

ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ОТ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. СИПАЙЛОВ, А. В. ЛООС, В. Ф. КУЛАКОВ

(Представлена семинаром кафедры электрических машин)

Для ряда физических исследований требуется импульсный ввод электрической энергии с помощью значительно большей, чем возможно взять из сети без нарушения ее устойчивой работы. В этих случаях используют промежуточный накопитель энергии, заряжаемый сравнительно медленно и способный затем в короткий промежуток времени передавать запасенную энергию в нагрузку. При времени передачи энергии в несколько миллисекунд и более перспективно использование электромашинных импульсных генераторов, представляющих собой сочетание механического накопителя энергии и электрического преобразователя.

Из преобразователей энергии униполярного и биполярного типа ряд преимуществ по удельной мощности и условиям коммутации ударного тока выделяют биполярные машины, из которых наиболее выгодна синхронная машина. Высокое усиление мощности при работе в сверхпереходном режиме, отсутствие скользящего контакта, передача энергии при высоком напряжении и другие преимущества создают предпосылки эффективного использования ударного генератора синхронного типа.

В данной работе анализируются процессы преобразования кинетической энергии, запасенной в роторе ударного генератора, в электромагнитную энергию импульса тока. Как электромеханический преобразователь однофазный ударный генератор синхронного типа может быть описан известными уравнениями для электрических контуров однофазной синхронной машины:

$$\begin{aligned}0 &= (r_c + r_n) i_c + \frac{d \Psi_c}{dt}, \\u_b &= r_b i_b + \frac{d \Psi_n}{dt}, \\0 &= r_{Dd} i_{Dd} + \frac{d \Psi_{rd}}{dt}, \\0 &= r_{Dq} i_{Dq} + \frac{d \Psi_{Dq}}{dt}\end{aligned} \quad (1)$$

и уравнением движения ротора

$$H_j \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + M_w + M_0 = 0. \quad (2)$$

В этих уравнениях

$$\begin{aligned}\Psi_c &= i_c(L_c + L_H) + i_b M \cos \gamma + i_{Dd} M \cos \gamma + i_{Dq} M \sin \gamma, \\ \Psi_b &= i_c M \cos \gamma + i_b L_b + i_{Dd} M, \\ \Psi_{Dd} &= i_c M \cos \gamma + i_b M + i_{Dd} L_{Dd}, \\ \Psi_{Dq} &= i_c M \sin \gamma + i_{Dq} L_{Dq} -\end{aligned}\quad (3)$$

потокосцепления контуров генератора,

$$M_\Psi = i_c M [i_{Dq} \cos \gamma - (i_b + i_{Dd}) \sin \gamma] - \text{электромагнитный момент,}$$

$$\gamma = \int_0^t \omega dt - \text{угол поворота ротора,}$$

M_0 — момент потерь холостого хода,

L_H, R_H — индуктивность и активное сопротивление нагрузки.

Система уравнений (1, 2) не имеет общего решения в области обычных алгебраических и трансцендентных функций и ее решение осуществлялось на АВМ [1].

Основным критерием характера переходных процессов, описываемых системой уравнений (1, 2), может служить величина критической индуктивности, определяемая из условия полного преобразования кинетической энергии маховых масс ротора в электромагнитную энергию полей рассеяния генератора и нагрузки:

$$L_{кр} = \frac{4 \Psi_{c0}}{I \omega_0^2}, \quad (4)$$

где

I — момент инерции ротора,

ω_0 — начальная скорость вращения ротора,

Ψ_{c0} — начальное потокосцепление обмотки статора.

Выражение (4) получено при условии весьма мощной симметричной демпферной системы на роторе, когда $\Psi_b, \Psi_{Dd}, \Psi_{Dq}$ остаются постоянными в течение переходного процесса.

Если

$$L = L_H + L_d'' = L_H + (L_c - M) + \frac{1}{\frac{1}{M} + \frac{1}{L_{Dd} - M} + \frac{1}{L_b - M}} > L_{кр},$$

то при внезапном включении в нуль э.д.с. имеем апериодический разряд генератора, при котором скорость ротора в процессе работы уменьшается, достигая минимума, не равного нулю в момент наибольшего всплеска тока, и затем по мере уменьшения тока вновь возрастает. Осциллограм-

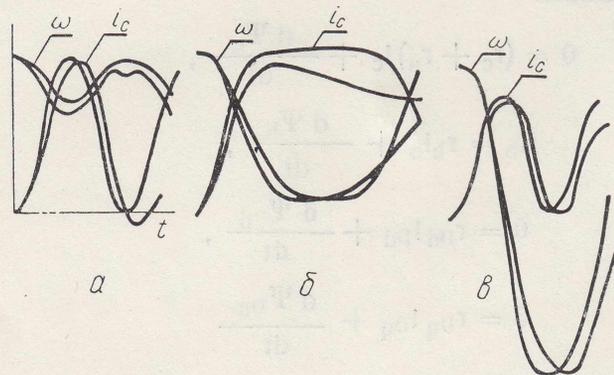


Рис. 1. Осциллограммы токов и скорости вращения ротора при различных характерах разряда на нагрузку

ма такого разряда представлена на рис. 1 а. Здесь и далее на осциллограммах ударный ток дается в долях от максимально возможного

$$I_m = \frac{2 \Psi_{c0}^2}{L_d''} .$$

С физической стороны работу генератора можно представить как процесс упругого сжатия магнитного потока, захваченного обмоткой якоря, в узком пространстве между омедненной поверхностью ротора и якорем. Магнитная энергия поля контура якоря увеличивается, и ток возрастает. Ротор, теряя кинетическую энергию на работу против пондеромоторных сил, тормозится. За последующий полуоборот энергия магнитного поля за вычетом потерь, рассеиваемых в активных сопротивлениях, преобразуются в механическую энергию, ускоряя вращение ротора.

Если сверхпереходная индуктивность генератора в сумме с индуктивностью нагрузки равна критической $L = L_{кр}$, имеем весьма неустойчивый критический режим, когда вся первоначально запасенная кинетическая энергия ротора расходуется на создание электромагнитных полей. Ротор двухполюсной машины через полуборота останавливается. Ударный ток, достигая к этому моменту максимума, в дальнейшем остается постоянным неопределенно длительное время (рис. 1, б). В реальной системе $R \neq 0$, процесс затухает.

При суммарной индуктивности генератора и нагрузки, меньшей критической $L < L_{кр}$, ток достигает максимума не через полуборота, а раньше. Ротор уменьшает свою скорость до нуля и затем реверсируется (рис. 1, в). Исходя из физической картины работы, это явление можно трактовать следующим образом. Здесь начальной кинетической энергии ротора недостаточно, чтобы до конца (до угла $\gamma = \pi$) сжать магнитный поток, и поэтому ротор, теряя скорость по мере перехода его кинетической энергии в электромагнитную, останавливается при углах $\gamma < \pi$ и начинает вращаться в обратную сторону и затем снова в прямую и т. д., подобно маятнику.

Активные сопротивления стабилизируют неустойчивости критического режима и при достаточно большой их величине происходит устойчивый апериодический разряд без реверса скорости. В этом случае вся кинетическая энергия ротора будет передана в активные сопротивления.

Работа генератора с индуктивностью, близкой к критической, с одной стороны, интересна в отношении возможностей получения длительных импульсов тока и плоской вершиной, однако, с другой стороны, неэкономична, так как вследствие растяжки импульса возрастают потери, а амплитуда тока и соответственно передаваемая энергия уменьшаются. Осциллограммы решения (рис. 2), полученные при постоянной добротности цепи разряда ($\frac{R}{L} = \text{const}$), наглядно это доказывают. Разумеется,

в режиме, близком к критическому, использование кинетической энергии более полно. Однако повышение степени использования энергии ротора связано с трудностями достижения малой индуктивности и увеличением уровня потерь энергии в генераторе или нагрузке за импульс тока. Именно эти ограничения будут решающими при выборе глубины разряда.

На рис. 3 изображено изменение длительности импульса ударного тока $t_{ц}$ в зависимости от величины L , выраженной в долях критической индуктивности $L_{кр}$ (при $R=0$). С уменьшением постоянной времени T , заданной в периодах $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$ начальной частоты, кривые резонансного

типа, характеризующие длительность импульса, смещаются влево. Практически максимальная длительность импульса ударного тока при

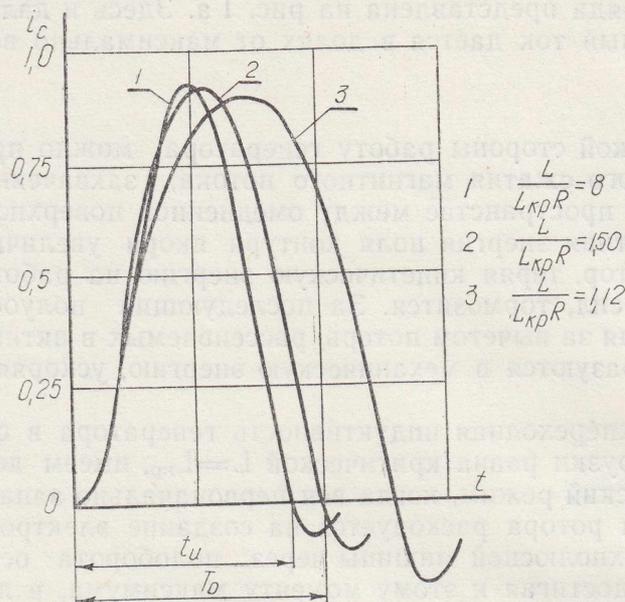


Рис. 2. Изменение тока при различных отношениях $\frac{L}{L_{кр}}$.

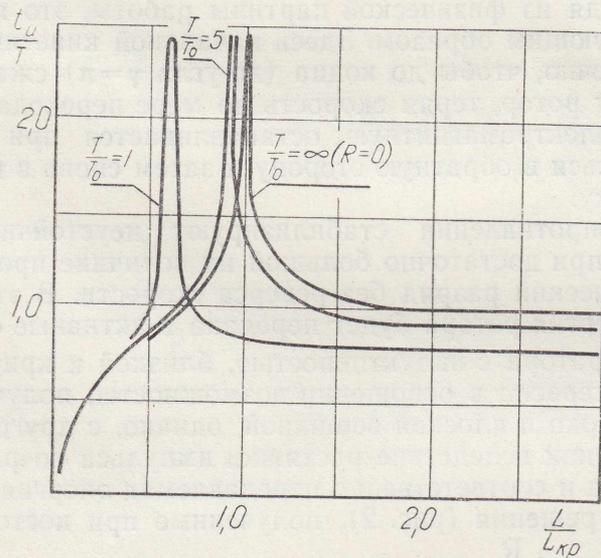


Рис. 3. Изменение длительности импульса в зависимости от параметров генератора и цепи нагрузки

$L = L_{кр}R$ будет конечной величиной, определяемой временем рассеяния энергии $\frac{1}{2} I_{\omega 0}^2$ в активных сопротивлениях генератора и нагрузки.

В экспериментах на моделях ударных генераторов с импульсной мощностью 0,5 Мва и 7,5 Мва режим разряда, соответствующий критическому или обычному вышекритическому, подбирался путем соответствующего изменения скорости вращения и форсировки потока возбуждения. Осциллограммы токов и скоростей в переходных процессах, полученные экспериментально и на АВМ (рис. 4), удовлетворительно совпадают. Погрешности вызваны в основном неточным моделированием

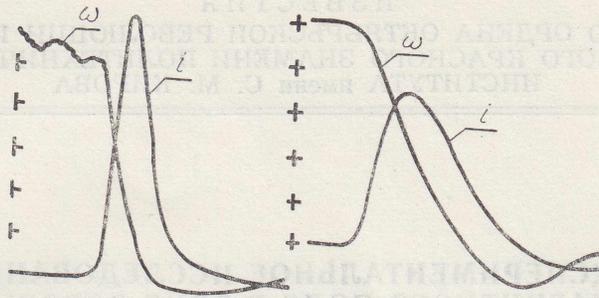


Рис. 4. Сравнительные осциллограммы, снятые на модели ударного генератора и на АВМ

потерь и несинусоидальностью поля и тока вследствие значительного насыщения магнитной системы модели.

Таким образом, показана принципиальная возможность осуществления режимов разряда ударного генератора на нагрузку с высоким коэффициентом преобразования запасенной энергии в энергию полей рассеяния и нагрузки, что показывает большие возможности инерционных накопителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос, Э. И. Собко. Математическое моделирование переходных процессов однофазного синхронного генератора. «Электротехника», 1972, № 10.