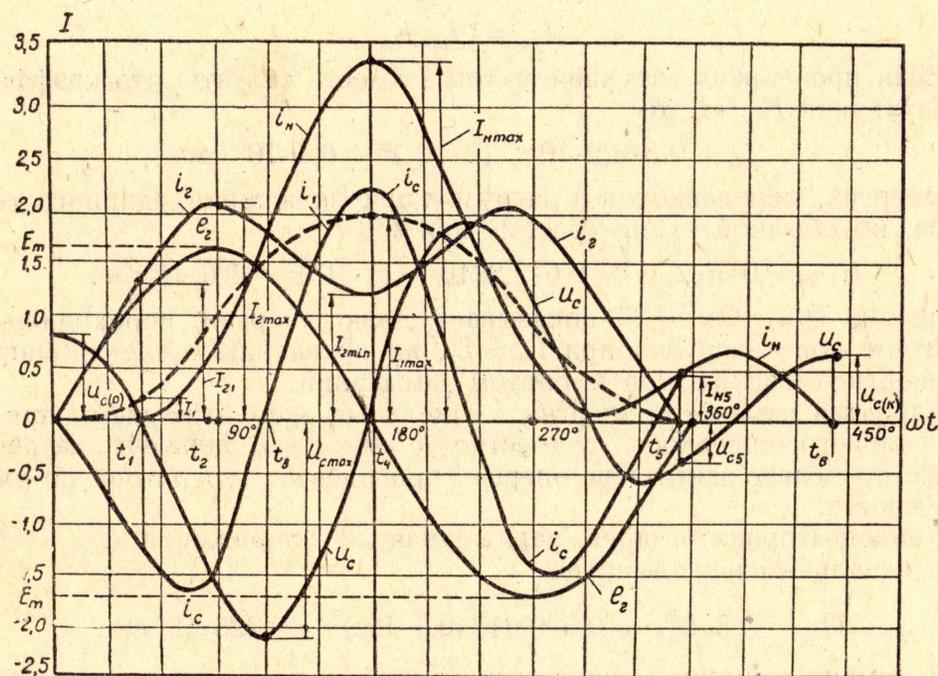


Рис. 3. Характер изменения напряжения и токов в элементах схемы совместной работы:  $i_r$ —ток генератора;  $i_c$ —ток емкости;  $i_n$ —ток нагрузки;  $i_1$ —ток при непосредственном включении генератора на нагрузку;  $e_1$ —э. д. с. генератора;  $u_c$ —напряжение на емкости.

Правильным выбором соотношения между индуктивностями генератора и нагрузки и вспомогательной емкости можно избежать перенапряжения в схеме, ограничив их, например, величиной  $1,25 E_m$ . В рассматриваемом примере из условия получения перенапряжений на нагрузке не более  $1,2 E_m$  при сравнительно небольшой конденсаторной батарее принимаем  $v^2 = 3,5$  и  $U_{c0} = 0,5 E_m$ .

Выбор величины емкости определяется из выражения

$$C = \frac{L_H + L_r}{L_H L_r} \cdot \frac{1}{v^2 \omega^2}$$

при

$$L_H = L_r, \\ C = \frac{2}{v^2 \omega^2 L},$$

в рассматриваемом случае  $C = 0,018 \text{ ф}$ .

Как видно из рис. 3, ток в нагрузке при работе ударного генератора совместно с конденсаторной батареей значительно (в рассматриваемом случае в 1,7 раза) больше тока, получаемого при работе генератора по обычной схеме.

### Энергетические соотношения

Рассмотрим для сравнения энергетические показатели работы ударного генератора по схемам (рис. 1) и (рис. 2) для различных моментов времени, отмеченных на рис. 3.

Электромагнитная энергия генератора при внезапном коротком замыкании на его зажимах при  $t = t_4$

$$Q = 0,5 L_r I_{уд}^2;$$

$$I_{уд} = 2I_{мк} K_3.$$

Если пренебречь затуханием тока, то есть считать, что коэффициент затухания  $K_3 = 1$ , то

$$Q = 0,5 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4} (2 \cdot 10^5)^2 = 6,4 \cdot 10^6 \text{ дж.}$$

Энергия, передаваемая в нагрузку при включении ударного генератора, по обычной схеме (рис. 1) при  $t = t_4$

$$Q_{1(4)} = 0,5 L_n I_{1(4)}^2 = 0,5 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4} (1 \cdot 10^5)^2 = 1,6 \cdot 10^6 \text{ дж.}$$

Отношение  $Q_{1(4)} : Q = 0,25$  показывает долю энергии, переходящей в магнитное поле нагрузки при  $L_n = L_r$ , по сравнению с электромагнитной энергией статора при коротком замыкании.

Характер изменения энергии в отдельных элементах схемы при работе ударного генератора совместно с емкостью показан на рис. 4; там же приведено изменение энергии при работе генератора по схеме без емкости.

Конденсаторная батарея, заряженная до напряжения  $U_{с0} = 0,5E_m$ , имеет начальный запас энергии

$$Q_{с0} = 0,5cU_{с0}^2 = 0,5 \cdot 0,018 (0,5 \cdot 10^4)^2 = 0,225 \cdot 10^6 \text{ дж.}$$

В момент времени  $t_1$ , соответствующий углу  $\psi = 50^\circ$ , когда напряжение на емкости  $U_{с1} = 0$  и ток генератора  $I_{г1} = 1,3I_m$ , в полях рассеяния обмотки статора запасена электромагнитная энергия:

$$Q_{г1} = 0,5L_r I_{г1}^2 = 0,5 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4} (1,3 \cdot 0,5 \cdot 10^5)^2 = 0,675 \cdot 10^6 \text{ дж.}$$

Следовательно, к моменту включения нагрузки из кинетической энергии вращающегося ротора перешло в электромагнитную энергию полей рассеяния статора

$$Q_{г1} - Q_{с0} = 0,675 \cdot 10^6 - 0,225 \cdot 10^6 = 0,45 \cdot 10^6 \text{ дж,}$$

что по сравнению с энергией полей рассеяния при работе генератора по обычной схеме ( $Q_{г1} = 0,016 \cdot 10^6 \text{ дж}$ ) почти в 30 раз больше. Таким образом, в результате подключения конденсаторной батареи достигается ускорение процесса преобразования кинетической энергии ротора в электромагнитную энергию. При подключении нагрузки часть тока генератора продолжает идти по емкостной цепи, перезаряжая емкость, и часть тока ответвляется в нагрузку. Поэтому в начальный период времени ток нагрузки плавно нарастает от своего нулевого значения.

Такая форма кривой тока облегчает процесс бездугового включения нагрузки, кроме того, в случае применения совместной работы ге-

нератора и емкости, например, в схемах питания ускорителей заряженных частиц, такое изменение тока сможет обеспечить необходимое уменьшение скорости роста управляющего магнитного поля от нуля до значения, определяемого уровнем инжекции.

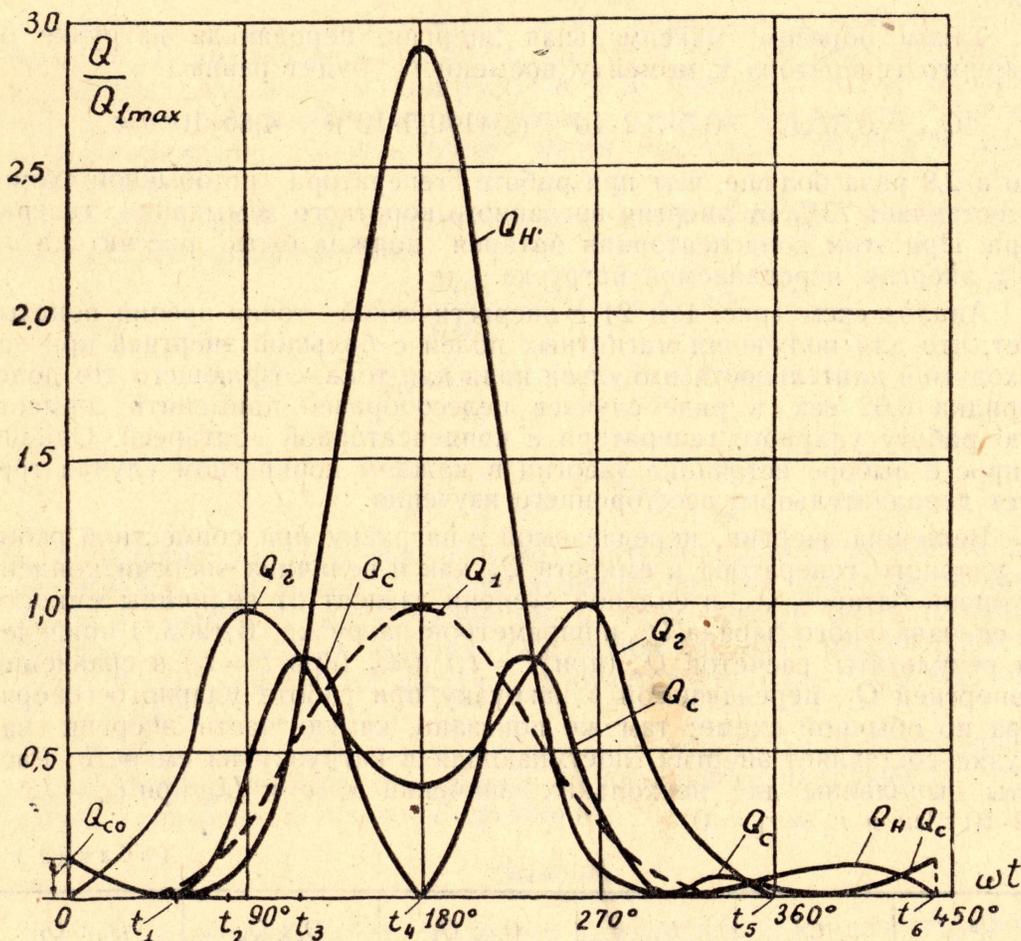


Рис. 4. Характер изменения энергии в элементах схем работы ударного генератора на нагрузку:  $Q_H$ —энергия в нагрузке при совместной работе;  $Q_1$ —энергия в нагрузке при работе по схеме без емкости;  $Q_r$ —энергия полей рассеяния обмотки статора при совместной работе;  $Q_c$ —энергия конденсаторной батареи.

В момент времени  $t = t_2$  ток генератора достигает своего наибольшего значения  $I_{r2} = I_{rmax}$ . При этом максимальная энергия, запасаемая в полях рассеяния генератора,

$$Q_{r2} = 0,5L_r I_{r2}^2 = 1,6 \cdot 10^6 \text{ дж.}$$

В момент времени  $t = t_3$  конденсаторная батарея заряжена до наибольшего напряжения  $U_{c3} = U_{cmax} = 1,2E_m$ , а ток через емкость равен нулю, при этом максимальная энергия, запасенная в батарее, равна

$$Q_{c3} = 0,5cU_{c3}^2 = 0,5 \cdot 0,018 (1,2 \cdot 10^4)^2 = 1,3 \cdot 10^6 \text{ дж.}$$

При  $t > t_3$  через нагрузку идет весь ток генератора и ток разряжающей емкости. Ток нагрузки достигает своего максимального значения  $I_{н4} = I_{нmax} = 3,4I_m$  в момент времени  $t_4$ , соответствующем углу  $\psi = 180^\circ$ . При этом конденсаторная батарея полностью отдает запасе-

мую энергию нагрузке  $U_{c4} = 0$  и  $Q_{c4} = 0$  (рис. 3 и 4). Часть энергии, запасенной в полях рассеяния генератора, также передается нагрузке, а при определенном соотношении  $\nu = \frac{\omega_k}{\omega}$  она передается полностью.

Таким образом, максимальная энергия, переданная нагрузке от ударного генератора к моменту времени  $t_4$ , будет равна

$$Q_{н4} = 0,5L_n I_{н4}^2 = 0,5 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4} (3,41 \cdot 0,5 \cdot 10^5)^2 = 4,65 \cdot 10^6 \text{ дж},$$

что в 2,9 раза больше, чем при работе генератора по обычной схеме, и составляет 73% от энергии внезапного короткого замыкания генератора. При этом конденсаторная батарея должна быть рассчитана на 28% энергии, передаваемой нагрузке.

Анализ схем (рис. 1 и 2) с энергетической точки зрения показывает, что для получения магнитных полей с большой энергией при необходимой длительности импульса поля или тока, создающего это поле, порядка 0,02 сек, в ряде случаев целесообразно применять совместную работу ударного генератора с конденсаторной батареей. Однако вопрос о выборе источника энергии в каждом конкретном случае требует дополнительного всестороннего изучения.

Величина энергии, передаваемой в нагрузку при совместной работе ударного генератора и емкости  $Q_n$ , как и величина энергии конденсаторной батареи  $Q_c$ , в сильной степени зависят от величины емкости  $c$ , ее начального заряда  $U_{c0}$  и параметров нагрузки. В табл. 1 приведены результаты расчетов  $Q_n$  (при  $t = t_4$ ) и  $Q_c$  (при  $t = t_3$ ) в сравнении с энергией  $Q_1$ , передаваемой в нагрузку при работе ударного генератора по обычной схеме; там же показано, какую часть энергии нагрузки составляет энергия, поступающая в нагрузку из емкости. Расчеты выполнены для нескольких значений  $\nu$ ,  $c$  и  $U_{c0}$  при  $L_n = L_r = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ гн}$  и  $r_n = r_r = 0$ .

Таблица 1

| $\nu^2$ | $c$   | $U_{c0}$ | $Q_c : Q_1$ | $Q_c : Q_n$ | $Q_n : Q_1$ |
|---------|-------|----------|-------------|-------------|-------------|
| 3,5     | 0,018 | 0        | 0,54        | 0,26        | 2,00        |
| "       | "     | 0,50     | 0,82        | 0,28        | 2,90        |
| "       | "     | 0,75     | 1,08        | 0,31        | 3,53        |
| 3,0     | 0,021 | 0        | 0,88        | 0,38        | 2,25        |
| "       | "     | 0,50     | 1,28        | 0,39        | 3,55        |
| "       | "     | 1        | 2,05        | 0,40        | 5,06        |

Более подробный анализ влияния отдельных параметров на совместную работу генератора и емкости, выполненный с помощью вычислительных машин, будет дан в отдельной статье.

#### Отключение генератора и нагрузки

При  $t > t_4$  энергия, запасенная в нагрузке, возвращается генератору и вновь преобразуется в кинетическую энергию вращающегося ротора. При прохождении тока генератора через нуль или в момент времени, когда ток  $i_r$  близок к нулю ( $t_5$ ), генератор отключается раз-

мыканием контактов  $K-1$ . При этом в конденсаторной батарее и в нагрузке остается часть энергии, например, в рассмотренном случае:  $U_{c5} = -0,245 E_m$  и  $I_{н5} = 0,51 I_m$ , тогда

$$Q_{c5} = 0,5 c U_{c5}^2 = 0,06 \cdot 10^6 \text{ дж и}$$

$$Q_{н5} = 0,5 L_n I_{н5}^2 = 0,1 \cdot 10^6 \text{ дж.}$$

Оставшаяся в нагрузке энергия затем переходит в конденсаторную батарею. В момент времени  $t = t_6$   $I_{н6} = 0$  и  $Q_{н6} = 0$  цепь нагрузки отключается размыканием контактов  $K-2$ . Вся энергия, оставшаяся в цепи  $L_n C$  после отключения генератора, передана емкости. При этом знак напряжения емкости будет таким же, каким он был в начале цикла при  $t = 0$ .

Процесс передачи энергии от нагрузки к батарее с момента  $t = t_5$  описывается уравнениями:

$$I_n = I_m \frac{2U_{c5}}{\nu_k E_m} \sin \nu_k \omega t + I_{н5} \cos \nu_k \omega t; \quad (13)$$

$$U_c = -U_{c5} \cos \nu_k \omega t + \frac{\nu_k}{2} E_m \sin \nu_k \omega t, \quad (14)$$

где

$$\nu_k = \frac{\omega_{кк}}{\omega}; \quad \omega_{кк} = \frac{1}{L_n c};$$

$\omega_{кк}$  — собственная угловая частота контура  $L_n C$ . Величина энергии, оставшейся запасенной в конденсаторной батарее  $Q_{c6}$ , в значительной степени зависит от соотношения между  $L_n$  и  $C$ . При соответствующем выборе  $L_n$  и  $C$  можно получить  $Q_{c6}$ , равной  $Q_{c0}$ . Для рассматриваемого примера  $Q_{c6} = 0,156 \cdot 10^6 \text{ дж}$ , что соответствует  $U_{c6} = 0,42 E_m$ , т. е.  $U_{c6} = 0,84 U_{c0}$ .

Итак, в конце цикла контактные аппараты  $K-1$  и  $K-2$  оказываются разомкнутыми, емкость заряжена до начального напряжения, то есть схема приведена в исходное состояние.

### Выводы

1. Совместная работа ударного генератора и конденсаторной батареи приводит к значительному повышению использования электромагнитной энергии ударного генератора. При наличии вспомогательной емкости энергия, переданная нагрузке, увеличивается в 2—4 раза по сравнению с энергией, передаваемой нагрузке, по схеме без емкости.

2. Величина энергии, на которую должна быть рассчитана конденсаторная батарея, составляет 25—30% от величины энергии, передаваемой генератором нагрузке. При этом для зарядки конденсаторной батареи не требуется мощных источников энергии.

3. Совместная работа ударного генератора и емкости может найти применение в ускорительной технике, в установках для термоядерных исследований и в других случаях, когда необходимо получение магнитных полей с большой энергией при длительности импульса поля порядка 0,02 сек.

### ЛИТЕРАТУРА

1. П. Л. Капица. Proceedings of the Royal Society. v. 105, 1924; v. 115, 1927.
2. Г. Миямото и др. Атомная техника за рубежом, № 10, 1958.
3. В. В. Ивашин. Коммутирующее устройство. Авторское свидетельство № 155206. Бюллетень изобретений и товарных знаков № 12, 1963.
4. В. В. Ивашин, Г. А. Сипайлов. Коммутация тока генератора ударной мощности. Вопросы теории и проектирования электрических машин. Межвузовский сборник, Новосибирск, 1963.